

采用三阶贝塞尔径向参数化与双材料架构的 双极型超低场磁共振磁体优化设计

宣亮^{1,2}, 徐先峰^{1,2}

(1. 长安大学交通新能源开发、应用与汽车节能技术陕西省重点实验室, 710018, 西安;
2. 长安大学能源与电气工程学院, 710018, 西安)

摘要: 针对超低场磁共振成像系统中双极型永磁体磁场均匀性受限且材料成本较高的问题, 提出一种采用三阶贝塞尔径向参数化的磁体几何优化方法。该方法将传统圆盘磁体的单一半径参数拓展为 4 个径向自由度, 在保持轮廓平滑性与制造可行性的同时显著扩大结构优化空间。基于遗传算法与有限元方法耦合计算, 对磁体、极靴及铁轭等关键部件的几何参数进行联合仿真优化, 获得磁场强度均值为 59.2 mT、磁场不均匀度为 $1\,272 \times 10^{-6}$ 的钐钴永磁体系统, 相较传统圆盘结构不均匀度降低了 21%。在此基础上, 引入钐钴-钕铁硼 (SmCo-NdFeB) 双材料复合磁体架构, 并在新几何范式下开展整数-贝塞尔复合优化, 最终得到磁场强度均值为 58.5 mT、不均匀度为 556×10^{-6} 的双材料磁体系统, 不均匀度较传统方案降低 66%。研究结果表明, 基于三阶贝塞尔径向参数化的几何范式能够有效提升双极型超低场永磁体的磁场均匀性, 并为双材料磁体的协同优化提供可行路径。

关键词: 超低场磁共振成像; 贝塞尔径向参数化; 双极型永磁体; 磁场均匀性

中图分类号: TM15 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202609002 **文章编号:** 0253-987X(2026)09-0009-10

Optimal Design of a Bipolar Ultra-Low-Field Magnetic Resonance Imaging Magnet Using Third-Order Bézier Radial Parameterization and a Dual-Material Architecture

XUAN Liang^{1,2}, XU Xianfeng^{1,2}

(1. Shaanxi Provincial Key Laboratory of New Transportation Energy and Automotive Energy Saving, Chang'an University, Xi'an 710018, China; 2. School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710018, China)

Abstract: To address the limited magnetic field homogeneity and high material cost of bipolar permanent magnet systems for ultra-low-field magnetic resonance imaging, a geometric optimization method using third-order Bézier radial parameterization is proposed. The single radius parameter of a conventional disk-shaped magnet is extended to four radial degrees of freedom, thereby significantly expanding the structural optimization space while maintaining profile smoothness and manufacturing feasibility. Coupled calculations using a genetic algorithm and the finite element method are performed to jointly optimize the geometric parameters of key components, including the magnets, pole pieces, and yoke. A SmCo permanent magnet system with an average magnetic

收稿日期: 2025-12-22。 作者简介: 宣亮(1994—), 男, 讲师; 徐先峰(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52507273); 2024 年陕西省博士后科研资助项目(2024BSHSDZZ132); 陕西省自然科学基金研究计划资助项目(2023-JC-QN-0437)。

网络出版时间: 2026-05-25

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20260522.1107.002>

field of 59.2 mT and a field inhomogeneity of $1\,272 \times 10^{-6}$ is obtained, with the inhomogeneity reduced by 21% compared with that of the conventional disk structure. On this basis, an SmCo-NdFeB dual-material composite magnet architecture is introduced, and integer-Bézier composite optimization is performed under the new geometric framework. A dual-material magnet system with an average magnetic field of 58.5 mT and an inhomogeneity of 556×10^{-6} is finally obtained, with the inhomogeneity reduced by 66% compared with that of the conventional design. It is shown that the geometric framework based on third-order Bézier radial parameterization effectively improves the magnetic field homogeneity of bipolar ultra-low-field permanent magnets and provides a feasible approach for the coordinated optimization of dual-material magnets.

Keywords: ultra-low-field magnetic resonance imaging; Bézier radial parameterization; bipolar permanent magnet; magnetic field homogeneity

作为一种无创、无电离辐射的高分辨率成像技术,磁共振成像(MRI)已成为临床疾病诊断的关键工具。但是,传统 MRI 造价与维护成本高、体积与质量大,通常只能配置于专门的科室,这也使其难以满足脑卒中等急性疾病的第一时间诊断需求^[1]。近年来,超低场 MRI 的研究逐步兴起,其基于主磁场场强 B_0 远低于传统超导磁共振系统的永磁体,使硬件系统体积与质量得以大幅减小,从而实现轻量化和低成本^[2-6]。电磁干扰抑制技术的研究不断深入,使得超低场 MRI 系统逐步具备在非屏蔽环境中运行的能力^[7-8]。然而,采用低 B_0 必然导致磁共振信号强度大幅降低。保障成像质量的关键在于 B_0 具有高均匀性。

医用超导磁共振设备的 B_0 不均匀度一般能达到 10×10^{-6} 以下,并且能保证优良的时间稳定性^[9]。对于 B_0 低于 100 mT 的永磁磁共振系统,由于场强远小于超导磁体,难以达到同等均匀性。永磁体结构的优化设计成为超低场 MRI 技术的研究热点。当前超低场 MRI 主流永磁结构可分为 Halbach 磁体^[10-13]、双极型磁体^[14-21]两类。

Halbach 磁体通过采用环形排列的永磁块阵列在成像区域产生恒磁场,阵列中各磁体方向经过特殊排布,使得合成磁场方向横贯成像区域直径。Cooley 等采用遗传算法(GA)优化 Halbach 磁体阵列,传统均匀目标场经过优化均匀性提升了一个数量级^[10],设计出 80 mT 的 23 环 Halbach 结构,理论磁场不均匀度可达 216×10^{-6} 。O'reilly 等同样采用了 GA 方法设计出直径为 27 cm 的双层结构 Halbach 阵列磁体,在 20 cm 的成像区域中将不均匀度控制在 $2\,500 \times 10^{-6}$ 以内^[11]。Galve 等通过改变椭圆孔 Halbach 磁体配置参数优化磁体性能,采用微分演化算法优化钕铁硼块的紧密排列分布,结

合内点法和差分演化方法优化外围匀场磁体阵列,获得场强为 87 mT、不均匀度为 $5\,700 \times 10^{-6}$ 的磁体结构^[13]。

双极型磁体采用 C 型、H 型等结构,仅包含两个极性相反的磁极,由铁轭固定位置,在两极间形成均匀成像磁场区域。相较于 Halbach 磁体,双极型磁体结构开放度更高,内部空间更加开阔,更适合幽闭恐惧症患者;且磁极间隙足够容纳病床于两极间移动。目前美国 Hyperfine 公司^[15-17]、香港大学^[8,18-19]、重庆大学^[4-7,20-21]等超低场 MRI 团队均基于这种磁体结构开展研究。然而,双极型永磁体的设计多数依赖于经验设计或少量参数优化,磁场均匀度仍然较低,对磁场均匀性的改善依赖后期匀场。Liu 等优化的回字形磁体磁场不均匀度约为 $2\,000 \times 10^{-6}$,在采用匀场环、钕铁硼贴片等被动匀场手段后,方可降至 $1\,000 \times 10^{-6}$ 以内^[8]。采用额外的匀场方法虽然可以大幅改善磁场质量,但是会增加硬件成本^[22-24]。此外外界环境温度的变化会直接作用于匀场材料,加剧磁场的温度漂移。因此,提升磁体本身均匀性是优化性能和稳定性的关键。

考虑到装配难度、机械稳定性等因素,双极型磁体的磁块须紧密排列安装,这限制了其空间分布的多样性,使其优化难度远高于 Halbach 磁体。因此当前各研究团队多基于整部件参数的优化,如将磁体区域视为一个圆盘^[8,20,25],基于参数扫描等方法对磁体半径、铁轭等主要参数寻优。2023 年,Wei 等设计了一种新型 H 型永磁体结构,通过在原有圆盘形磁体基础上额外增加侧磁极的方式进一步补偿磁场均匀性,最终优化出主磁场为 200 mT、质量为 654 kg、不均匀度为 525×10^{-6} 的磁体结构^[26]。这一设计打破了双极型永磁体的原有结构范式,为低场磁体系统的性能突破提供了参考。然而,总体而言,

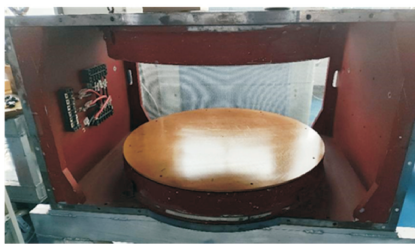
当前业内对双极型永磁体的新型结构研究仍然匮乏。

综上所述,现有超低场永磁体研究主要通过结构尺寸优化或材料参数调整改善磁场性能,但在双极型永磁体几何自由度受限的条件下,磁场均匀性提升空间受限。同时,多数研究仍采用单一永磁材料体系,对多材料协同设计的系统性研究相对不足。基于该现状,本文提出了一种基于三阶贝塞尔径向参数化的新型磁体几何范式,使永磁体的平面构型由原本单一控制参数拓展到4个自由度控制参数,并保持轮廓的平滑性,在保证加工制造可行性的同时大幅拓展了永磁结构优化空间。通过遗传算法-有限元方法的全局优化,获取满足高 B_0 均匀性的新型永磁结构,并验证其性能相较传统圆盘结构的先进性。其后,本文进一步提出了一种新型钕钴-钕铁硼复合永磁结构,并基于新型几何范式进行复合优化,基于结果讨论了复合双极型永磁体系统在 B_0 均匀性、经济性方面的优势和应用潜力。

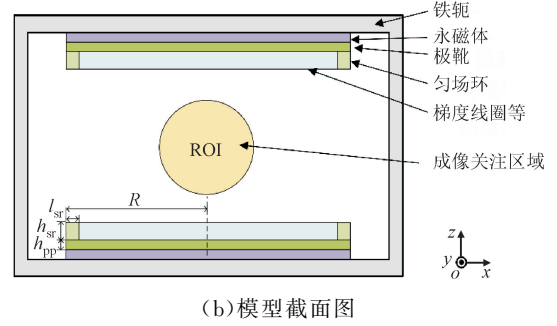
1 双极型永磁体基础模型

以重庆大学 54 mT 超低场 MRI 样机为例,双极型超低场永磁 MRI 系统如图 1 所示, x 、 y 、 z 分别对应磁体的宽度、深度、高度方向, R 为磁体的半径。其主要结构包括上下永磁体磁极、外围铁轭、极靴(厚度设为 h_{pp})、匀场环(厚度设为 h_{sr} 、长度设为 l_{sr})和其余电磁部件(射频线圈、梯度线圈等)。

由于面向急性颅脑疾病检测,成像的部位以头颅为主,关注区域(ROI)置于模型几何中心。上下两极磁体采用钕钴材料制成的磁块黏结制成,整体呈圆盘状,对最外围磁块进行了切削打磨。磁体外围的回字形铁轭用于支撑整体系统和约束磁路,在磁体设计中限制了各主要部件的尺寸上限。极靴和匀场环用于保障 B_0 磁力线的平整并且抑制端部效应,其尺寸参数对 B_0 均匀性的影响显著,故 h_{pp} 、 h_{sr} 和 l_{sr} 均可作为优化变量。



(a)实物样机



(b)模型截面图

图1 双极型超低场永磁体构型

Fig. 1 Structural diagram of bipolar ultra-low-field permanent magnet

2 三阶贝塞尔径向参数化几何优化方法

对于前述的双极型永磁体系统,在确定磁块单元的规格后,磁体厚度也被固定,仅能将圆盘半径 R 作为优化变量,这使得优化空间远小于 Halbach 磁体系统。贝塞尔曲线(Bézier curve)是一种由控制点集合经伯恩斯坦基函数(Bernstein basis function)构造的参数化曲线,其具备平滑性、凸包性及形状灵活性等核心特性,被广泛应用于路径规划^[27]、几何建模^[28]等领域。本文提出一种基于三阶贝塞尔曲线径向参数化的新型平面几何范式,将原有圆盘结构改进为对称贝塞尔曲线结构,从而大幅扩大永磁体优化空间。

2.1 永磁体系统轮廓的三阶贝塞尔径向参数化

图2(a)为标准三阶贝塞尔曲线概念图,其由4个自由度参数定义, $\{P_0(x,y), P_1(x,y), P_2(x,y), P_3(x,y)\} \in \mathbf{R}^2$ 。贝塞尔曲线的几何构造采用递归插值原理,通过参数 $t \in [0, 1]$ 生成曲线点 $B(x,y)$ 。首先,由点 $P_0(x,y) \sim P_3(x,y)$ 沿控制多边形边界(图2(a)中黑色线)线性插值,产生点集 $Q_1(x,y) \sim Q_3(x,y)$,表达式如下

$$\begin{cases} Q_1(x,y) = (1-t)P_0(x,y) + tP_1(x,y) \\ Q_2(x,y) = (1-t)P_1(x,y) + tP_2(x,y) \\ Q_3(x,y) = (1-t)P_2(x,y) + tP_3(x,y) \end{cases} \quad (1)$$

由点 $Q_1(x,y) \sim Q_3(x,y)$ 沿其间连线边界(图2(a)中蓝色线)再次线性插值,产生点集 $R_1(x,y)$ 、 $R_2(x,y)$,表达式如下

$$\begin{cases} R_1(x,y) = (1-t)Q_1(x,y) + tQ_2(x,y) \\ R_2(x,y) = (1-t)Q_2(x,y) + tQ_3(x,y) \end{cases} \quad (2)$$

由点 $R_1(x,y)$ 、 $R_2(x,y)$ 沿其间连线边界(图2(a)中紫色线)进行第3次线性插值,产生最终点 $B(x,y)$,表达式如下

$$B(x,y) = (1-t)R_1(x,y) + tR_2(x,y) \quad (3)$$

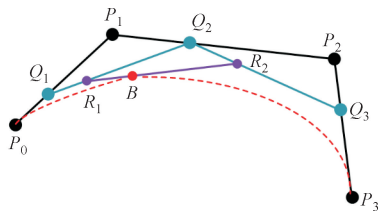
当参数 t 从 0 增加到 1 时,点 $B(x,y)$ 的运动轨迹构成三阶贝塞尔曲线(图 2(a) 中红色线)。根据式 (1)~(3),可得到三阶贝塞尔曲线的参数化表示为

$$B(x,y) = (1-t)^3 P_0(x,y) + 3t(1-t)^2 P_1(x,y) + 3t^2(1-t)P_2(x,y) + t^3 P_3(x,y) =$$

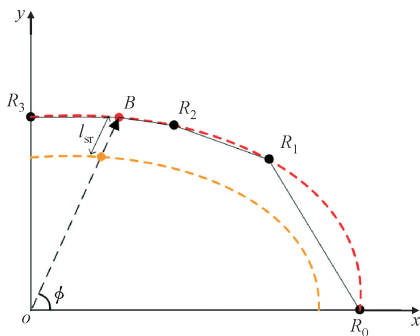
$$[1 \quad t \quad t^2 \quad t^3] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_0(x,y) \\ P_1(x,y) \\ P_2(x,y) \\ P_3(x,y) \end{bmatrix} \quad (4)$$

对于永磁体结构优化问题,由于模型具有高度对称性,本文于 xoy 平面取其 1/4 进行模型转换,如图 2(b) 所示。本文采用三阶贝塞尔曲线径向参数化的方法,将其几何构造思想迁移至一维半径域,通过降维保留曲线平滑性与凸包约束。由此,磁体的区域轮廓点 B 与坐标原点的距离 $R(\phi)$ 由 4 个自由度参数 $\{R_0, R_1, R_2, R_3\}$ 决定,式(4)改写为

$$R(\phi) = \left[1 \quad \frac{2\phi}{\pi} \quad \left(\frac{2\phi}{\pi}\right)^2 \quad \left(\frac{2\phi}{\pi}\right)^3 \right] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_0 \\ R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$



(a) 三阶贝塞尔曲线



(b) 径向参数化的磁体(红色)与匀场环内侧(橙色)轮廓

图 2 三阶贝塞尔曲线及径向参数化磁体系统轮廓示意图
Fig. 2 Third-order Bézier curve and its radial parametrization for magnet system profile

式中: $\phi \in [0, \pi/2]$ 为曲线几何参数。由此,磁体轮廓被完整参数化, R_0, R_1, R_2, R_3 实际分别对应 ϕ 为 $0, \pi/6, 2\pi/3$ 和 $\pi/2$ 时的半径。需要注意的是,由于极靴与匀场环需紧密贴合磁体内侧,在确定磁体轮廓后,匀场环内侧轮廓也需要同时确定,其轮廓点 C 与坐标原点的距离 $r(\phi)$ 可表示为

$$r(\phi) = R(\phi) - l_{sr} \quad (6)$$

2.2 永磁体系统结构寻优方法

本文针对超低场 MRI 磁体系统的主要组成部分开展了结构优化研究。图 1(b) 模型中铁轭的厚度固定为 20 mm,内部空间 z 方向高度为 440 mm, x 方向长度为 840 mm, y 方向宽度为 660 mm。在本文中,磁体单元的几何尺寸均为长 20 mm、宽 20 mm、厚 15 mm 的立方块。优化问题包含 7 个设计变量,其对应的取值范围见表 1。

表 1 磁体系统结构优化变量的取值范围及初始值
Table 1 Ranges and initial values of structural optimization variables for the magnet system

参数	最小值/ mm	最大值/ mm	优化初值/ mm
极靴厚度 h_{pp}	5	30	15
匀场环厚度 h_{sr}	5	30	15
匀场环长度 l_{sr}	10	150	35
贝塞尔参数 R_0	150	330	300
贝塞尔参数 R_1	150	330	300
贝塞尔参数 R_2	150	420	300
贝塞尔参数 R_3	150	420	300

由于模型的高度对称性,本文实际建立 1/8 磁体模型进行计算分析,并在 1/8 的 ROI 表面上构建 11×11 采样点计算其磁场强度 B_0 。磁体优化的目标是使 B_0 均匀性最佳,以保障成像质量,磁场的不均匀度定义为

$$\Gamma_B = 2 \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}} \times 10^6 \quad (7)$$

式中: $B_{\max}$ 和 $B_{\min}$ 分别为采样点处的磁场强度最大值和最小值。由此,可将优化问题表述如下

$$\min f = \omega \Gamma_B \quad (8a)$$

$$\omega = \begin{cases} 1, & |B_{\text{avg}} - B_{0\text{tar}}| \leq 5 \text{ mT} \\ 10, & |B_{\text{avg}} - B_{0\text{tar}}| > 5 \text{ mT} \end{cases} \quad (8b)$$

式中: B_{avg} 为 ROI 表面采样点中的磁场强度平均值, $B_{0\text{tar}}$ 代表目标主磁场强度大小,本文选取 55 mT, ω 为惩罚项,若计算出的磁场强度均值超出可接受范围 $(55 \pm 5) \text{ mT}$,则使适应度函数 f 乘以 10,以修正

优化方向,55 mT 为常见的超低场范围值。

为求解以上问题,本文采用遗传算法-有限元方法,通过联合仿真实现磁场的计算和磁体结构寻优。磁场计算采用 Ansys Electronics 有限元仿真软件,建立了三维 1/8 模型,如图 3 所示。其中磁体材料为钐钴($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) YXG-30H,剩磁为 1.07 T,矫顽力为 820 kA/m,剩磁温度系数为 $-0.035\%/^{\circ}\text{C}$ 。匀场环和极靴均选用 1008 低碳钢材料,铁轭则选取 Q235 钢材料,两种材料的磁化曲线如图 4 所示。磁体优化方法基于 Matlab 及其 GA 算法工具包,将参数预处理所得的基础轮廓结构输入 Ansys Electronics 中,再将磁场强度计算结果接入进行数据分析,实现基于 GA 的永磁系统结构全局寻优。在本研究中,GA 的参数配置为:种群数 50,交叉率 0.8,变异概率 0.2。本文的仿真计算均使用搭载 Intel i5-13600KF 3.50 GHz 处理器及 64 GB 内存的计算机完成。

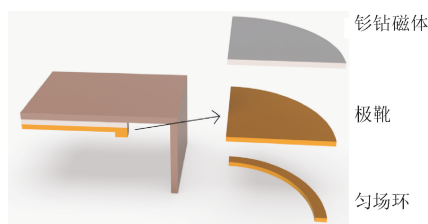


图3 钐钴永磁系统三维 1/8 模型

Fig. 3 3D 1/8 model of the permanent magnet system

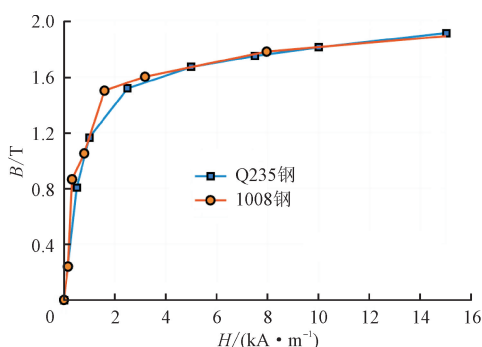


图4 铁磁材料的 $B-H$ 曲线

Fig. 4 $B-H$ curves of ferromagnetic materials

3 单材料磁体优化结果

为对比基于三阶贝塞尔径向参数化几何优化方法(下文简称为贝塞尔优化)与常规基于圆盘磁体模型优化方法,本小节的优化工作分为两步:①使半径参数统一化,即令 $R = R_0 = R_1 = R_2 = R_3$,此时磁体轮廓为标准圆形,通过 1 个统一变量 R 和剩余 3 个

铁磁材料几何变量对永磁系统进行优化,模拟常规优化方法迭代直至结果收敛;②取消统一化半径限定条件,将①的结果作为新初值进行贝塞尔优化,迭代直至结果再次收敛。基于遗传算法-有限元框架的两步优化方法流程如图 5 所示,其中目标函数的收敛判据为 GA 总代数超过 100,且目标函数连续 20 代保持不变。

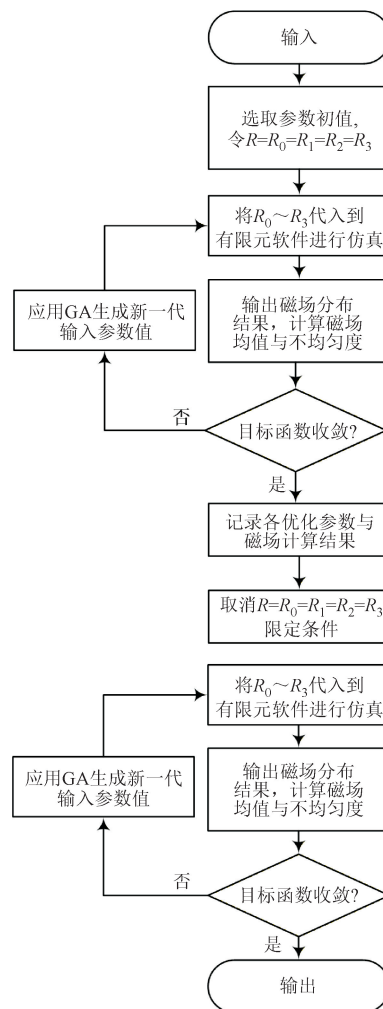
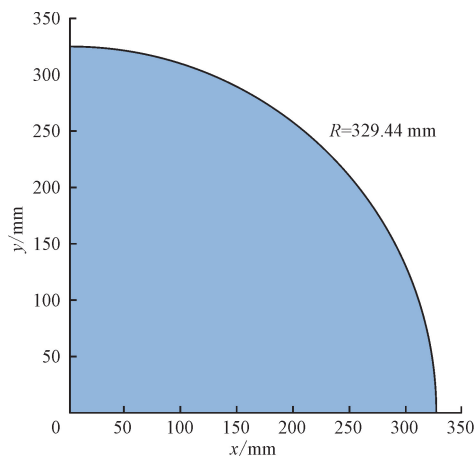


图5 磁体系统优化总流程图

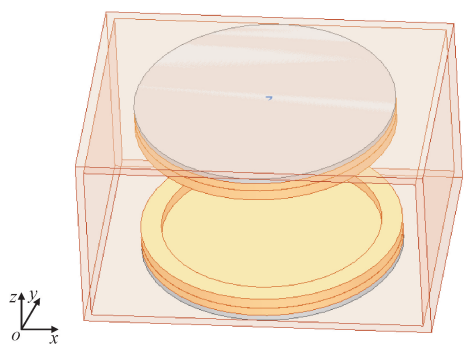
Fig. 5 Flowchart of overall magnet system optimization

由步骤①得到的常规优化结果如图 6 所示,由步骤②得到的贝塞尔优化结果如图 7 所示。在图 6(a)、图 7(a)中, x, y 代表二维坐标轴上磁体的长度(对应图 1 xoy 平面,单位为 mm),图 6(a)中 R 为 1/4 圆的半径,即定值;图 7(a)中 R 为由式(5)计算得到。经过模型参数对比,极靴和匀场环的尺寸差异较小(均在 1 mm 内),而磁体形状的差异更为明显。经过几何计算,常规优化后的磁体平面面积为 0.341 m^2 ,而贝塞尔优化后的磁体平面面积为 0.339 m^2 ,略小

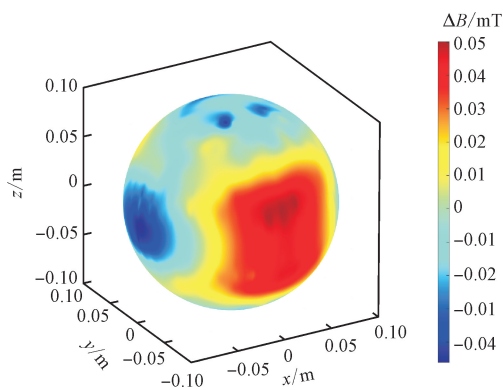
于前者。图 6(c)和图 7(c)计算并展示了 ROI 上磁场强度偏差 ΔB (即磁场实际值与均值之差)在同色标下的分布,图 6(c)中 ΔB 范围为 $45.78 \sim 50.31 \mu\text{T}$,图 7(c)中 ΔB 范围为 $34.19 \sim 41.09 \mu\text{T}$,可以看出,采用贝塞尔优化后磁场强度偏差明显减小。经过仿真数据对比,常规优化后磁场强度 B_0 均值为 59.3 mT ,不均匀度为 1.619×10^{-6} ;贝塞尔优化后磁场强度 B_0 均值为 59.2 mT ,不均匀度进一步降至 1.272×10^{-6} 。



(a) 磁体区域 1/4 平面图



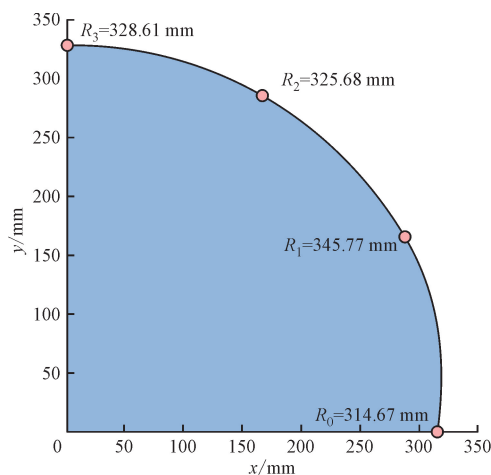
(b) 永磁系统 3D 模型



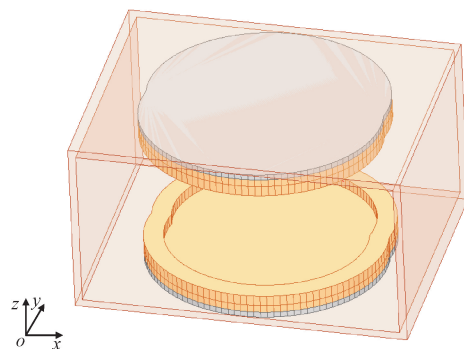
(c) ROI 区域磁场偏差分布

图 6 磁体系统常规方法优化结果

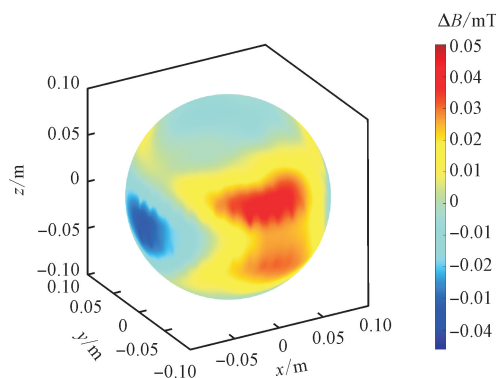
Fig. 6 Optimization results of conventional method for the magnet system



(a) 磁体区域 1/4 平面图



(b) 永磁系统 3D 模型



(c) ROI 区域磁场偏差分布

图 7 磁体系统贝塞尔优化结果

Fig. 7 Optimization results of Bézier-based method for the magnet system

4 双材料磁体优化方法及结果

除钕钴材料外,永磁 MRI 系统还常采用钕铁硼材料构建主磁体^[13]。钕铁硼在局部区域可产生更高场强,且具有显著成本优势,尤其适用于超低场 MRI 的经济型设计。但是,钕铁硼材料温度稳定性、耐腐蚀性较差,且对于传统双极构型难以达到高 B_0 均匀性目标。为协同利用材料比较优势,本文将钕铁硼引入贝塞尔优化范式,构建钕钴-钕铁硼双材

料磁体结构。这一架构的特点有:钕铁硼作为高场强核心,突出中心磁场贡献;钐钴包覆层提供相对温度补偿与防腐蚀屏障。

图8展示了钐钴-钕铁硼双材料磁体优化架构,考虑磁块切割精度、多材料黏接工艺等加工便利性因素,将钕铁硼区域设计为离散化磁块结构,且仅分布于模型中心。所用钕铁硼为N48型,剩磁为1.19 T,矫顽力为923 kA/m,剩磁温度系数为 $-0.12\%/^{\circ}\text{C}$ 。为了确保钕铁硼磁体被钐钴材料完整包裹,本方案设置了空间约束,使钕铁硼磁块布局于中心 5×5 网格区域(以1/4模型计,即图8(a)中橙色区域),网格大小为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$,与磁块单元规格严格对应,从而构建局部拓扑优化问题。该区域的优化变量为 x 轴方向每列磁块数 $[N_1, N_2, N_3, N_4, N_5]$,并且使钕铁硼磁块沿 y 轴方向连续填充,如图8(a)中黄色区域所示。由此,建立了一种整数-贝塞尔复合优化问题,表达式如下

$$\begin{aligned} \min f &= \omega \Gamma_B, \quad \omega = \begin{cases} 1, & |B_{\text{avg}} - B_{0\text{tar}}| \leq 5 \text{ mT} \\ 10, & |B_{\text{avg}} - B_{0\text{tar}}| > 5 \text{ mT} \end{cases} \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{i=1}^5 N_i \geq 5, \quad N_i \in [0, 5] \end{aligned} \quad (9)$$

相较于式(8),式(9)多了5个整数优化变量,共计12个变量参与优化。优化初值仍取第3节R的初值,而各列磁块数初值均取3,其他GA寻优参数保持不变。

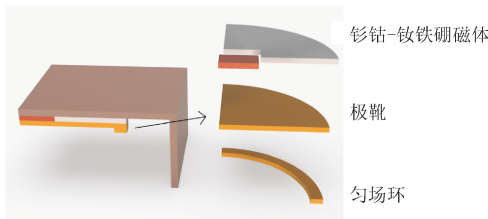
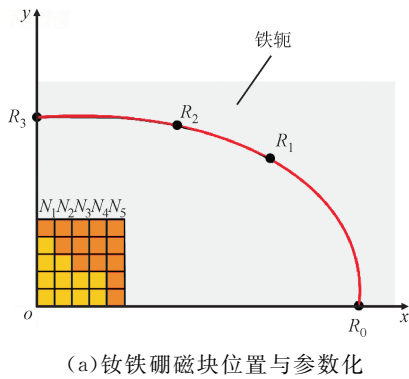


图8 钐钴-钕铁硼双材料优化结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the SmCo-NdFeB dual-material optimization architecture

整数-贝塞尔复合优化结果如图9所示,经过几何计算,复合优化后的磁体平面面积为 0.328 m^2 ,相较传统优化结果进一步减小。与图6(c)、图7(c)相比,图9(c)磁场不均匀度显著降低。优化后磁场强度均值为58.5 mT,不均匀度为 556×10^{-6} 。

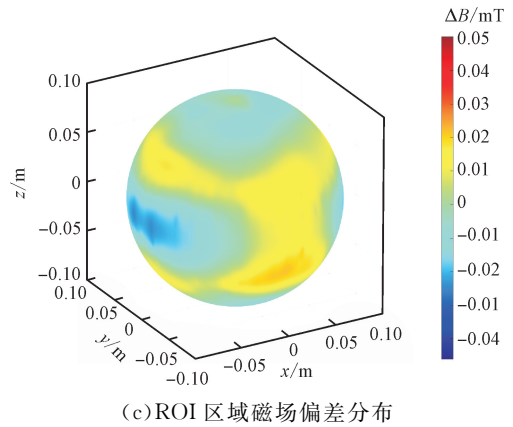
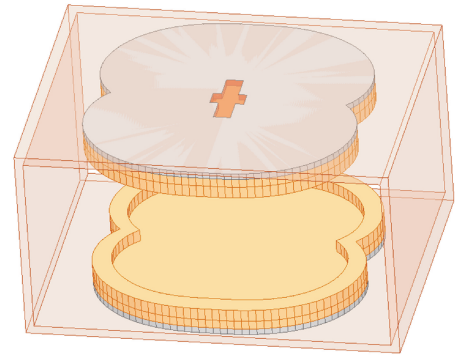
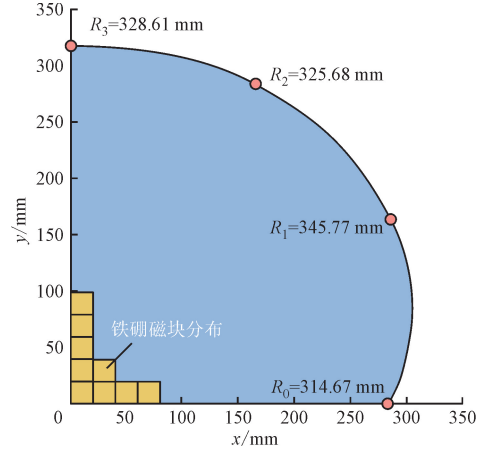


图9 双材料磁体系统的整数-贝塞尔复合优化结果

Fig. 9 Integer-Bézier composite optimization results of the dual-material magnet system

5 讨论

从本文的仿真结果可以看出,基于三阶贝塞尔

径向参数化的几何优化方法显著拓展了双极型永磁体结构的设计自由度,实现在磁体体积较传统圆盘结构缩减 0.6% 的同时将磁场不均匀度降低 21%;这一参数化范式也为双材料磁体优化奠定了几何基础。此外,三阶贝塞尔函数的凸包性避免了锐角结构的出现,最大程度保证了极靴和匀场环装配可行性。

本文提出的钐钴-钕铁硼双材料磁体优化利用两种材料的特性,通过功能互补机制,实现在磁体体积较传统圆盘结构缩减 3.8% 的同时将磁场不均匀度进一步降低约 66%。同时,钕铁硼对钐钴材料的部分替代也显著降低了磁体成本。该整数-贝塞尔优化体系兼具结构优化效率与材料利用率,适用于超低场 MRI 系统的工程化需求。此外,离散磁块与连续轮廓的结合也体现了良好的制造可行性。

在钐钴-钕铁硼双材料系统中,维持热稳定性是保障磁场时间稳定性的核心挑战。由于钕铁硼的热稳定性显著弱于钐钴,过量使用钕铁硼磁块将加剧系统温漂风险。然而,有研究证实,相对纯钕铁硼而言,钐钴和钕铁硼的组合具有更优的剩磁温漂抑制潜力,如钕铁硼中掺入 20%~30% 钐钴可使其在 150 °C 的剩磁温度系数从 $-0.14\%/^{\circ}\text{C}$ 优化至 $-0.09\%/^{\circ}\text{C}$ [29]。Zhou 等提出了一种磁热稳定性 (MTS) 指标体系,将热稳定性评价从定性描述推进至定量设计层面,为双材料配比优化提供了理论工具 [30]。本研究通过严格限制钕铁硼的分布区域以控制温漂,并参考了 Zhou 的温漂评估方法,如图 10 所示。本文取温度范围为 20~45 °C,根据两种材料的温漂特性计算了温度变化下单材料钐钴 (SmCo) 与双材料钐钴-钕铁硼 (SmCo-NdFeB) 结构磁场强度均值 ΔB_0 和不均匀度 Γ_B 的变化特性。经过分析,二者磁场强度均值均随温度的上升呈线性增加,

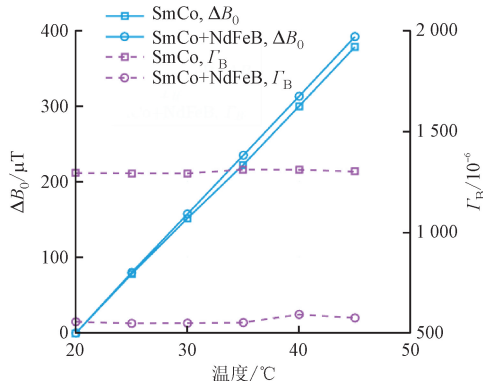


图 10 单材料与双材料磁体系统的温漂特性分析

Fig. 10 Analysis of temperature drift characteristics of single- and dual-material magnet systems

增长率分别为 $253 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 和 $267 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; 磁场不均匀度的波动范围分别为 $1\,289 \times 10^{-6} \sim 1\,308 \times 10^{-6}$ 、 $548 \times 10^{-6} \sim 592 \times 10^{-6}$ 。双材料方案的优化结果相较于单材料方案, ΔB_0 增长率仅高约 5.5%, Γ_B 波动控制在 50×10^{-6} 内, 因此对于工程实际而言, 其引入的优势显著大于劣势。

综上所述, 本文提出的磁体优化范式在多材料协同机制与热稳定性量化调控方面具有持续探索价值, 而探索钐钴-钕铁硼的最优比例则是后续工作的主要方向。

6 结 论

本文提出了一种基于三阶贝塞尔径向参数化的磁体几何范式, 为超低场 MRI 系统的高 B_0 均匀性设计开辟了新路径。通过仿真计算对比, 得到以下结论。

(1) 通过将传统圆盘磁体的单一半径参数拓展为 4 自由度贝塞尔轮廓, 突破了双极型结构的设计瓶颈, 显著提升了磁场均匀性。

(2) 通过采用钐钴-钕铁硼双材料磁体架构, 结合三阶贝塞尔径向参数化优化, 使设计结果 B_0 均匀性得到进一步提升, 且具有轻量化、经济性优势。

本文提出的磁体几何优化范式为超低场 MRI 系统构型设计开辟了新路径, 未来有望与磁热稳定性量化评估方法融合, 推动双材料磁体系统向更高性能、更强鲁棒性的方向演进。

参考文献:

- [1] He Luyang, Yu Hao, Shi Lizheng, et al. Equity assessment of the distribution of CT and MRI scanners in China: a panel data analysis [J]. International Journal for Equity in Health, 2018, 17(1): 157.
- [2] 田洪君, 陈思平, 汪天富, 等. 一种有效的低场磁共振系统的水脂分离成像方法 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(6): 52-56.
Tian Hongjun, Chen Siping, Wang Tianfu, et al. Efficient water fat separation algorithm for low field magnetic resonance imaging system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(6): 52-56.
- [3] Samardzija A, Selvaganesan K, Zhang H Z, et al. Low-field, low-cost, point-of-care magnetic resonance imaging [J]. Annual Review of Biomedical Engineering, 2024, 26: 67-91.
- [4] 万裁, 何为, 沈晟, 等. 超低场磁共振膝关节正交接收线圈设计 [J]. 电工技术学报, 2024, 39(7):

- 1923-1931.
- Wan Cai, He Wei, Shen Sheng, et al. Design of a quadrature receive coil for ultra-low-field knee magnetic resonance imaging [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(7): 1923-1931.
- [5] 张宇翔, 何为, 孔晓涵, 等. 基于硅钢片均一化的超低场磁共振抗涡流 Z 梯度线圈设计方法 [J]. 电工技术学报, 2025, 40(4): 987-996.
- Zhang Yuxiang, He Wei, Kong Xiaohan, et al. A design method for eddy current-resistant Z-gradient coil in ultra-low field magnetic resonance imaging systems based on homogeneous of silicon steel sheets [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(4): 987-996.
- [6] 孟凡钦, 郭轶, 何为, 等. 基于边界元逆问题法的超低场磁共振大鼠脑部成像双通道射频线圈优化设计 [J]. 电工技术学报, 2025, 40(1): 25-35.
- Meng Fanqin, Guo Yi, He Wei, et al. Optimal design of rat brain dual-channel RF coils for ultra-low-field magnetic resonance imaging based on boundary element inverse problem method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(1): 25-35.
- [7] 杨磊, 何为, 贺玉成, 等. 开放式超低场移动磁共振系统的电磁干扰抑制方法 [J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4708-4717.
- Yang Lei, He Wei, He Yucheng, et al. Electromagnetic interference suppression method for an unshielded portable ultra-low field magnetic resonance imaging scanner [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4708-4717.
- [8] Liu Yilong, Leong A T L, Zhao Yujiao, et al. A low-cost and shielding-free ultra-low-field brain MRI scanner [J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 7238.
- [9] 陈顺中, 王秋良, 孙万硕, 等. 3T 动物磁共振成像传导冷却超导磁体研究 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(4): 879-888.
- Chen Shunzhong, Wang Qiuliang, Sun Wanshuo, et al. The study of a 3T conduction-cooled superconducting magnet for animal magnetic resonance imaging [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(4): 879-888.
- [10] Cooley C Z, Haskell M W, Cauley S F, et al. Design of sparse Halbach magnet arrays for portable MRI using a genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(1): 5100112.
- [11] O'reilly T, Teeuwisse W M, Webb A G. Three-dimensional MRI in a homogenous 27 cm diameter bore Halbach array magnet [J]. Journal of Magnetic Resonance, 2019, 307: 106578.
- [12] O'eilly T, Teeuwisse W M, De Gans D, et al. In vivo 3D brain and extremity MRI at 50 mT using a permanent magnet Halbach array [J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2020, 85(1): 495-505.
- [13] Galve F, Pallás E, Guallart-Naval T, et al. Elliptical Halbach magnet and gradient modules for low-field portable magnetic resonance imaging [J]. NMR in Biomedicine, 2024, 37(12): e5258.
- [14] Algarín J M, Díaz-Caballero E, Borreguero J, et al. Simultaneous imaging of hard and soft biological tissues in a low-field dental MRI scanner [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 21470.
- [15] Mazurek M H, Cahn B A, Yuen M M, et al. Portable, bedside, low-field magnetic resonance imaging for evaluation of intracerebral hemorrhage [J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 5119.
- [16] Krupinski E A, Harris D, Arlinghaus L R, et al. Image quality assessment of advanced reconstruction algorithm for point-of-care MRI scanner [J]. Journal of Medical Imaging, 2023, 10(S1): S11913.
- [17] Ljungberg E, Padormo F, Poorman M, et al. Characterization of portable ultra-low Field MRI scanners for multi-center structural neuroimaging [J]. Human Brain Mapping, 2025, 46(8): e70217.
- [18] Zhao Yujiao, Ding Ye, Lau V, et al. Whole-body magnetic resonance imaging at 0.05 Tesla [J]. Science, 2024, 384(6696): eadm7168.
- [19] Su Shi, Zhao Yujiao, Ding Ye, et al. Ultra-low-field-magnetization transfer imaging at 0.055T with low specific absorption rate [J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2024, 92(6): 2420-2432.
- [20] He Yucheng, He Wei, Tan Liang, et al. Use of 2.1 MHz MRI scanner for brain imaging and its preliminary results in stroke [J]. Journal of Magnetic Resonance, 2020, 319: 106829.
- [21] Xuan Liang, Zhang Yuxiang, Wu Jiamin, et al. Geometry-based shim coil design applied on an ultralow-field MRI system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-11.
- [22] 曲洪一, 刘鑫, 王晖, 等. 磁共振成像磁体无源匀场改进策略及实验研究 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(24): 6284-6293.
- Qu Hongyi, Liu Xin, Wang Hui, et al. Improved strategy and experimental research on passive shimming in magnetic resonance imaging magnet [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(24): 6284-6293.

- [23] Wang Ya, Xu Yajie, Wang Feng, et al. A passive shimming method for Halbach magnet based on magnetic sheet arrays [J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 2022, 339: 107210.
- [24] Shang Yun, Lamesgin S G, Kelly G, et al. Advancements in MR hardware systems and magnetic field control: B_0 shimming, RF coils, and gradient techniques for enhancing magnetic resonance imaging and spectroscopy [J]. *Psychoradiology*, 2024, 4: kkae013.
- [25] Miyasaka T, Kajiwaru M, Kawasaki A, et al. Development of a car-mounted mobile MR imaging system for diagnosis of sports-related wrist injury [J]. *Magnetic Resonance in Medical Sciences*, 2023, 22(3): 379-387.
- [26] Wei Shufeng, Wei Zhao, Wang Zheng, et al. Optimization design of a permanent magnet used for a low field (0.2 T) movable MRI system [J]. *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine*, 2023, 36(3): 409-418.
- [27] 朱文亮, 王志鹏. 基于改进 A^* 算法和三阶贝塞尔曲线融合的路径规划分析 [J]. *电子技术*, 2025, 54(3): 56-58.
- Zhu Wenliang, Wang Zhipeng. Analysis of path planning based on improved A^* algorithm and third-order Bézier curve fusion [J]. *Electronic Technology*, 2025, 54(3): 56-58.
- [28] 张宇彤, 牛立群, 荆兆龙, 等. 基于贝塞尔曲线的油浸倒立式电流互感器主绝缘频域介电谱建模 [J]. *高压技术*, 2026, 52(2): 859-867.
- Zhang Yutong, Niu Liqun, Jing Zhaolong, et al. FDS modeling of main insulation in oil-immersed inverted current transformers using Bézier curves [J]. *High Voltage Engineering*, 2026, 52(2): 859-867.
- [29] An Shizhong, Ma Zhenhui, Li Wuhui, et al. Magnetic properties of anisotropic bonded NdFeB/SmCo permanent magnets [J]. *AIP Advances*, 2019, 9(12): 125146.
- [30] Zhou Jiannan, Xiao Xia, Wang Zhenchang, et al. A novel magnetic thermal stability index system for evaluating the temperature effects on magnetic fields in high-homogeneity portable whole-body MRI [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 1-8.

(编辑 武红江)