

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209359

# 基于 Halbach 结构的低场核磁共振主磁体的设计与实现\*

励洪泽<sup>1</sup>, 邬杨波<sup>1</sup>, 孙伟达<sup>2</sup>, 郭智勇<sup>3</sup>, 谢建军<sup>1</sup>

(1. 宁波大学信息科学与工程学院 宁波 315211; 2. 宁波铭瑞中兴电子科技有限公司 宁波 315100;  
3. 宁波大学材料科学与化学工程学院 宁波 315211)

**摘要:** 随着核磁共振不断向便携性和低成本方向发展,核磁共振仪中主磁体的小型化成为了大家关注的重点。为实现核磁共振的小型化,对基于 Halbach 结构的低场核磁共振主磁体进行了设计与实现。首先,利用 ANSYS 有限元仿真软件对采用多磁条特定排列形成的 Halbach 结构进行仿真,对磁条的数量、大小、长度、位置等参数进行调整;其次,根据仿真确定的理想模型参数,实现了主磁体,其为直径 108 mm、高 170 mm 的圆柱体,重 4.5 kg,并对其中心磁感应强度和均匀度进行了检测;最后,根据检测结果,设计了一种匀场片矩阵,采用被动匀场的方式将磁体中心 5 mm 直径球形区域内的均匀度提升至 451.68 ppm,中心磁感应强度为 221.4 mT。设计中,较好的权衡了磁体性能和生产成本。

**关键词:** Halbach 结构;被动匀场;有限元仿真;小型化

**中图分类号:** TH692.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.25

## Design and implementation of low-field NMR main magnet based on Halbach structure

Li Hongze<sup>1</sup>, Wu Yangbo<sup>1</sup>, Sun Weida<sup>2</sup>, Guo Zhiyong<sup>3</sup>, Xie Jianjun<sup>1</sup>

(1. Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;  
2. Ningbo Mingrui Zhongxing Electronic Technology Co., Ltd., Ningbo 315100, China; 3. School of Material Science and Chemical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** As the nuclear magnetic resonance (NMR) continues to develop towards the direction of portability and low cost, the miniaturization of the main magnet in the NMR has become a major concern. To realize the miniaturization of NMR, a low-field NMR main magnet based on Halbach structure is designed and implemented. Firstly, the ANSYS finite element simulation software is used to simulate the Halbach structure formed by the specific arrangement of multiple magnetic stripes to adjust the parameters, such as the number, size, length, and position of the magnetic stripes. Secondly, according to the ideal model parameters determined by the simulation, the main magnet, which is a cylinder of 108 mm diameter and 170 mm height weighing 4.5 kg, is realized and its central magnetic induction strength and uniformity are tested. Finally, based on the test results, a uniform field sheet matrix is designed to improve the uniformity in the 5 mm diameter spherical region at the center of the magnet to 451.68 ppm with a central magnetic induction of 221.4 mT using passive uniformity. In the design, it is a good trade-off between magnet performance and production cost.

**Keywords:** Halbach structure; passive shimming; finite element simulation; miniaturization

## 0 引 言

Purcell 和 Block 两人先后从石蜡样品和水样品中测量出了质子自旋绕磁场的进动效应,并共享了 1952 年的

诺贝尔物理学奖;时隔一年,世界上第一台核磁共振仪被美国 Varian 公司成功研制,激起了人们对核磁共振技术(nuclear magnetic resonance, NMR)探索和研究的熱情<sup>[1-3]</sup>。在 70 多年的发展中,为了追求更高的检测精度、提高信号的信噪比,核磁共振技术不断向强磁场的超导

磁体方向发展<sup>[4-5]</sup>。但是仪器制造和维修成本极高,体积重大等缺点也极为突出<sup>[6]</sup>。因此核磁共振技术的研究开始向低场小型化便携式的趋势发展<sup>[7-10]</sup>。

主磁体是核磁共振检测仪的重要组成部分,用于产生均匀度极高的静磁场,且主磁体占据了整个仪器的绝大部分体积,因此缩小主磁体成为了核磁共振检测仪小型化的关键技术之一。传统的核磁共振主磁体采用电磁铁和超导磁铁的方式,体积大、能耗高。为达到小型化的目标,一般采用钕铁硼(NdFeB)、钐钴(SmCo)等强磁性的永磁体材料,来组成能够产生均匀磁场的磁体结构。Halbach 磁体结构是一种磁化方向按固定规律连续改变的磁阵列结构,虽然结构较为复杂,但是与传统 C 型和回字型永磁体结构相比其体积更小、重量更轻,为核磁共振技术主磁体小型化提供了更好的结构<sup>[11-14]</sup>。然而主磁体的缩小会导致磁体磁感应强度和均匀度的下降,因此在保证或提高均匀度的前提下对磁体进行小型化设计,是便携式核磁共振检测仪开发的难点之一<sup>[15]</sup>。

针对小型化、低成本的低场核磁共振检测仪的需求,设计并实现了一款基于 Halbach 结构的主磁体。首先,应用 ANSYS 磁场仿真软件,对 Halbach 结构的主磁体进行仿真来获取磁体磁感应强度和磁场均匀度;仿真时,通过控制变量的方法调整磁条大小、长度、位置等参数,来研究此类参数对磁感应强度和均匀度的影响。然后,根据确定的参数,实现主磁体,并对磁体的磁感应强度和均匀度进行实际的检测。最后,通过实际检测数据,利用匀场片对磁场均匀度进行补偿。

### 1 Halbach 永磁体结构理论

Halbach 磁阵列是一种由磁化方向不同的永磁体排列组成的磁体结构,能够在—侧汇聚磁力线,在另一侧削弱磁力线,形成两侧非对称的磁场,在减少漏磁的同时又能增大效率,被广泛应用在电机、磁悬浮等领域<sup>[16]</sup>。随着对 Halbach 结构的不断创新和改进,环形的 Halbach 永磁体结构开始被应用于核磁共振技术,与传统的磁结构相比使用磁材料更少。理想的 Halbach 磁阵列如图 1(a)所示,磁化方向是连续变化的,且磁体无限长,但是该理想模型在实际中无法被实现。在永磁体剩磁量为  $B_r$ 、磁环外径为  $R_{outer}$ 、内径为  $R_{inner}$  的环型 Halbach 磁体中,其磁体内部空腔三轴方向上的磁感应强度  $B_y$ 、 $B_x$ 、 $B_z$  可以定义为<sup>[17]</sup>:

$$B_y = B_r \ln \frac{R_{outer}}{R_{inner}}, B_x \cong 0, B_z \cong 0 \quad (1)$$

实际中,采用离散型 Halbach 永磁体结构。典型的 Halbach 结构有磁条横截面为扇形、三角形、正方形、梯形等,如图 1 所示。针对小型化、低成本的低场核磁共振检

测仪的需求,采用横截面为正方形的 Halbach 磁体结构,其永磁体几何尺寸更规则,横截面上的充磁方向统一,生产工艺简单,加工成本更低。

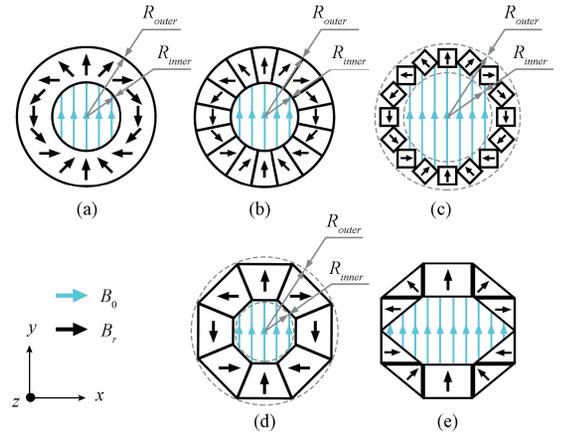


图 1 几种典型的 Halbach 结构示意图

Fig. 1 Schematic of several typical Halbach structures

对截面为正方形的永磁体构成离散型 Halbach 磁结构建立  $x$ - $y$  轴相关坐标系,如图 2 所示。

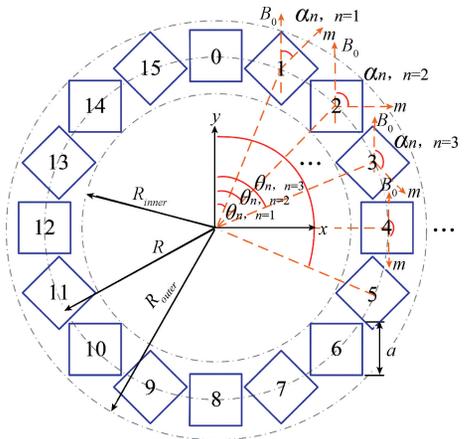


图 2 Halbach 磁结构的 2D 坐标系

Fig. 2 The 2D coordinate system of Halbach structure

图 2 中所包含的参数有磁条个数  $N$ ;正方形横截面的边长  $a$ ;  $m$  为磁矩,磁条的磁矩方向为南极指向北极; $\theta_n$  为第  $n$  个磁条与静磁场  $B_0$  之间的夹角; $\alpha_n$  为磁化方向,是静磁场  $B_0$  和第  $n$  个磁体磁矩  $m$  之间的夹角;磁环的外径  $R_{outer}$ ;磁环的内径  $R_{inner}$ ;磁条中心所在圆的半径  $R$ 。

若该离散型的 Halbach 磁结构由  $N$  块相同的正方形截面的磁条组成。磁体产生的静磁场  $B_0$  的方向指向  $y$  轴的正半轴,设定  $y$  轴正半轴上为第  $n=0$  个磁条,由于结构是离散的,不同位置的磁条的磁化方向不同,在设计中,需根据不同的磁条个数  $N$ ,通过式(2)计算  $\alpha_n$  和  $\theta_n$  来确定每一块磁条放置方向。

$$\begin{cases} \theta_n = 2\pi \frac{n}{n+1}, & n = 0, 1, \dots, N-2, N-1 \\ \alpha_n = \theta_n \times 2, & n = 0, 1, \dots, N-2, N-1 \end{cases} \quad (2)$$

对于磁体空腔内的磁场情况,可以将磁条近似为磁偶极子进行计算<sup>[18]</sup>。

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{3\vec{l}(\vec{m} \times \vec{l})}{l^5} - \frac{\vec{m}}{l^3} \right) \quad (3)$$

如图3所示,为单个磁偶极子在 $p(x, y, z)$ 位置上产生的磁场,根据图2的偶极子个数,将 $p$ 点上的磁场进行矢量叠加,即可得到 Halbach 环形磁体在 $p$ 点上的磁场;

其中 $\mu_0$ 为真空磁导率; $l$ 为 $p$ 点到磁偶极子的距离; $\vec{l}$ 为 $p$ 点到磁偶极子的位置矢量; $m$ 为磁偶极子的磁矩大小; $\vec{m}$ 为的磁偶极子的磁矩矢量。

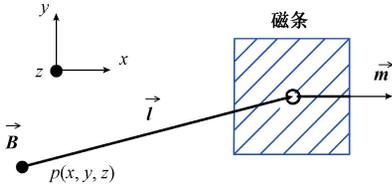


图3 磁偶极子示意图

Fig. 3 Schematic of magnetic dipole

磁场均匀度为衡量磁体品质的重要参数,本文设定的检测区域为磁场中心5 mm直径的球体(diameter sphere volume, DSV),在该区域设置检测点进行磁感应强度的检测,根据检测结果,磁场均匀度 homogeneity 可通过下式计算<sup>[19]</sup>:

$$\begin{cases} B_{\text{average}} = \frac{\sum_i^{num} B_i}{num} \approx \frac{1}{2}(B_{\text{max}} - B_{\text{min}}) \\ \text{homogeneity} = \frac{B_{\text{max}} - B_{\text{min}}}{B_{\text{average}}} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $B_{\text{average}}$ 为检测区域的平均磁感应强度, $B_i$ 为检测点的磁感应强度,num为检测点的数量, $B_{\text{max}}$ 为检测区域的最大磁感应强度, $B_{\text{min}}$ 为检测区域的最小磁感应强度。

## 2 Halbach 永磁体设计

### 2.1 基于有限元仿真的 Halbach 永磁体设计

在 Halbach 磁体的设计中,仅通过式(3)无法准确的解析磁体内部磁场分布情况。采用 ANSYS 有限元仿真软件,通过对磁条个数 $N$ 、磁条横截面的边长 $a$ 、磁条中心所在圆的半径 $R$ 以及磁条的长度 $h$ 进行调整,建立仿真模型,获得磁体内部的磁场分布情况。

在图4的初步仿真结果中可以看出,该结构能够削弱外部磁场,增强磁体内部的磁场,并且产生的内部磁场较为均匀,因此该磁体结构可以应用于低场核磁共振检测仪。

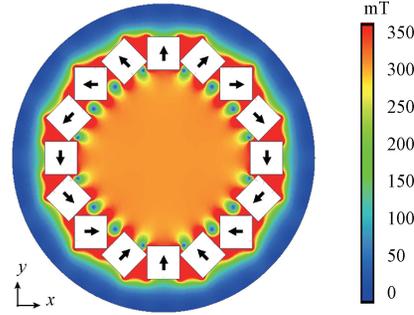


图4 Halbach 磁体的 2D 仿真示意图

Fig. 4 The 2D simulation of the Halbach structure

#### 1) 磁条个数

根据 Halbach 磁体结构,首先考虑磁条数量 $N$ 对磁体的影响,并根据磁条数量 $N$ 来确定其他参数,其关系为:

$$\begin{cases} \Delta\theta = \theta_{n+1} - \theta_n = \frac{2\pi}{N} \\ a_{\text{max}} = 2R \frac{\cos(\Delta\theta) - \sin(\Delta\theta) - \sqrt{2}\sin\left(\frac{\pi}{4} - 2\Delta\theta\right)}{2\cos\left(\frac{\pi}{4} - 2\Delta\theta\right) + \sqrt{2}} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\Delta\theta$ 是相邻磁条间的夹角; $a_{\text{max}}$ 是 $R$ 固定不变时磁条的最大边长;当 $a = a_{\text{max}}$ 相邻磁条的直角和边之间没有间隙。

$N$ 块磁条截面总面积 $A$ ,整个磁环的外半径 $R_{\text{outer}}$ 分别为:

$$\begin{cases} A = Na^2 \\ R_{\text{outer}} = R + \frac{\sqrt{2}}{2}a \\ R_{\text{inner}} = R - \frac{\sqrt{2}}{2}a \end{cases} \quad (6)$$

根据式(5)可以得到磁条的最大截面边长 $a_{\text{max}}$ ,通过式(6)获得对应的截面总面积 $A$ 和外半径 $R_{\text{outer}}$ , $A$ 可以反映出生产中永磁体用料的多少, $R_{\text{outer}}$ 可以反映出磁体的轮廓大小。设 $R = 100$  mm,计算得到不同磁条数量 $N$ 下永磁体用料情况和磁体外径,如表1所示。

在确定磁条数量 $N$ 时,首先考虑 $N$ 增加对体积和重量的减少程度。当 $N$ 由8个增加到16个时, $A$ 减少了60%, $R_{\text{outer}}$ 减少了18.4%;由16个增加24个时, $A$ 减少了38%, $R_{\text{outer}}$ 减少了6.5%,这两个磁条数量,对磁体体积和重量的减少尤为明显。其次考虑到磁条数量增加会增大磁条尺寸公差对磁场均匀度的影响,同时也会增加磁

表 1 磁条数量对磁体参数的影响

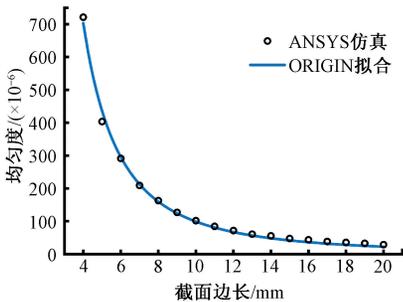
Table 1 The influence of the number of magnetic stripe on its parameters

$N/\text{个}$	$a/\text{mm}$	$R_{\text{outer}}/\text{mm}$	$A/\text{cm}^2$
8	70.71	150.00	400.00
16	31.70	122.42	160.78
24	20.39	114.42	99.75
32	14.99	110.60	71.91
40	11.84	108.37	56.07
48	9.78	106.92	45.89
56	8.32	105.88	38.80
64	7.25	105.13	33.60

体的安装难度和生产成本。综上,确定磁条数量  $N$  为 16。

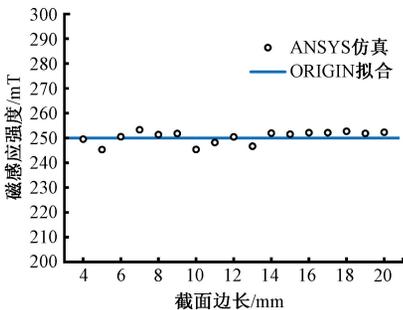
2) 磁条截面边长

根据 Halbach 磁体结构,在磁条数量  $N$  确定的情况下,调整磁条截面边长  $a$ ,探究其对磁体性能的影响。当  $a = a_{\text{max}}$ ,根据式(2)、(5)和(6)推算得到  $\Delta\theta$ 、 $\alpha_n$  和  $R$  等参数来设定模型。仿真时,以  $a = 4 \text{ mm}$  为初始值,1 mm 为步长,逐渐增大磁条截面边长 ( $a = 4 \sim 20 \text{ mm}$ )。通过 2D 仿真获得该参数区间内,磁体的中心磁感应强度和中心区域 5 mm DSV 的均匀度,其结果如图 5 所示。



(a) 磁条截面边长对均匀度的影响

(a) The relationship between the edge length of magnetic stripe and the homogeneity



(b) 磁条截面边长对磁感应强度的影响

(b) The relationship between the edge length of magnetic stripe and magnetic induction

图 5 磁条截面边长对磁体性能的影响

Fig. 5 The relationship between the edge length of the magnetic strip and the performance of the magnet

当截面边长  $a$  增大时,磁场均匀性变好,而中心磁感应强度呈现波动变化,且变化幅度较小。但在小型化的设计中,不仅需要良好的均匀度,还需要考虑磁体的尺寸、重量。

首先,当  $N = 16$  时,根据式(5)、(6),可以得到式(7)截面边长  $a$  和磁环  $R_{\text{outer}}$ 、面积增加量  $\Delta A$  的关系。磁环  $R_{\text{outer}}$  和面积增加量  $\Delta A$  都随着磁条截面边长  $a$  呈线性增长,磁环的体积和重量也随之增加。尤其是体积的增加,每增加 1 mm 的截面边长,磁环外直径将增加约 7.7 mm,直径的增加不利于磁体的小型化。因此在磁场均匀性随截面边长  $a$  的增大而优化趋势变小时,应考虑选用截面边长较小的磁条。

$$\begin{cases} \Delta A = [(a + 1)^2 - a^2] \times 16 = 32a + 16 \\ R_{\text{outer}} = 3.8614a \end{cases} \quad (7)$$

其次,随着磁条体积  $V$  的增大,永磁体磁条的磁矩也随之增大:

$$m = \frac{B_r V}{\mu_0} \quad (8)$$

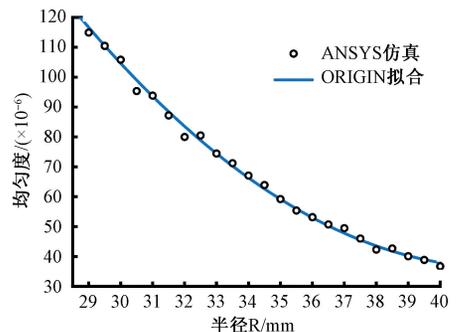
随着磁矩增大,相邻磁条之间的相互作用力会增大,为增加磁条的安装难度和固定支架的强度。

综上,在小型化设计和实验室人工安装的情况下,确定截面边长  $a$  为 9 mm。

3) 磁条中心所在圆的半径

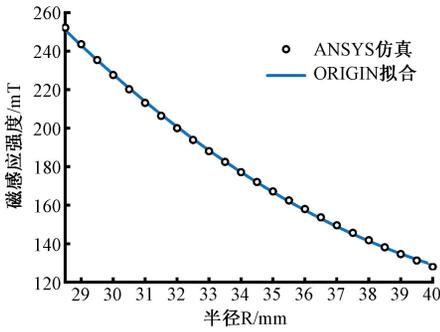
根据 Halbach 磁体结构,在磁条数量  $N$  和磁条截面边长  $a$  确定的情况下,调整磁条中心所在圆的半径  $R$ ,探究其对磁体性能的影响。当  $a_{\text{max}} = 9 \text{ mm}$  时,根据式(5)求得半径  $R = 28.5 \text{ mm}$  为初始值,以 0.5 mm 为步长,逐渐增大此半径 ( $R = 28.5 \sim 40 \text{ mm}$ )。通过 2D 仿真获得该参数区间内,磁体的中心磁感应强度和目标区域的磁场均匀度,其结果如图 6 所示。

当半径  $R$  不断增大,磁场均匀性变好,但中心磁感应强度呈线性的下降趋势,且影响较大,趋势较为明显。中心磁感应强度也是磁体是否优良的重要指标。首先,基于核磁共振原理,磁感应强度  $B_0$  的下降,会导致高低能



(a) 半径对均匀度的影响

(a) The relationship between the radius and the homogeneity



(b) 半径对磁感应强度的影响  
(b) The relationship between the radius and the magnetic induction

图6 磁条中心所在圆的半径对磁体性能的影响  
Fig. 6 The relationship between the radius and the performance of the magnet

态核的能级差  $\Delta E$  下降,对于 $^1\text{H}$ 核在磁场作用下的高低能态核分布服从玻尔兹曼分布定律:

$$\frac{N_{+1/2}}{N_{-1/2}} = e^{\frac{\Delta E}{kT}} = e^{\frac{\gamma h B_0}{2\pi kT}} \quad (9)$$

其中,  $N_{+1/2}$  为低能级核数;  $N_{-1/2}$  为高能级核数;  $\gamma$  为旋磁比, 是一个常数;  $h$  为普朗克常数;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为热力学温度。而 NMR 信号是由其低能态核产生的, 磁感应强度  $B_0$  的下降, 将导致高低能态核比值下降, 低能态核数减少, 从而导致 NMR 信号强度下降, 核磁共振信号的信噪比下降, 使其信号有可能被噪声淹没。虽然  $R$  增大能提升磁场的均匀度, 但对磁体磁感应强度下降的影响更为明显。应优先考虑  $R$  增大对磁感应强度所造成的不利影响。

其次, 在生产制造的过程中, 磁条的固定支架采用 3D 打印技术, 最薄处厚度大于 1 mm, 其打印结果较为理想。两磁条之间的间距为整个固定支架的最薄处如图 7 所示。当  $R=28.5$  mm 时, 两磁体间的间距  $\Delta l \approx 0$ 。  $\Delta l$  和  $R$  之间的关系如下式。根据制作工艺要求, 在  $a=9$  mm 时,  $R$  需要大于 31 mm。

$$\Delta l = R \sin\left(\frac{2\pi}{16}\right) - \frac{1 + \sqrt{2}}{2} a \quad (10)$$

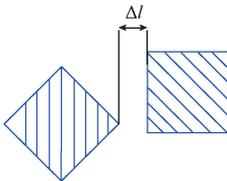


图7 两磁条之间的间距

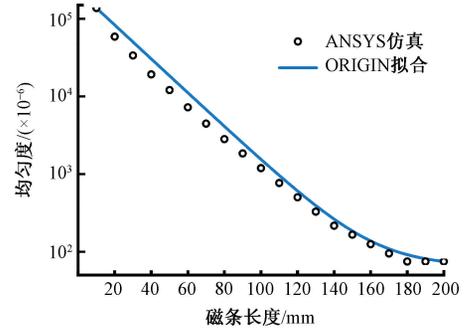
Fig. 7 The space between two magnetic strips

最后, 磁场均匀性可以通过下文描述的匀场方法进行补偿, 而中心磁感应强度在永磁体参数确定后, 难以通过补偿的方法进行提升。

综上, 为获得较大的磁感应强度, 确定半径  $R$  为 32 mm。

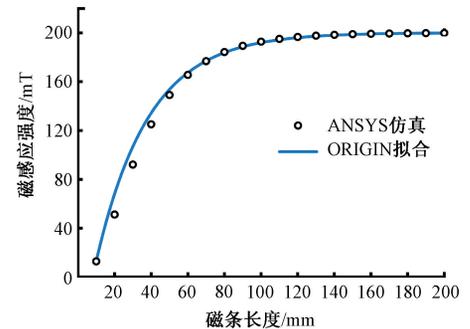
#### 4) 磁条长度

根据 Halbach 磁体结构, 在确定磁条数量  $N$ 、截面边长  $a$  和半径  $R$  情况下, 调整磁条长度  $h$ , 探究其对磁体性能的影响。以  $h=10$  mm 为初始值, 10 mm 为步长, 不断增加磁条长度 ( $h=10 \sim 200$  mm)。获取该参数区间内, 磁体的中心磁感应强度和目标区域的磁场均匀度, 其结果如图 8 所示。



(a) 磁条长度对均匀度的影响

(a) The relationship between magnetic stripe height and the homogeneity



(b) 磁条长度对磁场感应度的影响

(b) The relationship between magnetic stripe height and magnetic induction

图8 磁条长度对磁体性能的影响

Fig. 8 The relationship between magnetic stripe height and the performance of the magnet

可以发现随着磁条长度的增加, 磁感应强度增强, 均匀度变好。其中磁场均匀度和中心磁感应强度分别在 160 和 100 mm 变化趋势开始变的比较平缓。

在确定磁条长度时, 首先需要考虑磁体的尺寸和重量。其次, 是磁条的制造工艺。永磁体本身材料质地较脆。长度过长, 在磁体模型切割的过程容易断裂。因此, 市面上横截面边长小于 10 mm 的磁条, 其长度大多数在 100 mm 以下。但 100 mm 参数下的磁体, 其磁场均匀性

极差。因此需要定制磁条,这会大大增加了成本。所以在设计中,要较好的权衡生产成本和磁体性能。

综上,在权衡生产成本和磁体性能下,确定磁条长度  $h$  为 160 mm。

### 2.2 Halbach 磁体的参数确定与仿真

设计过程中,采用控制变量的方法。通过大量仿真数据分析,获取单个参数对磁体磁场均匀度和磁感应强度的影响。并综合考虑多种因素,在尽可能提高磁体性能的情况下,选择其中较为合适的参数,最终确定的 Halbach 磁体参数如表 2 所示,其模型如图 9 所示。

表 2 Halbach 磁体设计参数

Table 2 Halbach magnetic structure parameters

磁条个数 $N$	截面边长 $a/\text{mm}$	半径 $R/\text{mm}$	磁条长度 $h/\text{mm}$
16	9	32	160

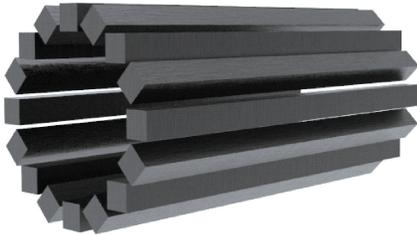


图 9 所设计的 Halbach 磁体模型

Fig. 9 The designed Halbach magnet model

根据所确定的磁体参数,建立 Halbach 磁结构的理想模型并进行 3D 仿真,其 1~10 mm DSV 内的均匀度如图 10 所示。

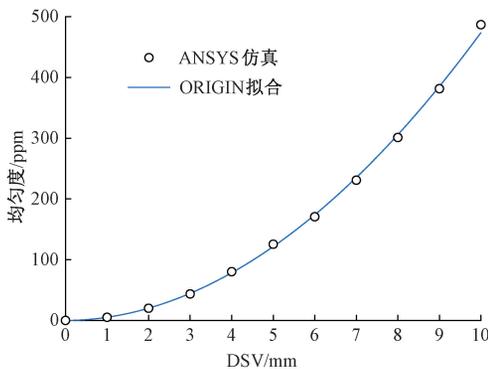


图 10 1~10 mm DSV 内的均匀度

Fig. 10 Homogeneity within 1~10 mm DSV

该磁体中 5 mm DSV 内的磁感应强度分布如图 11 所示,其中心磁感应强度为 199.28 mT,在该模型下磁感应强度分布有较好的对称性,根据式(5)可以计算其均匀度为  $120.43 \times 10^{-6}$ 。

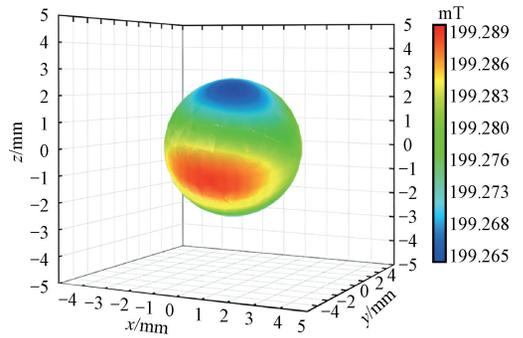


图 11 所设计磁体的仿真结果

Fig. 11 Simulation results of the designed magnet

### 2.3 主磁体的实现

构成主磁体的磁条采用宁波宁港永磁材料有限公司生产的 9 mm×9 mm×160 mm 大小、Sm2co17 材料的磁条。与剩磁量更高的 NdFeB 材料相比,Sm2co17 有更好的温度特性,能够减少温度对均匀度的影响。但是 Sm2co17 材料本身材质比较脆,切割的磁条长度无法到达 160 mm,因此将四段 9 mm×9 mm×40 mm 的磁条用特定的胶水固定在一起,使长度达到 160 mm,再完成充磁,磁条剩磁量  $B_r = 1.110 \text{ T}$ 。

因为磁条的磁性,相邻磁条间存在很强的相互作用力,因此需要特定外框架进行固定,同时控制每一根磁条的磁化方向。设计的外壳由固定支架、铁质外壳和螺丝构成,整体设计如图 12 所示。磁条的固定支架借助了东莞市科恒手板模型有限公司的高精度 3D 打印技术,其材料为尼龙,外观为直径 98 mm、高度 170 mm 的黑色圆柱体,中间留有一个直径 36 mm、上下开口的空腔,空腔周围有 16 个 160 mm 深的磁条插槽,用于固定磁条。并加上了镀锌铁材质的圆筒,来达到屏蔽地磁场的作用。固定支架和铁质外壳之间用螺丝固定。



图 12 Halbach 磁体的外框架设计

Fig. 12 Outer frame of Halbach magnet

由于磁条之间较强的吸引力和排斥力,控制不当可能导致磁体间的碰撞,导致磁条损坏。该固定支架,可以将磁条完全嵌入在固定支撑架中,安装过程中能够较好的保护磁条。安装时,每个位置按照磁化方向插入磁条

即可,简单方便。最终实物如图13所示,为直径108 mm、高度170 mm的圆柱体,重量为4.5 kg。

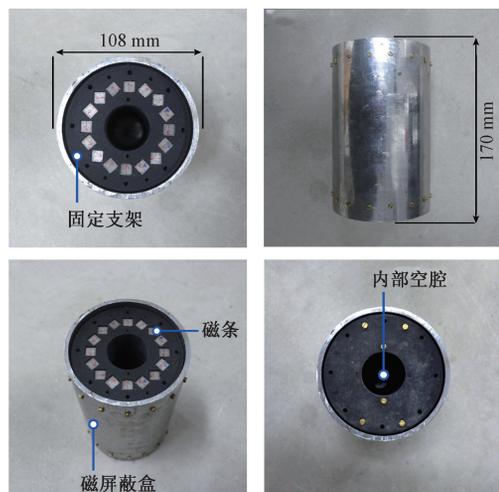


图13 Halbach磁体的实物图

Fig. 13 The pictures of Halbach magnet

### 3 实际测试与结果分析

通过16根 $9\text{ mm}\times 9\text{ mm}\times 160\text{ mm}$ 的磁条组成的Halbach磁结构,获得了主磁场 $B_0$ 。由于磁条参数本身存在难以避免的公差和安装时的误差,将导致磁场的实际均匀性和仿真结果存在较大的差距。因此还需要对磁体实际产生的磁感应强度和均匀性进行检测。

#### 3.1 主磁体磁感应强度和均匀性的检测

测量磁场均匀度的方法如图14所示,采用光学平台、步进为 $0.01\text{ mm}$ 的三轴微动平台、检测精度 $0.5\%$ 的高斯计(EMIC, GM-4002)和铁架台来完成对磁场的检测。检测在光学平台上进行,可以避免放置平台抖动对检测的影响。将磁体置于三轴微动平台上方,高斯计的探头伸入磁体内部空腔,对磁感应强度进行检测。通过旋转三轴微动平台的控制杆来上下左右前后的调控磁体位置,从而控制探头检测磁体内部空腔不同位置的磁感应强度。

在 $5\text{ mm}$ 的球形区域中设置了57个检测点,如图15所示。通过调控三轴微动平台,完成检测点上磁感应强度的测量,获得所有检测点的数据后通过式(4)求得均匀度。

最终检测得本磁体的中心磁感应强度为 $221.1\text{ mT}$ ,与仿真结果 $199.28\text{ mT}$ 存在 $11\%$ 的偏差;检测到中心 $5\text{ mm}$ 直径球体内的磁场均匀度为 $3\ 181.82\times 10^{-6}$ ,与仿真结果的 $120.43\times 10^{-6}$ 存在 $26.4$ 倍的偏差。因此有必要探究公差对均匀度的影响。

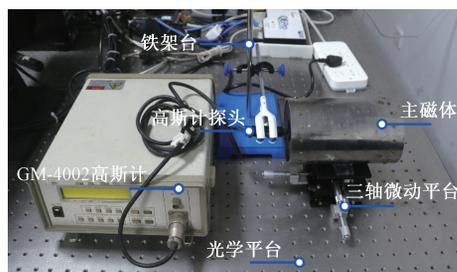


图14 Halbach磁体的均匀度检测

Fig. 14 Homogeneity detection of Halbach magnet

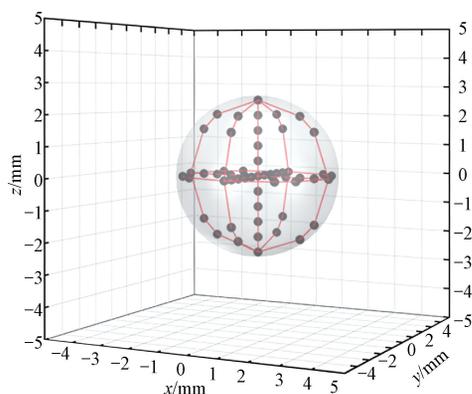


图15 检测点示意图

Fig. 15 Schematic of detection points

#### 3.2 公差对均匀度的影响

与实际检测存在极大偏差,其原因1)拼接成主磁体的每块磁条的性能不可能完全一致,如磁条表面磁场的分布;2)磁条的生产时,其尺寸存在不可避免的公差;3)固定支架制造时,也存在公差。由于磁体表面磁场的分布情况难以检测且在仿真中难以设置,因此主要探究磁体尺寸公差和固定支架公差对磁体均匀度的影响。

首先,探究磁条的边长公差和长度公差对磁体性能的影响,因此对每个磁条的尺寸进行了测量,磁条实际尺寸如表3所示,通过下表参数构建误差模型。

仅根据长度公差建立模型,进行仿真,其 $5\text{ mm}$ 的DSV内磁场分布如图16(a)所示,其中心磁感应强度为 $198.28\text{ mT}$ ,均匀度为 $120.43\text{ ppm}$ ;仅根据边长的公差建立模型,进行仿真,其 $5\text{ mm}$ 的DSV内磁场分布如图16(b)所示,其中心磁感应强度为 $198.09\text{ mT}$ ,均匀度为 $504.90\text{ ppm}$ 。

在上述模型的基础上,根据边长和长度的公差建立模型,其结果如图17所示,其中心磁感应强度为 $198.09\text{ mT}$ ,均匀度为 $504.90\text{ ppm}$ ,中心磁场分布失去的对称性。通过这3个模型可以看出,就磁条的尺寸而言,其对均匀性的影响主要来源于磁条边长的公差。

表 3 16 根磁条的实际几何尺寸

Table 3 Actual geometrical size of 16 magnetic strips

编号	边长 1/mm	边长 2/mm	长度/mm
0	9.02	9.02	159.98
1	8.99	8.95	159.96
2	8.96	8.97	159.98
3	8.95	8.96	159.97
4	8.97	9.00	159.98
5	8.93	8.95	159.96
6	8.95	8.93	159.98
7	8.99	8.97	159.99
8	9.02	9.01	159.97
9	9.03	9.02	159.96
10	8.93	9.03	159.96
11	8.95	9.00	159.98
12	8.99	8.97	159.99
13	8.95	8.96	159.97
14	8.97	9.00	159.98
15	8.93	8.95	159.96

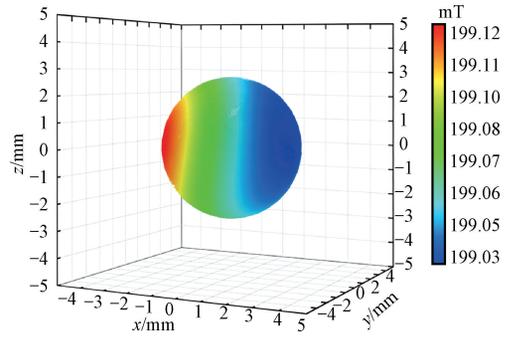


图 17 实际磁条尺寸模型下的仿真结果

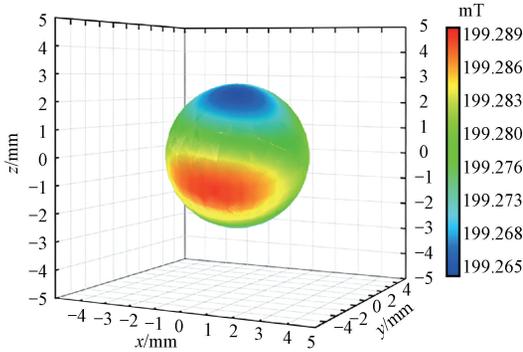
Fig. 17 Simulation results of the actual size model

其次,探究固定支架的公差。固定支架虽采用高精度的 3D 打印技术,对于小物件的打印仍存在 $\pm 0.1$  mm 的公差,这会使磁条中心所在圆的半径  $R$  出现偏差。由于固定支架形状并不规则,公差难以测量,因此需要对此公差进行合理的设定。拟定公差如表 4 所示。

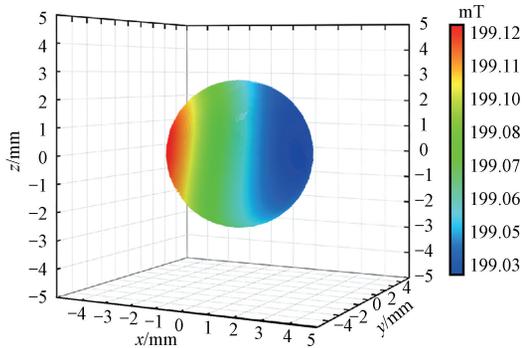
表 4 半径  $R$  的拟定误差

Table 4 Hypothetical error of  $R$

编号	公差/mm	编号	公差/mm	编号	公差/mm
0	+0.1	6	-0.1	12	+0.1
1	-0.1	7	-0.1	13	-0.1
2	-0.1	8	0	14	+0.1
3	0	9	-0.1	15	-0.1
4	-0.1	10	+0.1		
5	+0.1	11	-0.1		



(a) 边长公差模型下的仿真结果  
(a) Simulation results of the edge length error model



(b) 长度公差模型下的仿真结果  
(b) Simulation results of height error model

图 16 磁条单个公差影响下的仿真结果

Fig. 16 Simulation results of an error from the magnetic strips

根据拟定  $R$  的公差建立模型,进行仿真,其 5 mm 的 DSV 内磁场分布如图 18 所示,其中心磁感应强度为 199.84 mT,均匀度为  $1\ 046.77 \times 10^{-6}$ 。可见  $R$  的公差对均匀度的影响是极大的。

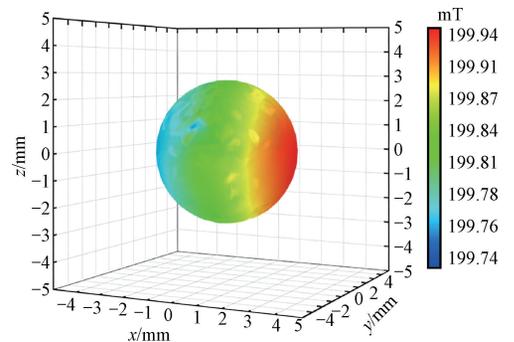


图 18 拟定  $R$  公差下的仿真结果

Fig. 18 Simulation results of hypothetical error  $R$

最后,结合固定支架的公差和磁条的边长公差、长度公差建立最终的误差模型。其5 mm的DSV内磁场分布如图19所示,其中心磁感应强度为199.01 mT,均匀度为 $1.492.42 \times 10^{-6}$ 。

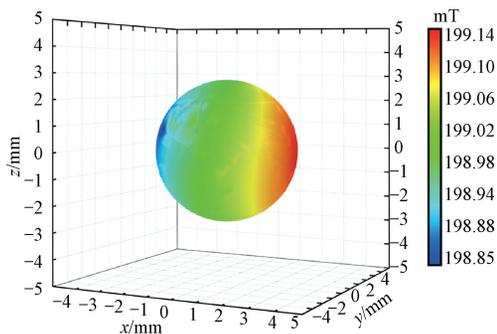


图19 综合误差模型下的仿真结果

Fig. 19 Simulation results of the comprehensive error model

综上,探究尺寸公差对均匀度影响的仿真中,发现磁体参数中,磁条正方形截面边长 $a$ 和磁条中心所在圆的半径 $R$ 的公差,对磁体的均匀度有极大的影响。但在实际生产制造中有无法避免此类公差,导致实际磁场的均匀性和仿真结果相差极大。因此需要对实际的磁场进行均匀度的补偿。

### 3.3 均匀度补偿方法

随着技术的发展,许多用于提高磁场均匀度的匀场方法已经被提出<sup>[20-22]</sup>。在匀场方式上,可分为有源匀场和无源匀场。有源匀场是在线圈中通以电流,从而产生小磁场,置于磁体中来改善主磁场的均匀性;无源匀场是在磁体内加入小型磁体或者填充铁磁材料,来增强或削弱某些区域的磁感应强度,从而改善磁场的均匀性。由于有源匀场需要外接恒流源,增加磁体的体积和复杂性。

采用无源匀场的方法。补偿方式基于磁场的叠加原理,即某点产生的磁场等于周围所有物体产生磁场的矢量和:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 \dots \quad (11)$$

采用NdFeB小磁体作为匀场片。根据上文的实际检测,磁场的误差 $\Delta B$ 为0.7 mT,补偿区域的直径为5 mm,在该范围内叠加的磁感应强度应小于0.7 mT。根据设计的匀场片矩阵,小磁体里中心点的距离为17.2 mm。综上,需要选择在距离14.7~19.7 mm处产生小于0.7 mT的小磁体。

因此,对不同尺寸的小磁体所产生的磁场进行了仿真,选用了直径为2.5 mm、厚度为2 mm的圆柱形NdFeB小磁体,其能够在17.2 mm处产生0.30 mT的磁感应强度,磁场分布情况如图20所示。

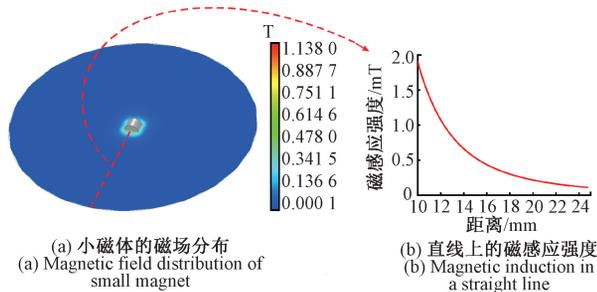


图20 小磁体的磁场分布情况

Fig. 20 Magnetic field distribution of small magnet

对于口径有限的小型磁体,匀场片难以准确放置在磁体内部的指定位置。根据本磁体中直径36 mm的空腔口径,设计了一种安装、拆卸方便的集成圆筒状小匀场片矩阵,如图21所示。该结构由两个圆筒组成,其中,内圆筒外径34.4 mm、内径30 mm、高度170 mm,上分布有用于放置匀场片的垫片槽,共41层,相邻两层交叉排布,尽可能布满圆柱表面,每层24个,共984个垫片槽,用于放置直径2.5 mm,厚度2 mm的小磁体;外圆筒外径36 mm、内径34.4 mm、高度170 mm,用于固定内侧圆筒上的匀场片;该结构同样采用高精度的3D打印技术生成。

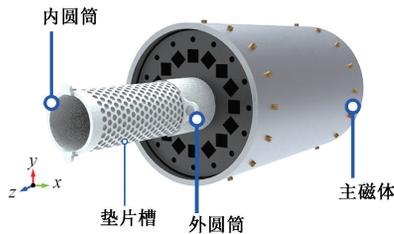


图21 放置匀场片矩阵的圆筒

Fig. 21 Cylinder of shimming matrix

该方法,需不断检测磁场情况,来确定下一个匀场片的位置。在匀场过程中,发现 $z$ 轴方向上的磁场分布比较均匀,从上述的误差模型磁场仿真结果中也可以反映这情况。因此在对 $x$ - $y$ 轴的磁场进行补偿时,匀场片的位置在 $z$ 轴上,尽可能上下对称放置。同时,也主要针对 $x$ - $y$ 轴上的磁场来进行匀场。检测到某点的磁感应强度低于其他位置时,在其最近的匀场片槽中放置小磁体,小磁体的磁矩顺着主磁场 $B_0$ 方向,则增大该点的磁感应强度;反之。若对该点补偿不足,则在其周围增加小磁体;若补偿过大,则需要增大该点和小磁体的距离,此时可以使小磁体的 $x$ - $y$ 轴位置不变,上下调整 $z$ 轴位置来增大点和小磁体的距离。

经过反复调整小磁体的位置,最终放置结果如图22所示。因为多数匀场片用于增强磁场,中心磁感应强度提升至221.4 mT,均匀度由未放置匀场片前的 $3.181.82 \times$

$10^{-6}$  提升至  $451.68 \times 10^{-6}$ 。若采用更小尺寸的磁体作为匀场片并增加矩阵中匀场的数量,对均匀度的提升能起到更好的作用。

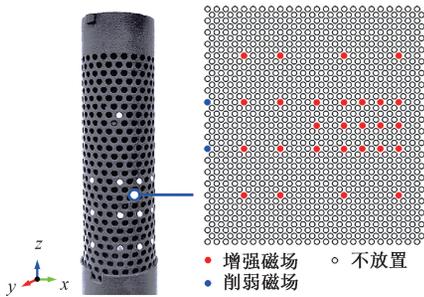


图 22 匀场片矩阵平面展开图

Fig. 22 The plane expansion of shimming matrix

## 4 结 论

在本工作中,采用 ANSYS 有限元仿真软件模拟了离散型的 Halbach 磁结构,探索了多种参数对 Halbach 磁体均匀度和磁感应强度的影响。在仿真数据和实际生产能力的综合考虑下,确定了磁条的数量、截面边长、长度以及位置参数。确定参数后,采用 16 根  $9 \text{ mm} \times 9 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$  大小的  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  磁条和高精度的 3D 打印技术制作的支架,实现了与理想模型参数匹配的 Halbach 磁体,其外观为直径 108 mm,高 170 mm 的圆柱体,磁体重量为 4.5 kg,易于安装,便于手持,且制造成本较低。通过实际检测后,采用 NdFeB 小磁体产生的小磁场,组合成匀场片矩阵对实际磁体的均匀度进行补偿。最终,本设计磁体中心磁感应强度为 221.4 mT,均匀度为 451.68 ppm,对核磁共振主磁体的小型化研究具有现实意义。

## 参考文献

[ 1 ] 张云. 核磁共振技术的历史及应用[J]. 科技信息, 2010(15):116-118.  
ZHANG Y. History and application of nuclear magnetic resonance technology [J]. Scientific and Technological Information, 2010(15):116-118.

[ 2 ] 张丽君. 磁共振技术的进展[J]. 河北师范大学学报, 2000(2):224-227.  
ZHANG L J. Progress of nuclear magnetic resonance technology [J]. Journal of Hebei Normal University, 2000(2):224-227.

[ 3 ] 林君,张洋. 地面磁共振探水技术的研究现状与展望[J]. 仪器仪表学报, 2016,37(12):2657-2670.  
LIN J, ZHANG Y. Research status and expectation of surface nuclear magnetic resonance technique for

groundwater detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(12):2657-2670.

[ 4 ] WADA H, KIYOSHI T. Development of 1 GHz class NMR magnets [J]. Applied Superconductivity IEEE Transactions on, 2002, 12(1):715-717.

[ 5 ] 白质明,杨海亮,吴春俐. 核磁共振超导磁体的设计[J]. 仪器仪表学报, 2006(S3):2525-2526.  
BAI ZH M, YANG H L, WU CH L. Design on the superconducting magnet of NMR [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006(S3):2525-2526.

[ 6 ] PURCHASE A R, LOGI V, KEITH W, et al. A short and light, sparse dipolar halbach magnet for MRI [J]. IEEE Access, 2021, 9: 95294-95303.

[ 7 ] TAYLER M C D, SAKELLARIOU D. Low-cost, pseudo-Halbach dipole magnets for NMR [J]. Journal of Magnetic Resonance, 2017, 277:143-148.

[ 8 ] 王秋良,杨文辉,倪志鹏,等. 核磁共振成像技术研究进展[J]. 高科技与产业化, 2013, 9(12):42-45.  
WANG L Q, WANG W B, NI ZH P, et al. Research progress of nuclear magnetic resonance imaging [J]. High-Technology and Industrialization, 2013, 9(12):42-45.

[ 9 ] SARRACANIE M, SALAMEH N. Low-field MRI: How low can we go? A fresh view on an old debate [J]. Frontiers in Physics, 2020, 8.

[ 10 ] SAHO N, MATSUDA K, NISHIJIMA N. Palm-size miniature superconducting bulk magnet [J]. Cryogenics, 2012, 52(11):604-608.

[ 11 ] CHANG W H, CHEN J H, HWANG L P. Single-sided mobile NMR with a Halbach magnet [J]. Magnetic Resonance Imaging, 2006, 24(8):1095-1102.

[ 12 ] MERIBOUT M, SONOWAN S. Optimal halbach magnet array design for portable nmr targeting multiphase flow metering applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(1):1-7.

[ 13 ] KARAKOSTA E, DIAMANTOPOULOS G, KATSIOTIS M S, et al. In situ monitoring of cement gel growth dynamics. use of a miniaturized permanent halbach magnet for precise 1 H NMR studies [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 49(2):613.

[ 14 ] ANFEROVA S, ANFEROV V, ARNOLD J, et al. Improved Halbach sensor for NMR scanning of drill cores [J]. Magnetic Resonance Imaging, 2007, 25(4):474-480.

[ 15 ] 孙新凯. 小型化核磁共振仪主磁体结构设计及仿真分析[D]. 北京:中国地质大学, 2017.  
SUN X K. Structure design and simulation analysis of main magnet of miniaturized nuclear magnetic resonance

instrument [ D ]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.

- [ 16 ] TEWARI S, O'REILLY T, WEBB A. Improving the field homogeneity of fixed-and variable-diameter discrete Halbach magnet arrays for MRI via optimization of the angular magnetization distribution [ J ]. Journal of Magnetic Resonance, 2021, 324(1):106923.
- [ 17 ] ERGOR M, OLAMAT A, DOGAN N, et al. Nested halbach arrays of rectangular, cylindrical, and polygonal magnets optimize the field-free line in magnetic particle imaging[ J ]. IEEE Magnetics Letters, 2021, 12:1-5.
- [ 18 ] 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. DOI:10.1016/j.jmr.2019.106578.
- [ 19 ] CHEN Q, ZHANG G, XU Y, et al. Design and simulation of a multilayer Halbach magnet for NMR[ J ]. Concepts in Magnetic Resonance Part B: Magnetic Resonance Engineering, 2015, 45(3):134-141.
- [ 20 ] PARKER A J, ZIA W, REHORN C, et al. Shimming Halbach magnets utilizing genetic algorithms to profit from material imperfections [ J ]. Journal of Magnetic Resonance, 2016:83-89.
- [ 21 ] LEE S, HAHN S, SIM K. A ferromagnetic shimming method for NMR/MRI magnets adopting two consecutive optimization techniques: linear programming and evolution strategy [ J ]. Journal of Superconductivity & Novel Magnetism, 2011, 24(1-2):1037-1043.
- [ 22 ] WENZEL K, ALHAMWEY H, O'REILLY T, et al. B0-shimming methodology for affordable and compact low-field magnetic resonance imaging magnets[ J ]. Frontiers in Physics, 2021:411.

## 作者简介



**励洪泽**, 2020 年于浙大宁波理工学院获得学士学位, 现为宁波大学硕士研究生, 主要研究方向传感器设计及应用。

E-mail: lih-z-1998@qq.com

**Li Hongze** received his B. Sc. degree from Ningbo Tech University in 2020. He is currently a master student at Ningbo University. His main research interests include sensor design and application.



**邬杨波**, 2016 年于宁波大学获得博士学位, 现为宁波大学信息科学与工程学院副教授, 主要研究方向为微弱信号检测和处理以及嵌入式系统设计。

E-mail: wuyangbo@nbu.edu.cn

**Wu Yangbo** received his Ph. D. degree from Ningbo University in 2016. He is currently an associate professor in the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science at Ningbo University. His main research interests include weak signal detection and processing and embedded system design.



**谢建军** (通信作者), 1996 年于宁波大学获得学士学位, 现为宁波大学信息科学与工程学院工程师, 主要研究方向为传感器信号处理和模拟电路设计。

E-mail: xiejianjun@nbu.edu.cn

**Xie Jianjun** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Ningbo University in 1996. He is currently an engineer in the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science at Ningbo University. His main research interests focus on sensor signal processing and analog circuit design.