

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006224

用于原子干涉测量的多段圆柱形磁屏蔽装置 性能分析及实验研究^{*}

王先华¹, 贾森¹, 郝安庆^{1,2}, 赵小东¹, 宋巍^{1,2}

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 光学定向与瞄准技术研究室 西安 710119; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要:地磁场和环境杂散磁场在原子干涉测量过程中会引入测量噪声和系统误差,一般采用将磁屏蔽材料薄板卷曲后焊接成的圆筒逐段拼接起来,以制成足够长度的圆柱形磁屏蔽装置。为了明确这种方法对磁屏蔽性能的影响,详细分析了磁屏蔽层数、轴向及横向焊缝、两端面加盖引起的屏蔽区域剩磁场分布的变化,结果发现4 mm宽的轴向焊缝影响不大,而4 mm宽、相对磁导率较低的水平焊缝会产生明显的漏磁,两端面加盖能降低剩磁场强度但不能增大均匀磁场区域。根据分析结果制作了上抛式冷原子干涉重力仪中干涉区所使用的双层圆柱形磁屏蔽装置,实测结果表明,经退磁后获得的长度为700 mm、不均匀度小于4 nT的均匀磁场区域满足原子干涉测量的需求,与仿真分析也有较好的一致性。

关键词:磁屏蔽;原子干涉测量;重力测量;地磁场

中图分类号: O441.5 TH762 TP391.9 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 140.35 510.2

Performance analysis and experiment study on multi-sectional cylindrical magnetic shield device used for atom interferometric measurement

Wang Xianhua¹, Jia Sen¹, Hao Anqing^{1,2}, Zhao Xiaodong¹, Song Wei^{1,2}

(1. Optical Direction and Pointing Technique Research Department, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710119, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The gravitational and environmental stray magnetic fields will introduce measurement noises and system errors during atom interferometric measurement process. Usually, the magnetic shield material sheets are rolled and welded to become the cylindrical segments, which are spliced to form the cylindrical magnetic shield device with enough length. To clarify the influence of this fabrication method on the magnetic shielding performance, the variations of residual magnetic field distribution in shielding area caused by the number of shield layers, the axial and transverse weld seams and adding caps on both ends of the shield device are analyzed in detail in this paper. The results show that the existence of the axial weld seam with the width of 4 mm has little influence on magnetic shielding, however the presence of the transverse weld seam with the width of 4 mm on the shield with lower relative magnetic permeability will introduce obvious magnetic flux leakage, adding caps on both ends of the shield device may reduce the residual magnetic field intensity, but it can hardly enlarge the region of uniform magnetic field. Based on the analysis results, a dual-layered cylindrical magnetic shield device used for the interference area of the upward-projectile cold atom-interferometry gravimeter was fabricated, and the actual measurement results reveal that a uniform magnetic field region with length of 700 mm and unevenness of 4 nT is obtained after demagnetization, which satisfies the requirements of atom interferometric measurement, and has good consistency with the simulation results.

Keywords: magnetic shielding; atom interferometric measurement; gravimetric measurement; gravitational magnetic field

0 引言

地球是一个巨大的磁体,在其表面的磁场强度约为 $50\text{ }\mu\text{T}$ (即 $5\times 10^{-5}\text{ T}$)。这一磁场虽然很微弱,但对于许多研究都会产生不利影响,例如磁导航、磁存储、磁成像等^[1-6]。在原子干涉测量过程中,原子的核外电子所处的能级会在磁场的作用下产生移动或分裂(即二阶 Zeeman 效应),同时磁场力还会使得原子产生不必要的加速,而且不稳定的背景磁场还会引入测量噪声和系统误差,因此为了提高测量的精度和信噪比,必须采用适当的手段对背景磁场进行屏蔽。地磁场可以视为静磁场,利用高磁导率的磁屏蔽装置屏蔽地磁场是一种常见且有效的手段,由于磁屏蔽装置的磁导率要比空气高 3~5 个量级,空气中的磁阻要比磁屏蔽装置中的磁阻大得多,磁场绝大部分沿着磁屏蔽装置壁内通过,而进入装置内部空腔的磁场很少,从而达到屏蔽地磁场的目的^[7]。

近年来,国内外多个课题组对各类磁屏蔽装置及其具体应用进行了详细讨论。例如,Whelan 等^[8]针对核磁共振线性加速器中使用的磁屏蔽装置,探讨了磁屏蔽装置的形状、厚度、长度、层数、材料等对磁屏蔽性能的影响;Li 等^[9]针对无自旋交换弛豫磁力仪中使用的多层磁屏蔽装置和磁场补偿线圈进行了数值计算和实验研究,获得了 10 nT 以下超低磁场环境;李攀等^[10-11]针对核磁共振陀螺中使用的多层磁屏蔽系统和内置螺线管进行了优化设计,获得了较低的背景磁场和较好的均匀性;吕志峰等^[12-13]针对磁屏蔽装置结构优化问题,采用自适应权重粒子群优化算法和人工神经网络算法与有限元方法相结合,探讨了磁屏蔽装置的参数对其性能的影响;郭敬滨等^[14]针对光泵磁力仪所使用的磁屏蔽筒进行了仿真设计研究;Voulazeris 等^[7]则针对户外重力梯度测量应用对磁屏蔽装置进行了系统研究。原子干涉重力测量对磁场环境有 3 方面的需求^[15-18]: 1) 干涉区背景磁场的强度应低于 100 nT ; 2) 低背景磁场环境区域应有足够的长度,以保证原子有足够的自由演化时间,一般长度为 300 mm 的均匀磁场区域可以保证原子的自由演化时间大于 250 ms ; 3) 均匀磁场区域的不均匀度(即最大—最小磁场强度差值)应在几个 nT 以内。目前制作磁屏蔽装置的成本普遍较高,尤其是采用熔铸方法制作大尺寸磁屏蔽装置更加昂贵。在圆柱形磁屏蔽装置的制作过程中,一般采用将磁屏蔽材料薄板卷曲后焊接成的圆筒逐段拼接起来,形成足够长度的磁屏蔽装置,但这会在一定程度上影响磁屏蔽性能。为了明确这种方法制成的磁屏蔽装置其结构参数与其磁屏蔽性能之间的关系,本文详细分析了利用坡莫合金制成的多段圆柱形磁屏蔽装置的磁屏蔽性

能。首先根据实际测量的实验室所在的环境磁场强度建立背景磁场模型,根据由磁屏蔽薄板卷曲焊接后多段拼接的制作方法建立磁屏蔽装置的物理模型,然后探讨了这种制作方法中引入的焊缝、端面盖子等结构对装置内部的剩磁强度分布的影响,最后根据分析结果制作了双层多段圆柱形磁屏蔽装置用于上抛式原子干涉重力测量系统中干涉区,并将实测结果与计算分析结果进行了对比,从而建立多段圆柱形磁屏蔽装置的结构参数与其性能参数的关系,为降低磁屏蔽装置的制作成本和提高其磁屏蔽性能提供理论依据。

1 圆柱形磁屏蔽装置结构及分析方法

本文中建立圆柱形磁屏蔽装置数学模型的基础,即上抛式原子干涉重力测量系统的物理系统如图 1(a) 所示。其中,实现原子干涉的干涉区由一根内径为 51 mm 、厚度为 3 mm 、长度为 $1\text{ }100\text{ m}$ 的钛管构成,在其外部使用圆柱形磁屏蔽装置来屏蔽地磁场。为了便于安装、预留退磁线圈空间并尽可能贴近干涉区钛管,首层磁屏蔽装置的内径设定为 87 mm ,即与干涉区钛管有 15 mm 的空气间隔;考虑到单层磁屏蔽不一定能够满足磁屏蔽需求,因此需要设计第 2 层磁屏蔽装置,根据文献[19-25]的分析结果,两层磁屏蔽间的空气间隔最佳值应为 $0.73\times(87\text{ mm}/2)=32\text{ mm}$,因此最佳外层磁屏蔽的直径应为 151 mm 左右,如图 1(b) 所示。根据磁屏蔽原材料的尺寸及制作成本限制,实际磁屏蔽装置将采用厚度为约 1 mm 的坡莫合金薄板卷曲焊接成圆筒,再根据所需屏蔽区域的长度将这种圆筒逐段拼接起来,在拼接处受焊接工艺的影响有约 4 mm 宽的焊缝,如图 1(c) 所示。为了提高磁屏蔽性能,在上、下两端面对内、外层磁屏蔽装置均应加上盖子,盖子采用厚度为约 2 mm 的坡莫合金薄板制作,盖子端面的内径为 57 mm ,以便与干涉区钛管紧密贴合,盖子四周边沿与圆柱形磁屏蔽装置的重叠长度约为 10 mm ,如图 1(d) 所示。由于干涉区钛管的长度为 $1\text{ }100\text{ mm}$,考虑到磁屏蔽原材料的尺寸、端面盖子的尺寸、原子干涉重力测量系统的机械结构及制作成本,最终确定内层磁屏蔽装置由 3 段拼接而成,内径为 87 mm 、厚度为 1 mm 、总长度为 980 mm ;外层磁屏蔽装置由 4 段拼接而成,内径缩减至 108 mm 、厚度为 1 mm 、总长度为 $1\text{ }000\text{ mm}$ 。图 1 中红色实心箭头所指为内层和外层磁屏蔽装置的轴向焊缝,蓝色箭头所指为横向焊缝。为了方便观察,图 1(b) 和 (d) 中均以 90° 角剖面显示。此外,文中所使用的坐标系也在图 1(d) 中展示, Z 轴为轴向,其正方向为下 $\rightarrow$ 上; X 轴与 Y 轴所构成的平面方向即为横向,其中 X 轴正方向为东 $\rightarrow$ 西, Y 轴正方向为南 $\rightarrow$ 北。

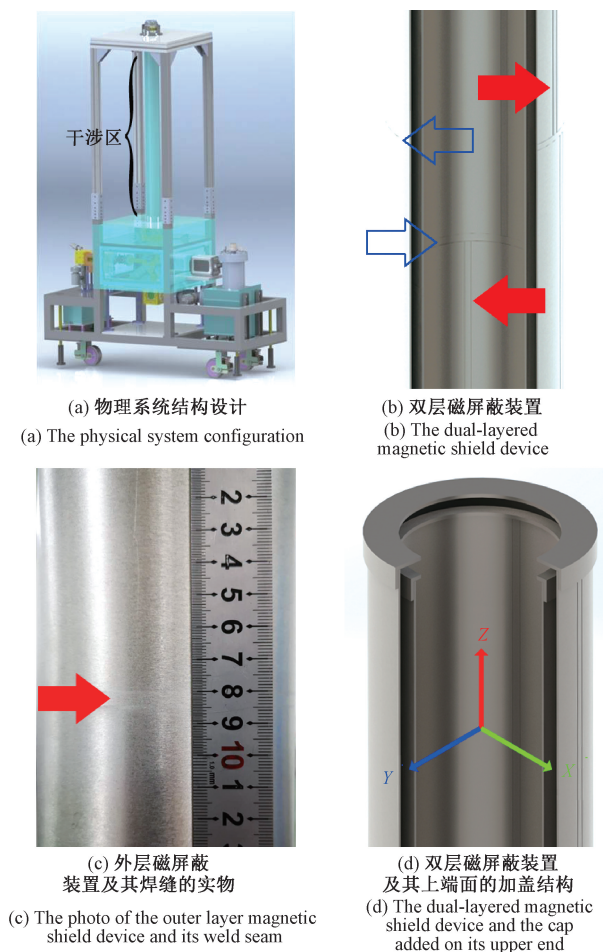


图1 上抛式原子干涉重力仪的物理系统及其磁屏蔽装置结构

Fig.1 Structure schematic diagram of the physical system and its magnetic shield device of an upward-projectile atom-interferometry gravimeter

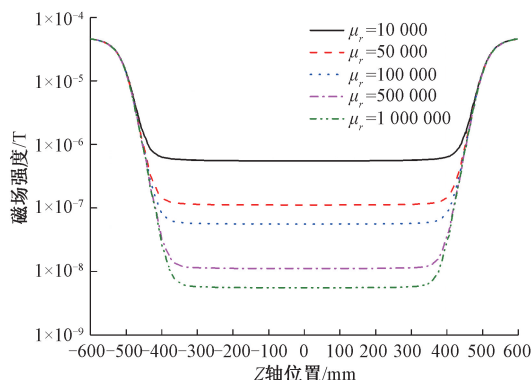
本文中磁屏蔽装置的数值分析在 COMSOL Multiphysics 软件中进行。首先,根据设计的尺寸和结构建立磁屏蔽装置的数学模型;然后,设定背景磁场和磁屏蔽装置的材料参数,划分网格并计算磁屏蔽装置内部的磁场强度分布;最后,将计算出的磁场强度沿 Z 轴的分布绘制成曲线图。磁屏蔽装置的数值分析流程如下:1) 计算不同相对磁导率(μ_r)的磁屏蔽材料制成的单、双层磁屏蔽装置在 5×10^{-5} T 的背景磁场中磁场方向(横向或轴向)对磁屏蔽性能的影响,并与理论结果进行对比,以便验证建立的物理模型和使用的分析方法的正确性;2) 以磁强计测量出实验室内实际环境磁场分布建立背景磁场,分别计算不同相对磁导率的单、双层磁屏蔽装置内部的磁场强度,明确在实验室的环境下对磁屏蔽装置的层数和相对磁导率的需求;3) 在实际磁场环境中以单层磁屏蔽装置为例分别计算

磁屏蔽装置带有横向和轴向焊缝时装置内部的磁场分布,以双层磁屏蔽装置为例分别计算磁屏蔽装置两端不加盖和加盖时装置内部的磁场分布,探讨不同相对磁导率的焊缝和盖子对磁屏蔽性能的影响;4) 对根据分析结果制成的双层磁屏蔽装置的性能进行实测,在退磁后、安装又拆卸后以及再次退磁后 3 个阶段测量了磁屏蔽装置内部的磁场分布,以验证该装置是否经过退磁可以消除安装引起的磁屏蔽性能降低,以及最终内部磁场分布是否满足实验需求,并将最终磁场分布与仿真计算结果进行比较。

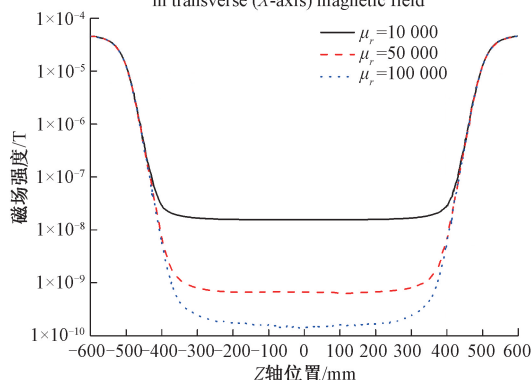
2 圆柱形磁屏蔽装置结构及分析方法

2.1 单、双层磁屏蔽装置对单方向磁场的屏蔽

不同相对磁导率的单层磁屏蔽装置对横向(X 轴)和轴向(Z 轴)磁场屏蔽后的剩磁强度如图 2(a)和(b)所示,不同相对磁导率的双层磁屏蔽装置对横向(X 轴)和轴向(Z 轴)磁场屏蔽后的剩磁强度如图 2(c)和(d)所示,磁屏蔽装置的材料设定为坡莫合金,相对磁导率 μ_r 分别取 10^4 、 5×10^4 、 10^5 、 5×10^5 和 10^6 ,磁场强度为 5×10^{-5} T。



(a) 单层磁屏蔽装置横向(X 轴)磁场
(a) Single-layered magnetic shield device in transverse (X -axis) magnetic field



(b) 双层磁屏蔽装置横向(X 轴)磁场
(b) Dual-layered magnetic shield device in transverse (X -axis) magnetic field

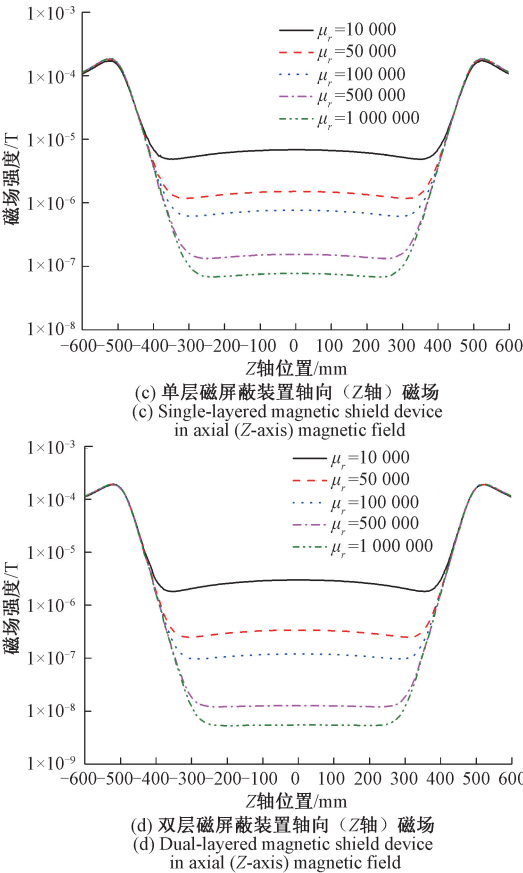


图 2 不同相对磁导率的磁屏蔽装置在单方向背景磁场中的屏蔽性能(背景磁场强度设定为 5×10^{-5} T)
Fig.2 The shielding performances of the magnetic shield devices with different relative magnetic permeability in single direction background magnetic field (the background magnetic field intensity is set to 5×10^{-5} T)

从图 2 的计算结果中可以看到,对横向(X 轴)磁场,单层磁屏蔽装置的相对磁导率需达到 5×10^4 以上才能将磁场屏蔽至 100 nT 以下,双层磁屏蔽则仅需数千即可达到等到的屏蔽效果;而对于轴向(Z 轴)磁场,单层磁屏蔽装置的相对磁导率接近 10^6 才能将磁场屏蔽至 100 nT 以下,双层磁屏蔽则需要 10^5 以上。根据以上结果可以得到如下结论:1) 与理论结果相符,沿轴向放置的圆柱形磁屏蔽装置对横向磁场的屏蔽效果好于对轴向磁场的屏蔽,根据计算结果,在相同的相对磁导率和背景磁场强度条件下,单层磁屏蔽装置对横向磁场屏蔽后的剩磁强度小于对轴向磁场屏蔽后剩磁强度的 1/10,双层磁屏蔽装置对横向磁场屏蔽后的剩磁强度小于对轴向磁场屏蔽后剩磁强度的 1/100;2) 当磁屏蔽装置的相对磁导率较小($\mu_r=10^4$)时,双层磁屏蔽装置内的剩磁强度大约是单层磁屏蔽装置内的 50% 左右,效果差别不是很大;随着相对磁导率的增加,双层磁屏蔽装置的优势才逐渐显现出来,当磁屏蔽装置的相对磁导率增大到 10^5 以上时,双层磁

屏蔽装置内的剩磁强度只有单层磁屏蔽装置内的 10% 左右;3) 横向磁场条件下磁屏蔽装置内部的剩磁强度较为均匀,而轴向磁场条件下磁屏蔽装置内部的剩磁强度则呈现出“中间高、两边低”的趋势,这与磁场沿着圆柱形磁屏蔽装置轴向传播时的理论结果相符。

2.2 单、双层磁屏蔽装置对三维磁场的屏蔽

利用三维磁通门磁力计(CH-330F,北京翠海佳诚磁电科技有限责任公司)测量了实验室所在位置的背景磁场方向及强度,如表 1 所示。

表 1 实验室的磁场环境

Table 1 The magnetic field environment in the laboratory

方向	磁场强度/nT
南→北方向(+Y)	24 915
东→西方向(+X)	12 575
上→下方向(-Z)	37 175
地磁场总强度	46 485

在上述三维背景磁场环境下分别计算了不同相对磁导率的单、双层磁屏蔽对背景磁场的屏蔽效果,如图 3 所示。

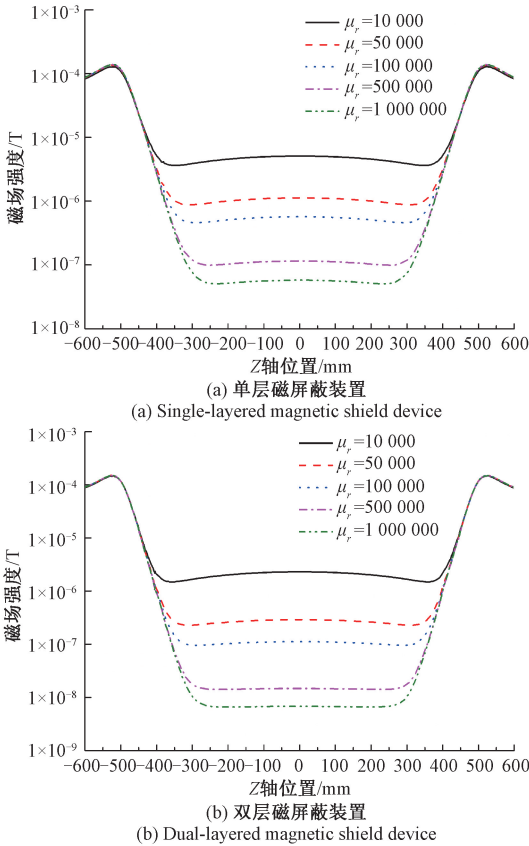
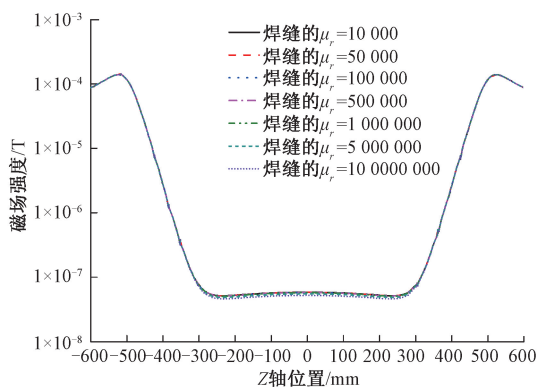


图 3 不同相对磁导率的磁屏蔽装置在三维背景磁场中的屏蔽性能
Fig.3 The shielding performances of the magnetic shield devices with different relative magnetic permeability in three-dimensional background magnetic field

计算结果显示,对于三维磁场环境,单层磁场屏蔽装置的相对磁导率需达到 5×10^5 以上才能将磁场屏蔽至 100 nT 以下,而双层磁屏蔽装置需 10^5 以上即可达到等等的屏蔽效果。坡莫合金的相对磁导率一般在 $2 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$ 之间,因此至少需要两层磁屏蔽才能满足实验需求,对于磁场环境要求更高的场合,可以进一步增加磁屏蔽的层数。此外,对比图 2 与 3 的计算结果可以发现,图 3 中三维磁场条件下的剩磁强度与图 2 中轴向磁场条件下的剩磁强度较为接近,也再次印证了理论结果。

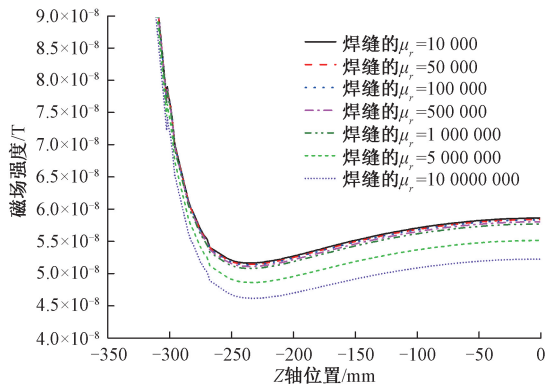
2.3 焊缝对磁屏蔽装置屏蔽性能的影响

坡莫合金薄板的厚度一般为 1 mm 左右,考虑到原材料尺寸和制作成本,设计外层磁屏蔽装置由 4 段拼接、内层磁屏蔽由 3 段拼接而成。为了探讨焊接工艺对磁屏蔽效果的影响,以单层磁屏蔽装置为例分别计算轴向(Z 轴)和横向(X-Y 平面方向)的焊缝对磁屏蔽效果的影响,磁屏蔽材料的相对磁导率均设定为 10^6 ,焊缝部分的材料仍设定为坡莫合金,但其相对磁导率由于受焊接工艺影响可能会增大,也可能会减小,因此选取了 $10^4 \sim 10^7$ 之间的 7 个值进行比较。计算结果分别如图 4 和 5 所示。



(a) 不同相对磁导率的轴向焊缝对磁屏蔽装置屏蔽性能的影响

(a) The influences of the axial weld seams with different relative magnetic permeability on the shielding performance of the magnetic shield device

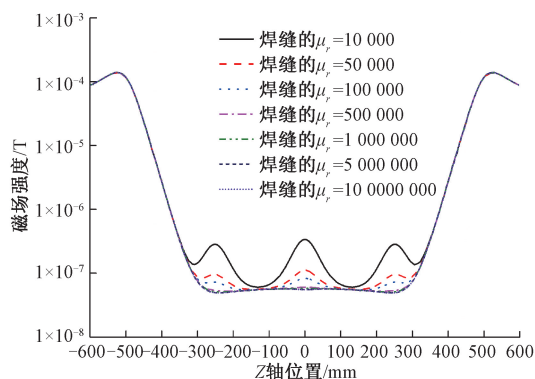


(b) 图4(a)中部分区域的放大图

(b) The enlargement diagram of the partial area in Fig. 4 (a)

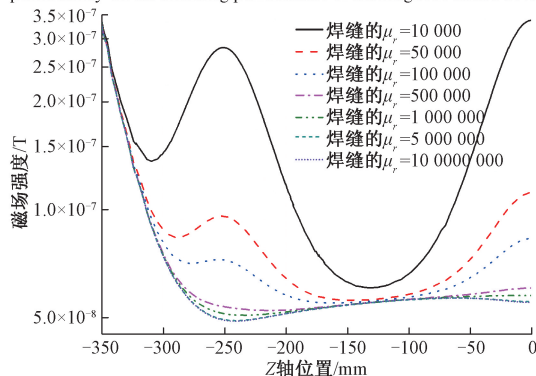
图4 不同相对磁导率的轴向焊缝对三维背景磁场中磁屏蔽装置屏蔽性能的影响

Fig.4 The influences of the axial weld seams with different relative magnetic permeability on the shielding performance of the magnetic shield device in three-dimensional background magnetic field



(a) 不同相对磁导率的横向焊缝对磁屏蔽装置屏蔽性能的影响

(a) The influences of the transverse weld seams with different relative magnetic permeability on the shielding performance of the magnetic shield device



(b) 图5(a)中部分区域的放大图

(b) The enlargement diagram of the partial area in Fig. 5 (a)

图5 不同相对磁导率的横向焊缝对三维背景磁场中磁屏蔽装置屏蔽性能的影响

Fig.5 The influences of the transverse weld seams with different relative magnetic permeability on the shielding performance of the magnetic shield device in three-dimensional background magnetic field

轴向的焊缝尺寸(弧长)设定 4 mm,对应的圆心角约为 4.2° ,焊缝部分的相对磁导率分别设定为 10^4 、 5×10^4 、 10^5 、 5×10^5 、 10^6 、 5×10^6 和 10^7 ,其中,焊缝部分的相对磁导率为 10^6 时,即与磁屏蔽材料的相对磁导率相同,可视为磁屏蔽装置是一个整体,不存在焊缝,计算结果应与 2.2 节对应相对磁导率的计算结果一致。由图 4 可知,垂直方向 4 mm 宽的焊缝对磁屏蔽效果的影响较小,当焊缝部分的相对磁导率在 $10^4 \sim 10^6$ 时差别在 5 nT 以内,焊缝部分的相对磁导率进一步增大时,磁屏蔽装置内的剩磁强度也随时降低。焊缝部分的相对磁导率为 10^6 时与 2.2 节中相对磁导率为 10^6 时的计算结果一致。

横向焊缝宽度同样设定为 4 mm,焊缝部分的相对磁导率设定与轴向焊缝相同,焊缝部分的相对磁导率为 10^6 时的计算结果也应与 2.2 节对应相对磁导率的计算结果一致。由图 5 可知,当焊缝部分的相对磁导率较低时,焊缝位置附近的剩磁强度有明显增加,而且焊缝造成的剩

磁增加与磁屏蔽装置内原本剩磁的分布叠加后,在磁屏蔽装置的中心位置形成了极大值。随着焊缝部分的相对磁导率增加,其引入的剩磁强度逐渐减小,当焊缝部分的相对磁导率为 10^6 时,与无焊缝时的计算结果一致。若焊缝部分的相对磁导率进一步增加,甚至高于磁屏蔽材料的相对磁导率,则对磁屏蔽的效果影响不大,只是焊缝位置附近的剩磁强度有少许降低。因此,焊缝部分的相对磁导率应尽可能接近或高于磁屏蔽材料本身的相对磁导率,否则会使磁屏蔽装置内部的剩磁强度出现起伏,可能会影响最终测量结果。

2.4 端面加盖对磁屏蔽装置屏蔽性能的影响

方便起见,内、外层磁屏蔽的盖子均由 2 mm 的坡莫合金层制成,且忽略焊接工艺对盖子的影响,即将其视为一个整体。两端的盖子中心都留有直径为 57 mm 的孔,以便与冷原子干涉重力测量系统的干涉区钛管紧密贴合。盖子部分的相对磁导率分别设定为 10^4 , 5×10^4 , 10^5 , 5×10^5 , 10^6 , 5×10^6 和 10^7 , 计算结果如图 6 所示。

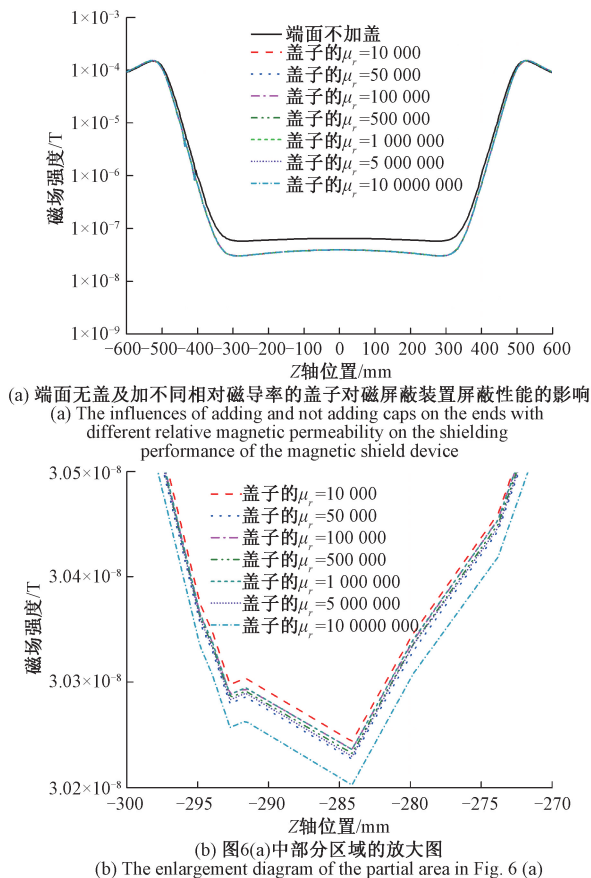


图6 端面无盖与加盖对三维背景磁场中双层磁屏蔽装置屏蔽性能的影响

Fig.6 The influences of adding and not adding caps on the ends on the shielding performance of dual-layered magnetic shield device in three-dimensional background magnetic field

计算结果显示:无盖时,双层磁屏蔽装置内的剩磁强度约为 50~60 nT,磁场均匀区域约为 600 mm;加盖时,剩磁强度约为 30~40 nT,磁场均匀区域约为 600 mm。剩磁强度下降了约 30%,磁场均匀区域长度没有明显变化,因此磁屏蔽装置两端的盖子能够增强屏蔽效果,但不能增大磁场均匀区域长度。图 6(b)中还可看出,不同相对磁导率的盖子对地磁屏蔽的效果影响很小,差别仅在 0.1 nT 以内。

3 实际制作的磁屏蔽装置的性能

3.1 磁屏蔽装置的退磁

在实际使用过程中,磁屏蔽装置会因为运输、安装、接触磁性物体等诸多环节导致磁屏蔽性能下降,因此,在将磁屏蔽装置安装到原子干涉重力测量系统之前或者之后,都要进行退磁操作,而且退磁过程可能反复进行数次。实验中,退磁过程采用数根贯穿磁屏蔽装置的轴向无磁导线通过缓变电流(0~20 A)的方式进行。由于原子干涉重力测量系统干涉区的结构限制,磁屏蔽装置安装完成后是无法测量其内的剩磁强度,因此只能根据退磁后但未安装前的实测结果进行参考,实际使用时则在安装完成后再次进行一次退磁操作。图 7 所示为在实验室的背景地磁场环境中,双层磁屏蔽装置在退磁后、安装又拆卸后、再次退磁后 3 个阶段时装置内部的剩磁强度。

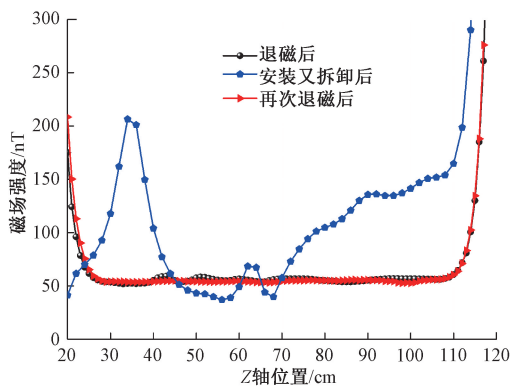


图7 退磁后、安装又卸载后、再次退磁后 3 个阶段的双层磁屏蔽装置内部的磁场分布

Fig.7 The magnetic field distributions inside the dual-layered magnetic shield device in three phases: after demagnetization, installation & un-installation and re-demagnetization

由图 7 中的测量结果可以看出,经初步退磁后,磁屏蔽装置内部的剩磁强度约为 50 nT;将磁屏蔽装置安装到原子干涉重力系统的干涉区后,再将其拆卸下来,此时磁屏蔽装置的磁屏蔽性能有了较大的降低,内部剩磁强度不仅很大,还极不均匀,最大差值超过 150 nT,这说明将

磁屏蔽装置退磁后安装到所需要的位置后是不能直接使用的,必须经过再次退磁;经过再次退磁后,剩磁强度回到了约 50 nT,与安装前效果相当,这说明再次退磁可以使磁屏蔽装置达到实验所需的磁屏蔽性能,安装和拆卸过程所造成的磁屏蔽性能退化这一影响能够通过再次退磁予以消除。

3.2 磁屏蔽装置的性能与仿真计算的对比

最后,仿真计算出的实际使用的双层磁屏蔽装置内部的剩磁强度如图 8 所示,同时也给出了图 7 中的测量数据作为对比。

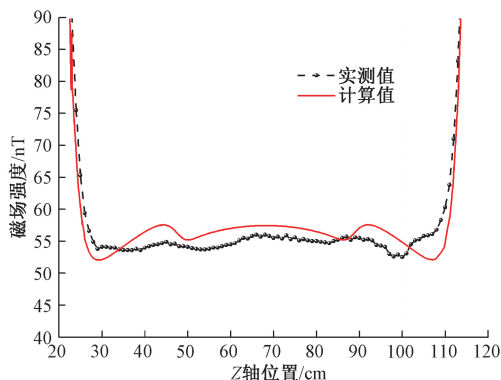


图 8 双层磁屏蔽装置内部磁场分布的仿真计算与实测结果

Fig.8 The simulated calculation and the measurement results of the magnetic field distribution inside the dual-layered magnetic shield device

仿真计算得到的磁屏蔽装置内部的剩磁强度约为 55 ± 2.5 nT,即不均匀度为 5 nT;实测结果约为 54 ± 2 nT,即不均匀度为 4 nT,与计算结果比较符合。计算得到的磁屏蔽装置内部的均匀磁场区域长度约为 650 mm,实测结果约为 700 mm,与计算结果较为接近。然而,实际测量结果中没有出现计算结果所示的磁屏蔽装置中心区域的剩磁强度高于两侧的现象,其主要原因在于内、外层磁屏蔽装置的焊缝轴向位置的不同和磁导率的差异在一定程度上起到了匀化内部磁场的作用。

4 结 论

原子对杂散磁场十分敏感,因此必须在原子干涉测量系统中安装和使用磁屏蔽装置,否则会影响干涉测量结果的精度和信噪比。本文在实验室内的磁场环境中以多段圆柱形磁屏蔽装置为模型基础探讨了其结构参数对其磁屏蔽性能的影响,结果发现:宽度为 4 mm 的轴向焊缝对磁屏蔽效果影响很小,而宽度为 4 mm 的横向焊缝

在相对磁导率较小时则会引入明显的漏磁,在磁屏蔽装置两端面加盖则能够使其内部的剩磁强度降低约 30%,但不能增大磁场均匀区域的长度;然后根据分析结果制作了双层多段圆柱形磁屏蔽装置,并在实验室的背景磁场环境中实际测量了制成的双层磁屏蔽装置在退磁后、安装又拆卸后、再次退磁后 3 个阶段时装置内部的剩磁强度,结果显示:实际使用磁屏蔽装置时,经退磁后可以消除安装和拆卸过程中所造成的磁屏蔽装置的性能退化,最终获得的长度为 700 mm、磁场不均匀度小于 4 nT 的均匀磁场区域,满足原子干涉测量实验的需求,且与计算分析有较好的吻合度。本文对焊缝的材料和端面盖子的结构做了简化处理,但对计算结果的影响不大,因此可以认为这种简化处理是合理的。但是,由于受到原子干涉重力测量系统的机械结构尺寸和制作成本的限制,双层磁屏蔽装置之间的空气间隔并未按照理论的最优值来制作;同时,端面盖子的结构设计也比较单一,不同外形的盖子(如平顶、圆锥等)的磁屏蔽效果也不尽相同;此外,原子干涉重力测量系统中存在着多组磁场线圈和磁屏蔽装置,这些线圈对磁屏蔽装置的影响以及不同磁屏蔽装置之间的影响都需要在以后的工作中进一步深入研究。

参考文献

- [1] PENDLEBURY J M, AFACH S, AYRES N J, et al. Revised experimental upper limit on the electric dipole moment of the neutron [J]. *Physical Review D*, 2015, 92(9): 092003.
 - [2] AFACH S, BISON G, BODEK K, et al. Dynamic stabilization of the magnetic field surrounding the neutron electric dipole moment spectrometer at the paul scherrer Institute [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(8): 084510.
 - [3] MATSUSHIMA M, TSUNAKAWA H, IJIMA Y, et al. Magnetic cleanliness program under control of electromagnetic compatibility for the SELENE (Kaguya) spacecraft [J]. *Space Science Reviews*, 2010, 154(1-4): 253-264.
 - [4] BELYAVSKAYA N A. Biological effects due to weak magnetic field on plants [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34(7): 1566-1574.
 - [5] 李婷,张金生,王仕成,等. 地磁测量误差矢量补偿方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(11): 2682-2690.
- LI T, ZHANG J SH, WANG SH CH, et al. Component

- compensation method for distortion magnetic field measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(11): 2682-2690.
- [6] 张涛,张策,滕云田,等. 地磁偏角倾角绝对测量技术发展现状综述[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 80-90.
- ZHANG T, ZHANG C, TENG Y T, et al. Review on the development of the automatic geomagnetic deflection and inclination observation instrument[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 80-90.
- [7] VOULAZERIS G. Portable atom interferometry: Investigation on magnetic shielding techniques for compact quantum sensors[D]. Birmingham: University of Birmingham, 2018.
- [8] WHELAN B, KOLLING S, OBORN B M, et al. Passive magnetic shielding in MRI-Linac systems[J]. Physics in Medicine & Biology, 2018, 63(7): 075008.
- [9] LI J D, QUAN W, HAN B CH, et al. Multilayer cylindrical magnetic shield for SERF atomic co-magnetometer application [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(8): 2916-2923.
- [10] 李攀,刘元正,王继良. 核磁共振陀螺多层磁屏蔽系统优化设计[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(3): 383-389
- LI P, LIU Y ZH, WANG J L. Optimization design of multilayer magnetic shield for nuclear magnetic resonance gyroscopes[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(3): 383-389.
- [11] 李攀,刘元正,严吉中,等. 核磁共振陀螺磁屏蔽罩内静磁场系统优化设计[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 18(3): 381-385,391.
- LI P, LIU Y ZH, YAN J ZH, et al. Optimization design for static magnetic system in magnetic shield of nuclear magnetic resonance gyroscopes [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 18(3): 381-385,391.
- [12] 吕志峰,张金生,王仕成,等. 基于自适应权重 PSO 算法的磁屏蔽装置优化设计[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(6): 799-803.
- LYU ZH F, ZHANG J SH, WANG SH CH, et al. Optimal design of magnetic shielding device based on adaptive weight PSO algorithm[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2017, 25(6): 799-803.
- [13] 吕志峰,张金生,王仕成,等. 基于 RBF 神经网络的磁屏蔽性能计算方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(8): 1832-1838.
- LYU ZH F, ZHANG J SH, WANG SH CH, et al. Calculation of magnetic shielding performance based on RBF neural network [J]. Systems Engineering and Electronic, 2018, 40(8): 1832-1838.
- [14] 郭敬滨,孟佳旭,李醒飞,等. 光泵磁力仪磁屏蔽筒的尺寸设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(2): 80-85.
- GUO J B, MENG J X, LI X F, et al. Dimension design of magnetic shielding cylinder for optical pumped magnetometer [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(2): 80-85.
- [15] 周敏康. 原子干涉重力测量原理性实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- ZHOU M K. Experimental demonstration of an atom interferometry gravimeter [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [16] 段小春. 原子干涉重力梯度测量原理性实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- DUAN X CH. Principle experiment of measuring gravity gradient by atom interferometry[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [17] 房丰洲,顾春阳. 高精度重力仪的测量原理与发展现状[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1830-1840.
- FANG F ZH, GU CH Y. Measurement principle and development status of high precision gravimeters [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1830-1840.
- [18] 王启宇,冯金扬,李春剑,等. 面向绝对重力仪的光束垂直性快速调节[J]. 光学 精密工程, 2019, 27(1): 1-7.
- WANG Q Y, FENG J Y, LI CH J, et al. Fast alignment of beam verticality for absolute gravimeters [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(1): 1-7.
- [19] SMITH E S. Calculations of magnetic shield effectiveness for long μ -metal cylinders [J/OL]. 2007. <https://halldweb.jlab.org/DocDB/0008/000843/004/bshield.pdf>.
- [20] MAGER A. Magnetic shields[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1970, 6(1): 67-75.
- [21] CHEN D X, BRUG J A, GOLDFARB R B. Demagnetizing factors for cylinders[J]. IEEE Transaction

on Magnetics, 1991, 27(4): 3601-3619.

- [22] KOBAYASHI M, ISHIKAWA Y. Surface magnetic charge distributions and demagnetizing factors of circular cylinders [J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1992, 28(3): 1810-1814.
- [23] MAGER A. Magnetic shielding efficiencies of cylindrical shells with axis parallel to the field [J]. Journal of Applied Physics, 1968, 39(3): 1914-1917.
- [24] SUMNER T J, PENDLEBURY J M, SMITH K F. Convectional magnetic shielding [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1987, 20(9): 1095-1101.
- [25] PAPERNO E, PELIWAL S, ROMALIS M V, et al. Optimum shell separation for closed axial cylindrical magnetic shields [J]. Journal of Applied Physics, 2005,

97(10): 10Q104.

作者简介



王先华(通信作者), 2004 年和 2011 年于西安交通大学分别获得学士学位和博士学位, 现为中国科学院西安光学精密机械研究所副研究员, 主要研究方向为冷原子物理、精密测量技术。

E-mail: xhwang@opt.ac.cn

Wang Xianhua (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Xi'an Jiaotong University in 2004 and 2011, respectively. Now, he is an associate professor in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His main research interest includes cold atom physics and precision measurement technology.