0254-6124/2023/43(5)-0963-10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LI Zhihong, WANG Jingdong, LÜ Shang, WAN Renxin. Simulation of Large-scale Magnetic Shielding Room for High-precision Vector Magnetometer Ground Test and Calibration System (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(5): 963–972. DOI:10.11728/cjss2023.05.2022–0067

高精度矢量磁力仪地面测试定标系统大型磁屏蔽室仿真分析*

李志宏 王劲东 吕 尚 万任新

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 利用有限元分析方法开展大型磁屏蔽室的仿真分析，完成了高精度矢量磁力仪地面定标用大型磁屏蔽室的建模和性能仿真计算，从屏蔽效能、开口影响及内部磁场均匀度等方面对磁屏蔽室仿真计算和实测结果进行对比。结果表明，磁屏蔽空间内部中心区域的剩磁实测数值与仿真结果一致性较好，剩磁分布趋势基本一致，证明有限元分析方法在磁屏蔽室屏蔽性能定量分析的可行性。通过有限元分析方法，能够实现磁屏蔽室开口剩磁影响的定量计算，为磁屏蔽室门及通风孔设计提供依据；同时可以对内部磁场均匀区大小、残余梯度进行验证，有效避免工程实施后发现性能不满足设计要求的风险，有利于保障大空间磁屏蔽室的性能和建造效率。

关键词 矢量磁力仪，地面定标，磁屏蔽室，仿真计算

中图分类号 V524

Simulation of Large-scale Magnetic Shielding Room for High-precision Vector Magnetometer Ground Test and Calibration System

LI Zhihong WANG Jingdong LÜ Shang WAN Renxin

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract In this paper, the simulation analysis of a large-scale magnetic shielding room is carried out by using the finite element analysis method, and the modeling and performance simulation calculation of a large-scale magnetic shielding room for ground calibration of a high-precision vector magnetometer are completed, and the simulation calculation and measured results of the magnetic shielding room are com-

* 国家重点研发计划项目资助（2020YFE0202100）

2022-11-13 收到原稿，2023-06-20 收到修定稿

E-mail：lizhihong@nssc.ac.cn；wjd@nssc.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

pared and analyzed from the aspects of shielding effectiveness, opening influence, internal magnetic field uniformity and other aspects. The results show that the measured value of the remnant magnetism in the central area of the magnetic shielding space is in good agreement with the simulated results, and the remnant magnetism distribution trend is basically the same, which proves the feasibility of the finite element analysis method in the quantitative analysis of the shielding performance of the magnetic shielding room. The finite element analysis method can realize the quantitative calculation of the remnant magnetic influence of the shielding room opening, which provides a basis for the design of shielding room doors and ventilation holes, At the same time, the size of the uniform area of the internal magnetic field and the residual gradient can be verified, which effectively avoids the risk of finding the performance does not meet the requirements after the implementation of the project. Aiming at the design and research of large-space magnetic shielding room, the method based on finite element and ANSYS Maxwell software simulation adopted in this paper is conducive to guarantee the performance and construction efficiency of the large-space magnetic shielding room.

Key words Vector magnetometer, Ground calibration, Magnetic shielding room, Simulation

0 引言

磁场是宇宙中极其重要和普遍的一种场[1]，而空间磁场探测是诸多国内外空间探测任务的重要内容之一，其探测器上所搭载的磁场探测载荷需要同时满足高分辨率、高精度的空间磁场探测需求。中国目前也有多款高精度磁场探测载荷（例如张衡一号高精度磁强计，风云三号和风云四号卫星磁强计等）搭载于航天探测器上，对空间磁场开展高分辨率、高精度的测量。为满足高精度空间磁场探测需求，在探测器发射前需开展一系列的磁探测载荷地面磁场定标试验，例如磁场传感器的零偏、温度校正和正交性等参数确认，而这些定标试验通常需要利用实验室中多层磁屏蔽装置和校准线圈等中大型装置设施[2]，将试验环境中的环境磁场降低到一个非常微弱的程度，以避免环境磁场干扰。随着工业化进程的加快和生活圈的不断扩大，自然环境中的磁场干扰越来越强，背景磁场扰动以及外部磁场强度的不均匀性（磁场梯度变化）都会严重影响线圈内部区域磁场的均匀性[3]，从而严重影响磁场定标试验的准确性。通过人工磁屏蔽可较好地解决此类问题，例如德国 PTB 七层结构的 BMSR-2 方形磁屏蔽室，日本四层结构形如足球的 COSMOS 异型磁屏蔽室，以及中国国家地震局与钢铁研究总院联合研制的 6 T 磁屏蔽室等[4]，均采用了磁屏蔽筒或磁屏蔽室来隔离外界磁场，以获取稳定的微弱磁场条件[5]。但是在以往营造磁屏蔽空间设施中，通常依赖以往的工程经验来开展屏蔽室的设计，缺乏开展定量化分析的手段。

本文利用有限元分析软件对磁屏蔽装置的性能进行了仿真计算，开展了大型磁屏蔽室的建模和仿真分析工作，并对比分析了仿真结果和磁屏蔽室的实测剩磁分布情况与趋势，为磁屏蔽室的设计和分析提供了技术支撑。

1 磁屏蔽原理与装置

1.1 原理

为抵消静磁场对既定区域实现磁屏蔽，通常采用高磁导率材料包围该区域，所用材料会形成低磁阻通路使外部磁场优先通过[6]。磁屏蔽效率取决于多种因素，其中最重要的是磁屏蔽层材料的磁导率及其随着流过的磁通量密度的变化、屏蔽材料的层数及每层厚度、屏蔽材料的剩磁和屏蔽材料包围该区域的严密程度。磁屏蔽基本原理如图 1 所示，高磁导率的材料制成的磁屏蔽结构与磁屏蔽层内部所包围的空气可以看成是并联磁路或磁旁路，由于磁屏蔽层材料的磁导率比空气磁导率大数千倍，因此磁屏蔽空间内部的磁阻远大于屏蔽层本身，外部磁场的感应磁通量总体上沿高导磁材料形成的磁屏结构通过，极大地降低了进入磁屏蔽空间内部的磁通量，由此被高导磁材料屏蔽的内腔基本无外磁场进入，从而达到磁屏蔽目的[7]。

通过部分简化假设，并结合磁屏蔽层材料的磁导

率、几何常数和剩磁等参数, 可得到部分简单(球形和圆筒形)磁屏蔽装置的屏蔽系数[5]。通常一个单层球形壳假设半径为 r, 屏蔽壳材料厚度为 t, 球形壳 $t \ll r$, 如果$\mu_r t \gg 1$, 其单层磁屏蔽系数为

$$S \approx \frac{2}{3} \times \frac{\mu_r t}{r}. \tag{1}$$

其中, μ_r 为材料的相对磁导率, 一般取值为 10^4~10^6。

多层屏蔽系数的普适表达式如下:

$$S_m = S_1 S_2 \left[1 - \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^3\right] S_3 \left[1 - \left(\frac{l_3}{l_2}\right)^3\right] \cdots S_n \left[1 - \left(\frac{l_n}{l_{n-1}}\right)^3\right]. \tag{2}$$

其中, S_m 为多层磁屏蔽系数, S_n 为第 n 层的磁屏蔽系数, l_n 为第 n 屏蔽层的半径。

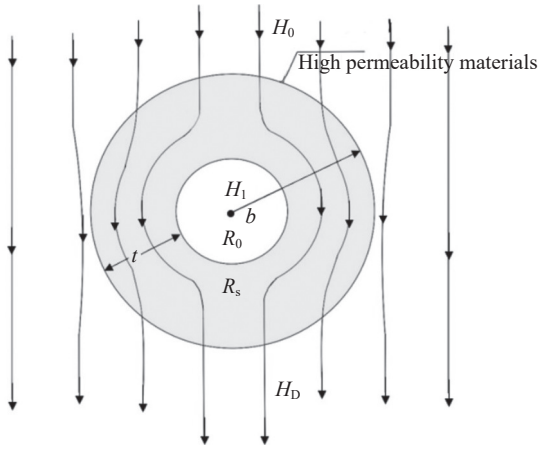


图 1 磁屏蔽条件下的磁旁路

Fig. 1 Magnetic bypass on the condition of magnetic shielding

由于在工程实现方面立方形屏蔽更容易实现, 因此确定立方形磁屏蔽系数尤为重要, 立方形磁屏蔽空间与同尺寸球形磁屏蔽空间的磁屏蔽系数接近。设 $2l$ 为立方体边长, 较合理的是替代某个 r 值使这一立方体和球体具有相同的体积, 即 $8l^3 = 4\pi r^3/3$或 r=1.24l。因此由式(1), 一个边长为 $2l$ 的单层立方体, 如果$\mu_r t \gg 1$, 其屏蔽系数为

$$S \approx \frac{2}{3} \times \frac{\mu_r t}{1.24l} \approx 0.54 \frac{\mu_r t}{l}. \tag{3}$$

由于式(3)中仅含有相除的项, 球形磁屏蔽的多层表达式(2)也可用于立方形磁屏蔽。由式(1)~(3)可知, 磁屏蔽层越厚, 磁屏蔽层数越多, 相应的磁屏蔽系数越高。综合考虑技术可行性和经济性, 大型磁屏蔽室通常采用多层磁屏蔽(每层的屏蔽层控制在一定厚度)结构以实现更好的磁屏蔽效果[8]。

1.2 装置

近零磁场环境在许多前沿科学领域都具有重要应用[9], 尤其在空间物理研究方面, 利用零磁环境建立高精度微弱磁场标准, 保证空间磁探测受航天器自身磁性干扰较小, 从而有效开展高精度空间磁场、动态等离子等的探测[10,11]。目前国内外已针对各类应用需求研制建造了高性能近零磁环境装置[10,12,13]。本文较详细地分析了此类装置现状(见表 1)。

2 建模与仿真

为满足某航天型号任务需求而设计研制的大空

表 1 主要大型磁屏蔽室情况对比

Table 1 Comparison of major large space magnetic shielding rooms

序号	名称	屏蔽材料及构成	结构尺寸
1	美国伊利诺大学零磁屏蔽室MSR	1 层 4.8 mm 的铝和 2 层 1.5 mm 的坡莫合金共同构成	内部空间为 2.23 m×2.23 m× 2.23 m
2	美国麻省理工大学零磁屏蔽室	由 2 层纯铝和 3 层高磁导率材料薄板构成	26 面类球体, 最内层直径 2.5 m, 最外层直径 4 m
3	韩国标准计量与科学研究院零磁室	—	内部尺寸: 2 m×2 m×2.5 m
4	德国国家物理技术研究院 PTB 零磁屏蔽室(BMSR-2)	由 1 层射频屏蔽、1 层铝和 7 层坡莫合金以及主动补偿线圈共同构成	内部尺寸: 2.9 m×2.9 m×2.9 m 建筑尺寸: 15 m×15 m×15 m
5	哈佛大学联合生物医学中心MSR	共 3 层, 每层均由高导磁和高电导材料构成	内部尺寸: 4.0 m ×3.0 m×2.4 m 外部尺寸: 5.3 m ×4.3 m×4.1 m
6	日本超导实验室COSMOS	由1层铝和4层高导磁材料共同构成	外形似足球, 内层直径约 4 m, 外层直径约 6.1 m
7	中国地震局与钢铁研究院联合建造的零磁空间实验室	采用高导磁率的坡莫合金构成	外形为类球体, 内部直径约2 m

间屏蔽室内部有效空间尺寸约为 14 m(长)×10 m(宽)×10 m(高),磁屏蔽材料选用高导磁率硅钢片,外层 40 层,内层 30 层。磁屏蔽门采用电磁屏蔽门,屏蔽室开口尺寸:1.8 m(宽)× 2.0 m(高),门下端距离磁屏蔽底部 2.8 m,门开口朝向东。根据磁屏蔽原理并结合部分工程经验,对磁屏蔽室设计开展建模仿真能较好的降低工程实施风险,本文使用 ANSYS Maxwell 软件进行磁场有限元计算分析。

2.1 模型情况

根据设计输入条件,并兼顾精度和合理性,仿真计算的求解器设置为静磁场模式,边界条件为默认边界条件,即尼曼边界条件,磁场方向与表面正切,无磁通穿过。

仿真计算中采用 Inside Selection 方法对求解域和激励源进行网格划分,如图 2 所示,求解域网格长度为 200000 mm,网格数量为 82056 个,激励源网格长度为 1500 mm,网格数量为 3116 个。

2.2 外界磁场及仿真要素等输入条件

北京地区平静期磁场水平强度 B_h 约为 29620 nT,垂直强度 B_v 约为 46180 nT,磁倾角为 57°19′,地磁场水平分量方向与磁屏蔽室短边平行,与屏蔽室长边方向(东西向)垂直。其他仿真输入条件如下。

(1)材料:硅钢片。

(2)多层等效磁导率:4.4×10^4。

(3)内屏蔽层厚度:9 mm(多层层叠)。

(4)外屏蔽层厚度:12 mm(多层层叠)。

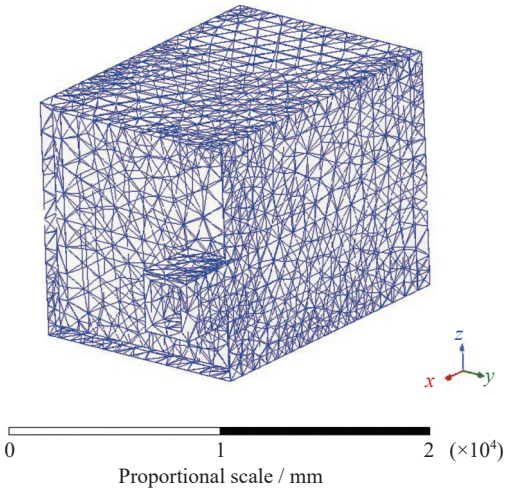


图 2 磁屏蔽室仿真网格设定

Fig. 2 Grid setting for magnetic shielding room

3 仿真结果及与实测情况比较

3.1 仿真结果

利用仿真软件计算磁屏蔽空间内部尤其是中心区域对于外磁场的屏蔽衰减效果,其剩磁各分量强度以及分布情况如图 3 和图 4 所示。由图 3(a)(b)可知,磁屏蔽室内部中心区域的磁场强度衰减到约百纳特量级,剩磁场方向在沿着地磁场的方向呈规律性变化,最终与地磁场方向一致,并沿中间剖面对称,剩磁场的最小值位于磁屏蔽室体的中心区域。如图 3(c)(d)所示,磁屏蔽室剖面中心区域磁场经屏蔽后,剩磁强度衰减至 150 nT 以下(仿真图纵坐标单位为μT),方向和地磁场方向保持一致,磁场梯度的对称性和地磁场与屏蔽体结构夹角有一定相关性,磁场的最小值位于磁屏蔽室体的中心区域,呈对称分布排列。

基于数值仿真结果,重点开展了磁屏蔽室中心工作区(2 m×2 m×2 m)内的剩磁强度及梯度分布分析。磁屏蔽室中心工作区域如图 4 所示,为便于分析,在磁屏蔽室内垂直于 x 轴(地理东西向)的中心平面上设定了九个剩磁取样点(m_1～m_9),其中 m_5 位于磁屏蔽室工作区中心点位置,其余 8 个点则在其周围均匀分布,构成一个边长为 2 m 的正方形。在此中心平面 ±1 m 高度的对应位置处另外设置 18 个剩磁取样点,用于评估剩磁的空间分布。

图 5 为磁屏蔽室内沿 x 轴向(东西向)分布的三个垂直截面内的剩磁强度分布,表 2～4 给出了对应图 5(a)(b)(c) 的剩磁强度仿真数值。从图 5 和表 2～4 可以看出,屏蔽室工作区域内磁场较为均匀,剩磁沿空间分布一致性好,剩磁最小的区域基本位于磁屏蔽室中心区域处,并呈现前后一致性分布。

由于磁屏蔽室的开孔及接缝位置处的磁屏蔽材料不连续会对磁场屏蔽效能产生影响,使屏蔽效能低于理论计算值。为了确保建成后的磁屏蔽室各项指标满足使用要求,对磁屏蔽室的开口(尤其是大门处)进行了局部剩余磁场强度分析(见图 6)。

磁屏蔽室大门开口尺寸约为 2 m×2 m,为了降低开口的影响,采用了门廊式设计,通过一定长度的偏置门廊降低此开口处的漏磁影响。由图 6 所示的仿真结果可以看出,在开口处存在较为明显的漏磁情况,在开口附近依旧存在较强的磁场梯度,但是未对屏蔽室内部中心区域产生明显影响。门廊内部的剩

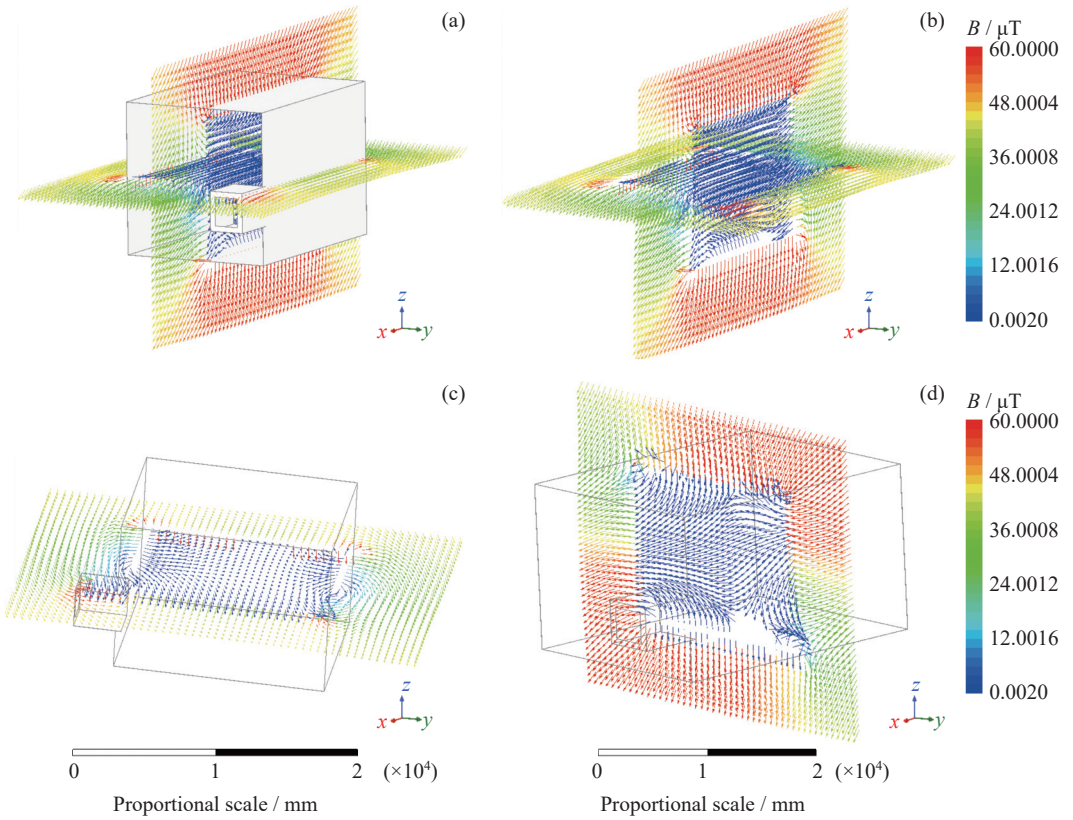


图 3　磁屏蔽室磁场分布 (箭头方向表示外部地磁场方向，颜色代表强度数值)。（a）磁屏蔽室外磁场分布，（b）屏蔽室内部及外部磁场分布（屏蔽室隐藏显示），(c）屏蔽室垂直于 z 轴的平面磁场分布, (d）屏蔽室垂直于 x 轴的平面磁场分布

Fig. 3　Magnetic shielding room magnetic field distribution (The direction of the arrow indicates the direction of the external geomagnetic field, and the color represents the intensity value). (a) Distribution of external magnetic field of the magnetic shielding room. (b) Distribution of both external and internal magnetic field of the magnetic shielding room (shielding room hidden display). (c) Magnetic field distribution in the plane of the shielded room perpendicular to the z-axis. (d) Magnetic field distribution in the plane of the shielded room perpendicular to the x-axis

磁强度与屏蔽室内部剩磁强度大小基本相同，证明通过门廊式设计，能够有效降低进门处的漏磁影响。在磁屏蔽室工作区(2 m×2 m×2 m)内，剩磁强度小于 100 nT，选取的 27 个仿真点磁场强度在 60～100 nT 之间，剩余磁场方向与地磁场方向大致相同，但仍会受到磁屏蔽室结构影响，使得部分剩余磁场趋向于磁屏蔽室结构布局。工作区内磁场总体均匀性较好，剩余磁场以结构体中间剖面为对称并沿地磁场方向有一定的磁场梯度，仿真结果和实际磁场分布趋势基本吻合，基本符合以往较小磁屏蔽空间的实际情况。

3.2　实际测试结果与仿真情况比对

测试所用的大型磁屏蔽室建于中国科学院国家空间科学中心怀柔园区内，磁屏蔽室建成后，在磁屏蔽室内选取了数百个点进行剩磁测试，测试仪器设备主要包括磁通门磁传感器 Mag-03 MSL100、B&K 动态信号分析仪、无磁测试支架、激光测距仪等。对应仿真分析中屏蔽室中心工作区域的 27 个测试点，实测剩磁数据与仿真数值及对比结果列于表 5。

图 7 为屏蔽室内均匀区剩余磁场仿真数值分布，图 8 为屏蔽室工作区域内剩磁场强度实测数据分布，图 9 为仿真分析结果与实测点磁场强度差异情况，图 10 为大空间磁屏蔽室内部实物。

图 9 给出了仿真分析结果与实测磁场强度之间的差异。根据图 9，对比实测结果与仿真数值发现，屏

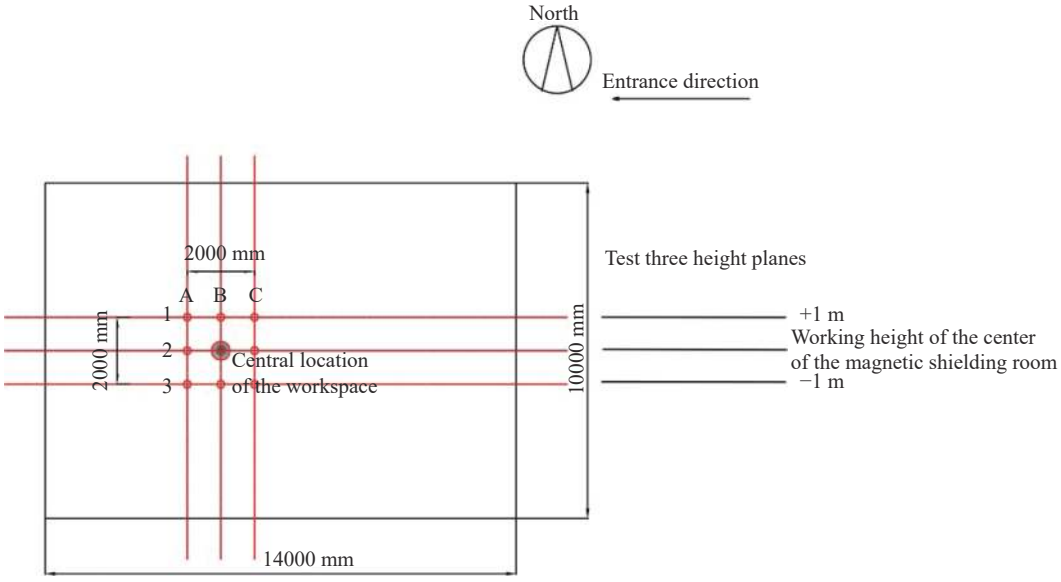


图 4 磁屏蔽室工作区 (2 m×2 m×2 m) 剩余磁场测试点分布

Fig. 4 Distribution of test points from residual magnetic field in the working area (2 m×2 m×2 m) of the magnetic shielding room

蔽室工作区内的剩磁分布相似,均存在一定的水平磁场梯度及垂直磁场梯度,在不同的测点位置上剩磁大小均在 60~180 nT 之间,剩磁实测结果略大于仿真分析结果,平均偏差约为 64.08 nT,最大偏差为 107.76 nT,两者的差值从南到北,从下到上呈逐渐递增趋势,其中从南到北的偏差较大。

对磁屏蔽室剩磁实测结果和仿真数值之间的偏差进行了分析,产生偏差的主要因素如下。

(1)仿真输入参数。仿真参数设置较为理想,例如边界条件为默认边界条件,默认磁场连续穿过表面,磁场方向与表面正切,无磁通穿过等,这与较为复杂的实际工程情况存在一定差异。仿真计算中屏蔽材料参数设定为各向同性的均匀材质,而实际工程使用的屏蔽材料为多层薄板层叠压接方式,材料规格、均匀性等方面与仿真计算状态存在一定差异,造成退磁因子与仿真状态有偏差,从而影响两者结果的一致性。

(2)仿真模型结构偏差。磁屏蔽室结构较为复杂,包括内部屏蔽层、外部屏蔽层及中间层,实际工程施工时使用的屏蔽材料为片状压接方式。在仿真计算时采用了整体建模方式,未设置分层结构,且模型网格划分的数量及形状、密度受计算能力限制,也会影响仿真结果,使实测数值与仿真数值出现一定差异。

(3)磁屏蔽材料特性差别。在仿真计算中,磁屏蔽材料的磁导率设置为硅钢片材料的理想磁导率状态。但实际上,磁屏蔽材料的取向受加工工艺等方面的影响,并非各向同性,而且磁屏蔽层采用了多片拼接方式,其真实磁导率与材料本身的磁导率存在一定差异,从而造成两者结果有偏差。

(4)环境磁场差异。由于磁屏蔽室位于建筑物内部,因此磁屏蔽室所处的磁场环境与仿真设置的无扰动地磁场存在较大的差异。在建筑内部存在较大磁场梯度的情况下,必然会对屏蔽室内部磁场的均匀性产生影响,这也是造成两者结果存在偏差的重要因素。

4 结论

以往构建大型磁屏蔽空间通常比较依靠工程经验,量化分析相对较少。针对此类问题,开展了大空间磁屏蔽室仿真分析计算,基于有限元分析的方法和 ANSYS Maxwell 仿真软件,完成了磁屏蔽室建模和系统仿真,并与实测结果进行了数据对比,结果表明,磁屏蔽空间内部中心区域(边长为 2 m 的立方体区域)的剩磁实测数值与仿真数值的量级和分布趋势基本一致,实测剩磁值与仿真结果之间平均偏差约为 64.08 nT,最大偏差为 107.76 nT。测试结果证实了

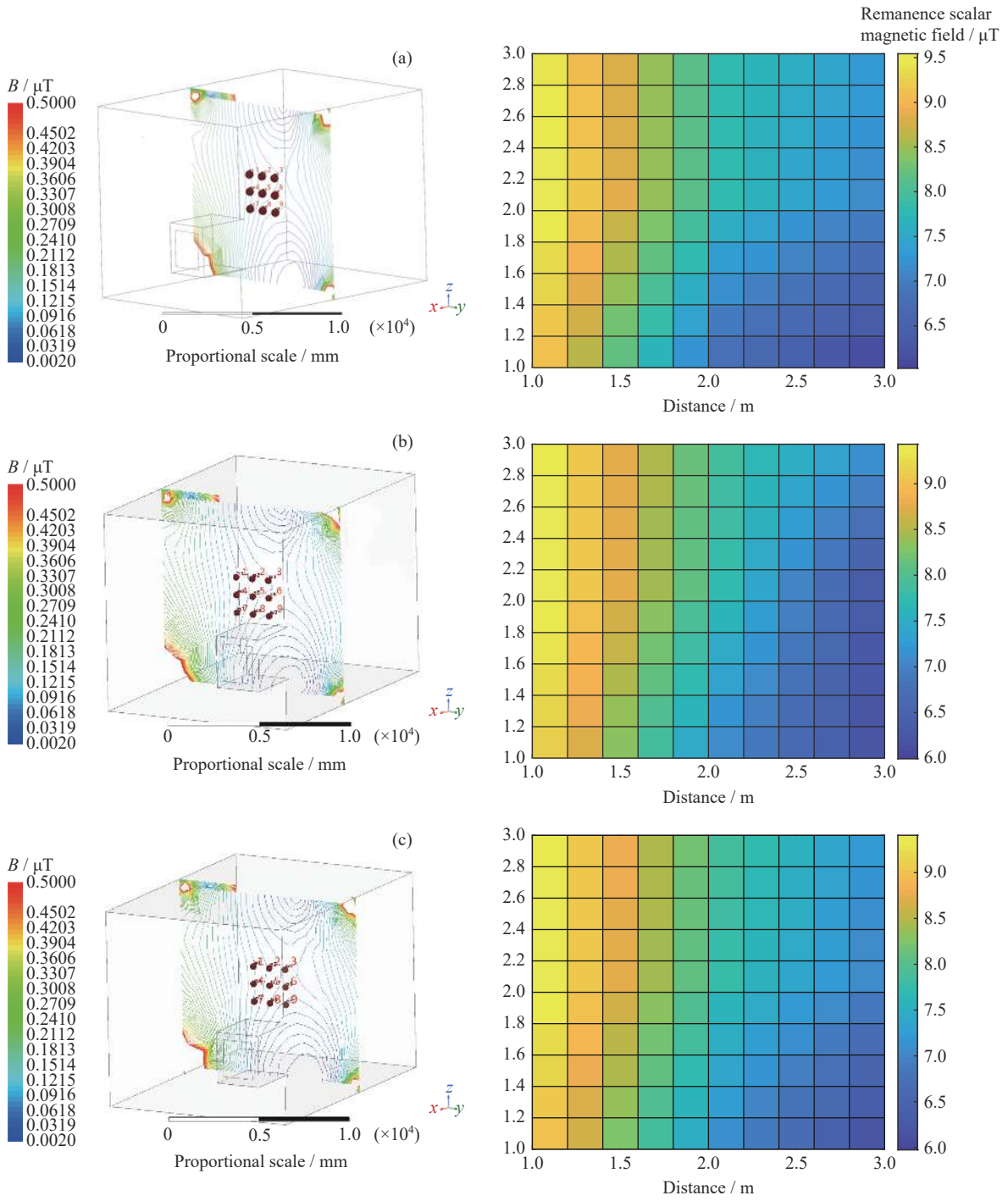


图 5　屏蔽室内部 x 轴向三段截面剩余磁场仿真数值分布

Fig. 5　Simulation of the residual magnetic field distribution of the x axis three-section inside the shielding room

利用有限元分析方法开展磁屏蔽室屏蔽性能的定量研究方法具备可行性，能够对磁屏蔽室开口剩磁影响进行定量化计算，为磁屏蔽室门、通风孔设计提供了依据；仿真对内部均匀区大小、形状进行验证，避免工程实施后发现均匀区不满足要求的风险。针对大空间磁屏蔽室的设计和研究，本文提出的这种基于有限元和 ANSYS Maxwell 软件仿真的方式，有利于提高大空间磁屏蔽室的性能和建造效率。建成后的磁屏

表 2 对应图 5(a)剩磁强度仿真数值

Table 2 Simulation value of residual magnetic field in Figure 5(a)

Name	x	y	z	B ($\times10^{-2}$) /μT
m_1	0.000	–1000.000	1000.000	9.378
m_2	0.000	0.000	1000.000	7.847
m_3	0.000	1000.000	1000.000	7.266
m_4	0.000	–1000.000	0.000	9.543
m_5	0.000	0.000	0.000	7.794
m_6	0.000	1000.000	0.000	7.004
m_7	0.000	–1000.000	–1000.000	9.107
m_8	0.000	000.000	–1000.000	6.806
m_9	0.000	1000.000	–1000.000	6.027

注 B 为剩余磁场标量仿真值。

表 3 对应图 5(b)剩磁强度仿真数值

Table 3 Simulation value of residual magnetic field in Figure 5(b)

Name	x	y	z	B ($\times10^{-2}$) /μT
m_1	1000.000	–1000.000	1000.000	9.356
m_2	1000.000	0.000	1000.000	7.916
m_3	1000.000	1000.000	1000.000	7.247
m_4	1000.000	–1000.000	0.000	9.431
m_5	1000.000	0.000	0.000	7.766
m_6	1000.000	1000.000	0.000	6.911
m_7	1000.000	–1000.000	–1000.000	9.120
m_8	1000.000	000.000	–1000.000	7.087
m_9	1000.000	1000.000	–1000.000	5.997

注 B 为剩余磁场标量仿真值。

表 4 对应图 5(c)剩磁强度仿真数值

Table 4 Simulation value of residual magnetic field in Figure 5(c)

Name	x	y	z	B ($\times10^{-2}$) /μT
m_1	–1000.000	–1000.000	1000.000	9.338
m_2	–1000.000	0.000	1000.000	7.930
m_3	–1000.000	1000.000	1000.000	7.087
m_4	–1000.000	–1000.000	0.000	9.407
m_5	–1000.000	0.000	0.000	7.758
m_6	–1000.000	1000.000	0.000	6.871
m_7	–1000.000	–1000.000	–1000.000	8.986
m_8	–1000.000	000.000	–1000.000	7.140
m_9	–1000.000	1000.000	–1000.000	5.975

注 B 为剩余磁场标量仿真值。

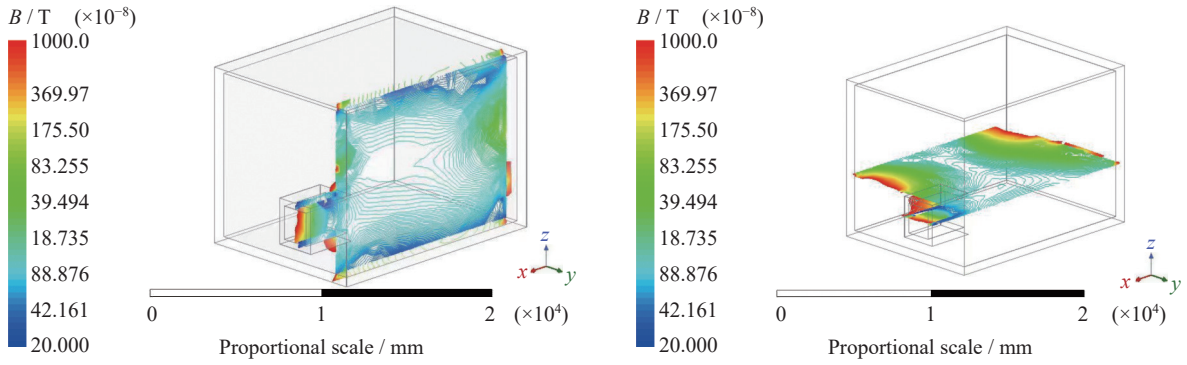


图 6 磁屏蔽室开口处剩余磁场强度分布

Fig. 6 Distribution of residual magnetic field intensity at the opening of the magnetic shielding room

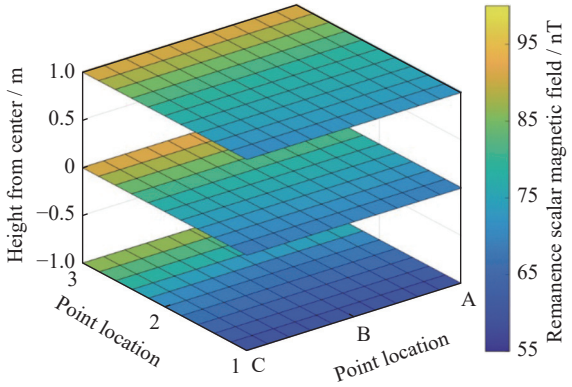


图 7 磁屏蔽室剩余磁场标量仿真数值分布

Fig. 7 Numerical distribution diagram of scalar simulation of residual magnetic field in magnetic shielding room

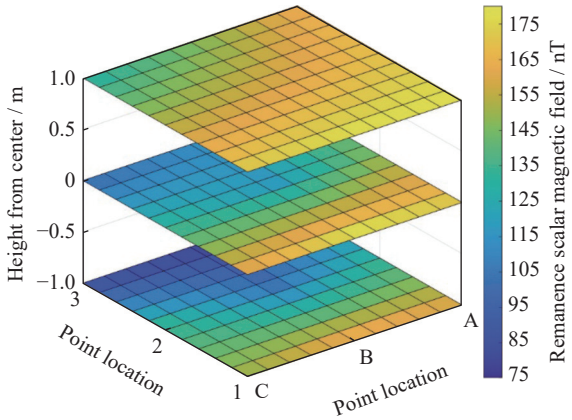


图 8 磁屏蔽室剩余磁场标量实测数值分布

Fig. 8 Distribution of measured value of scalar residual magnetic field in magnetic shielding room

表 5 磁屏蔽室剩余磁场标量强度仿真数值与实际测试数值情况及对比(单位 nT)

Table 5 Comparison of simulation and measured data of residual magnetic field scalar intensity in magnetic shielding room (Unit nT)

高度	测试点序号及状态	1			2			3		
		仿真	实测	差值	仿真	实测	差值	仿真	实测	差值
屏蔽室工作中心高度	A	68.71	160.8	92.09	77.58	129.0	51.42	94.07	98.1	4.03
	B	70.04	177.8	107.76	77.94	118.8	40.86	95.43	112.8	17.37
	C	69.11	169.9	100.79	77.66	149.9	72.24	94.31	136.3	41.99
屏蔽室工作中心高度以下1 m	A	59.75	150.1	90.35	71.40	131.5	60.10	89.86	77.0	−12.86
	B	60.27	163.8	103.53	68.06	104.9	36.84	91.07	76.5	−14.57
	C	59.97	158.4	98.43	70.87	133.0	62.13	97.20	101.1	9.90
屏蔽室工作中心高度以上1 m	A	70.87	171.6	100.73	79.30	151.6	72.30	93.38	127.5	34.12
	B	72.66	177.2	104.54	78.47	159.0	80.53	93.78	145.4	51.62
	C	72.47	178.4	105.93	79.16	170.4	91.24	93.56	165.4	71.84

注 表中点位剩磁测量值实测为矢量数值,为与仿真值有效比对,换算成标量值。

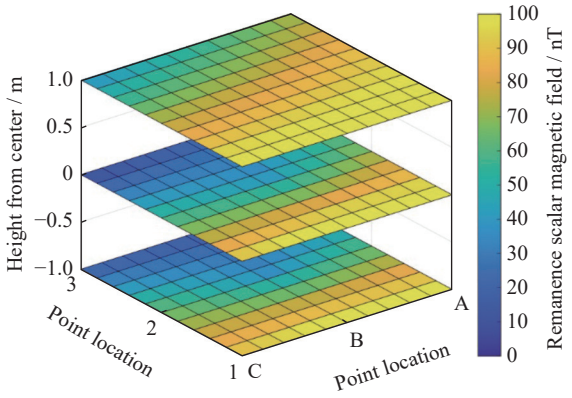


图 9 磁场强度总值对比

Fig. 9 Comparison of total magnetic field intensity



图 10 大空间磁屏蔽室内部实物

Fig. 10 Internal physical picture of large space magnetic shielding room

蔽系统已应用于天问二号磁强计、SMILE 卫星 MAG 磁强计等磁探测载荷的测试及试验，后续可为更多的深空探测任务、空间科学卫星、遥感卫星等磁探测载荷的定标试验提供稳定可靠的弱磁定标环境。

由于磁场仿真计算的局限性，本文未能对各不确定因素的影响程度进行更深入细致的研究，后续可以在建模中考虑对磁场环境梯度、多层网格划分、孔缝影响及各类输入条件进行针对性的改进和分析。

参考文献

[1] XU Wenyao. Physics of Electromagnetic Phenomena of the Earth[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009 (徐文耀. 地球电磁现象物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009)

[2] CHENG Huafu. Study on a calibration device of fluxgate magnetometer[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2018, **38**(5): 55-59 (程华富. 磁通门磁强计校准装置研究[J]. 宇航计测技术, 2018, **38**(5): 55-59)

[3] CONNERNEY J E P, BENN M, BJARNO J B, *et al*. The Juno magnetic field investigation[J]. *Space Science Reviews*, 2017, **213**(1/2/3/4): 39-138

[4] HU Ruixue, HAN Xueyan, ZHAO Zhanliang, *et al*. Analysis and research on overall permeability of nesting and splicing structures in large magnetic shielding rooms[J]. *Journal of Yanshan University*, 2019, **43**(5): 401-407 (胡瑞雪, 韩雪艳, 赵占良, 等. 大型磁屏蔽室嵌套拼接结构整体磁导率的分析与研究[J]. 燕山大学学报, 2019, **43**(5): 401-407)

[5] ZHANG Jingxin, XU Yafeng, LIU Mingfei. Introduction to Magnetic Field Space Technology[M]. Beijing: Standards Press of China, 2012 (张景鑫, 许亚峰, 刘明非. 磁场空间技术概论[M]. 北京: 中国标准出版社, 2012)

[6] ZHI Menghui. Research on High Precision Digital Fluxgate Sensor[D]. Suzhou: Soochow University, 2017 (支萌辉. 高精度数字磁通门传感器研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2017)

[7] LI Qiaoyan, WANG Baoguo, MA Tongbian, *et al*. Design of shielding device with low-frequency and high-performance[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2016, **14**(4): 591-595 (李巧燕, 王保国, 马通边, 等. 低频高性能屏蔽装置的设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, **14**(4): 591-595)

[8] JIN Tiruo. The standard of low magnetic field in China[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1988, **31**(6): 713-716 (金惕若. 中国的弱磁场标准[J]. 地球物理学报, 1988, **31**(6): 713-716)

[9] PAAVOLA M A J, ILMONIEMI R J, SOHLSTRÖM L, *et al*. High performance magnetically shielded room for clinical measurements[C]//Proceedings of the Tenth International Conference on Biomagnetism on Biomag 96. New York: Springer, 2000: 87-90

[10] LI Liyi, SUN Zhiyin, PAN Donghua, *et al*. Status reviews for nearly zero magnetic field environment facility[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, **30**(15): 136-140 (李立毅, 孙芝茵, 潘东华, 等. 近零磁环境装置现状综述[J]. 电工技术学报, 2015, **30**(15): 136-140)

[11] KUNKEL G M. Shielding effectiveness testing of space blanket[M]//KUNKEL G M. Shielding of Electromagnetic Waves: Theory and Practice. Cham: Springer, 2020: 51-56

[12] EROFEENKOA V T, BONDARENKOB V F. Shielding of a magnetic pulse by the multilayer film shield with alternating magnetic and nonmagnetic layers[J]. *Technical Physics*, 2017, **62**(6): 846-851

[13] AHN S. Shielding of magnetic field[M]//SUH N P, CHO D H. The On-line Electric Vehicle. Cham: Springer, 2017: 197-206