

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513894

超低温铯原子喷泉钟磁屏蔽装置研制*

毛晓亮^{1,2}, 王心亮¹, 聂 帅¹, 张 泽^{1,2}, 张首刚¹

(1. 中国科学院国家授时中心 西安 710600; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 铯原子喷泉钟是基于原子内部量子跃迁而实现的标准频率信号发生装置, 是目前通用的频率基准。超低温铯原子喷泉钟是铯原子工作于液氮温度的特殊类型, 其特点是工作在液氮温度下(80 K), 能够使铯原子的黑体辐射频移 $<1 \times 10^{-16}$, 从而近乎消除了黑体辐射频移的影响, 同时铯原子喷泉钟的腔相位频移和背景气体碰撞频移会有大幅度的改善, 有望将铯原子喷泉钟的系统频率不确定度降低至 2×10^{-16} 以下。磁屏蔽装置是喷泉钟物理系统的重要组成部分, 磁屏蔽装置的性能影响喷泉钟的磁场频移和不确定度的指标。由于在谐振腔和原子飞行区的外围设置了液氮杜瓦夹层, 液氮进出管道需要穿透多层磁屏蔽, 超低温铯原子喷泉钟的磁屏蔽结构相对常温喷泉钟更加复杂, 研制难度更大。针对超低温铯原子喷泉钟的空间结构 and 应用需求, 设计了相应的磁屏蔽装置, 应用仿真计算确定了磁屏蔽装置的最佳层数、厚度、尺寸、层间间隔等参数。依据设计完成了磁屏蔽装置的加工。对加工成型的磁屏蔽装置进行了高温消磁和交流消磁处理, 经过测试, 磁屏蔽装置核心区域径向磁场变化 <0.1 nT, 轴向磁场变化 <1.3 nT, 两端屏蔽因子 $>10\,000$, 中心屏蔽因子 $>60\,000$, 满足超低温铯原子喷泉钟的应用需求。

关键词: 铯原子喷泉钟; 磁屏蔽; 频率稳定度; 黑体辐射频移; 二阶塞曼频移

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.35 460.2

Development of magnetic shielding device for ultra-low temperature cesium atomic fountain clock

Mao Xiaoliang^{1,2}, Wang Xinliang¹, Nie Shuai¹, Zhang Ze^{1,2}, Zhang Shougang¹

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The cesium atomic fountain clock is a standard frequency signal generation device based on the internal quantum transition of atoms and is currently the universal frequency standard. The ultra-low temperature cesium atomic fountain clock is a special type in which cesium atoms operate at liquid nitrogen temperature(80 K), which effectively reduces the blackbody radiation frequency shift to less than 1×10^{-16} , nearly eliminating the influence of this shift. The cavity phase frequency shift and background gas collision frequency shift of the cesium atomic fountain clock will be greatly improved, with the potential to reduce the systematic frequency uncertainty of the cesium atomic fountain clock to below 2×10^{-16} . The magnetic shielding device is an important part of the physical system of the fountain clock. The performance of the magnetic shielding device affects the magnetic field frequency shift and uncertainty index of the fountain clock. Since a liquid nitrogen Dewar interlayer is set on the periphery of the resonant cavity and the atomic flight area, the liquid nitrogen inlet and outlet pipes need to penetrate multiple layers of magnetic shielding. The magnetic shielding structure of the ultra-low temperature cesium atomic fountain clock is more complex than that of the room temperature fountain clock, and the development difficulty is greater. In this paper, according to the spatial structure and application requirements of the ultra-low temperature cesium fountain clock, a corresponding magnetic shielding device is designed. The optimal parameters such as the number of layers, thickness, size, and interlayer spacing of the magnetic shielding device are determined by simulation calculation. The magnetic shielding device is processed according to the design. The processed magnetic shielding device is subjected to high-temperature demagnetization and AC demagnetization treatment. After testing, the radial magnetic field change in the core area of the magnetic shielding device is less than 0.1 nT, the axial magnetic field

收稿日期: 2025-04-07 Received Date: 2025-04-07

* 基金项目: 陕西省重点研发计划(2023-YBGY-402)项目资助

change is less than 1.3 nT, the shielding factor at both ends is greater than 10 000, and the central shielding factor is greater than 60 000, which meets the application requirements of the ultra-low temperature cesium atomic fountain clock.

Keywords: cesium atomic fountain clock; magnetic shielding; frequency stability; blackbody radiation frequency shift; second-order zeeman frequency shift

0 引言

铯原子喷泉钟是以冷铯原子团为工作介质,应用激光冷却技术和分离震荡场技术研制的用于复现秒定义的基准装置^[1-2]。喷泉钟物理系统是铯原子与激光和微波作用的场所,是喷泉钟的主体。物理系统由真空腔、真空泵、磁场线圈和磁屏蔽装置组成。磁屏蔽安装在谐振腔和原子飞行区外围,紧靠磁屏蔽内侧设置螺线管线圈,螺线管产生的均匀弱磁场(C场)用于解除铯原子基态的能级简并。磁屏蔽的作用一方面用于消除地磁场的干扰,另一方面用于延长C场的均匀范围,增强C场的稳定性^[3-5]。磁屏蔽装置一般设计为多层圆筒结构,圆筒的上下两个圆面中心位置开口用于原子进入和连接真空泵^[6]。超低温铯原子喷泉钟在谐振腔和原子飞行区额外设置了液氮低温夹层,液氮的进口和出口都要穿过磁屏蔽。这为磁屏蔽的研制带来新的困难和挑战^[7-8]。

在铯原子喷泉钟的诸多频移项中,C场主要引起二阶塞曼频移,C场的均匀性决定二阶塞曼频移的不确定度。C场的均匀性包含C场的空间分布和C场随时间的变化两种类型。C场随时间的变化由电流源的稳定性和磁屏蔽因子决定,C场的空间分布则决定于磁屏蔽中心的剩余磁场。目前世界上仅有两台超低温铯原子喷泉钟 NIST-F2 和 IT-CsF2,两台钟的轴向磁场起伏分别为 $4^{[9-10]}$ 和 $14 \text{ nT}^{[11]}$ 。IT-CsF2 的轴向磁屏蔽因子为 2 000。近年的研究表明,为了实现铯原子喷泉钟二阶塞曼频移的不确定度 $<1 \times 10^{-16}$ 的要求,磁屏蔽中心核心区域 45 cm 范围内磁场起伏应 $<2 \text{ nT}$,磁屏蔽因子应 $>10\,000^{[12-13]}$ 。

针对超低温铯原子喷泉钟磁屏蔽装置的研制需求,通过研究磁屏蔽的设计理论,选用高磁导率材料、设计最佳的磁屏蔽层数和结构,扩大了均匀磁场范围。经过测试,磁屏蔽装置核心区域径向磁场变化 $<0.1 \text{ nT}$,轴向磁场变化 $<1.3 \text{ nT}$,两端开口处屏蔽因子 $>10\,000$,中心屏蔽因子 $>60\,000$,获得超低温铯原子喷泉钟磁屏蔽装置的最高性能指标。

1 磁屏蔽的结构和设计理论

1.1 磁屏蔽结构

超低温铯原子喷泉钟物理系统如图 1 所示,磁光阱位于系统下方,用于铯原子的冷却和俘获。探测区位于

中间位置,用于原子团下落后飞行时间探测信号的探测。磁屏蔽装置位于探测区的上方,磁屏蔽通常设计为多层筒状结构,下端中心开口用于原子团进出,上端中心开口连接复合离子泵,上端两侧的开口用于液氮的入口和出口。磁屏蔽内部由外向内依次为磁场线圈、液氮夹层和谐振腔。谐振腔上下都设置了长截止波导以防止微波泄漏。谐振腔下方 10 cm 和谐振腔上方 30 cm 的范围是铯原子喷泉钟的核心区域。

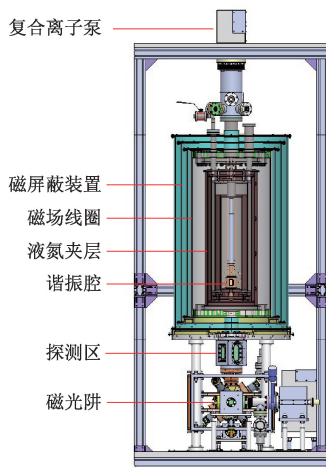


图1 超低温铯原子喷泉钟物理系统

Fig. 1 Cesium atomic fountain clock physical system

1.2 磁屏蔽原理

低频磁场和静磁场的屏蔽通常是利用高磁导率材料的磁路分流原理,将外部磁力线引导至屏蔽材料内部,从而减少内部磁场强度^[14-15]。磁场线是连续闭合曲线,屏蔽材料的磁阻受其厚度和磁导率的影响。磁阻 R_m 可表示为:

$$R_m = \frac{l}{\mu S} = \frac{l}{\mu_r \mu_0 S} \quad (1)$$

其中, μ_r 是相对磁导率, μ_0 是真空磁导率, S 是屏蔽材料竖直面于磁通方向的面积, l 是穿过屏蔽材料磁力线的平均长度。从式(1)可以看出,材料的磁导率越高,磁阻越低,导磁性能越好。因此,在低频磁场和静磁场的屏蔽条件下,磁导率越高的材料屏蔽性能越好。此外,相同厚度下能容纳的磁力线越多,节省的材料就越多。

铯原子喷泉钟的磁屏蔽装置是用于屏蔽约 $40 \mu\text{T}$ 大小的地磁场,属于低频静磁场,故磁屏蔽通常选用具有高磁导率的铁磁材料如软铁、硅钢、坡莫合金等制作。与屏蔽性能相关的还有材料的饱和磁通密度 B_s 和矫顽力 H_c 。

两项参数,其中饱和磁通密度是指材料在强磁场下的最大磁化能力,矫顽力是指材料抵抗消磁的能力。坡莫合金在铁磁材料中具有较大的磁导率和较小的矫顽力,适合作为磁屏蔽的材料。

衡量磁屏蔽性能的最主要参数是磁屏蔽因子。其定义为磁屏蔽装置外部磁场与内部磁场的比值^[16]。磁屏蔽因子越大,代表磁屏蔽的效果越好,表示为:

$$SE = \frac{B_{out}}{B_{in}} \quad (2)$$

其中, B_{out} 为外部磁感应强度, B_{in} 为内部磁感应强度。

对于单层薄壁大口径圆柱形磁屏蔽筒,其屏蔽效果可以表示为^[17]:

$$SE = 1 + \frac{\mu_r t}{2R} \quad (3)$$

其中, μ_r 表示相对磁导率, t 是厚度, R 是半径, L 是屏蔽体长度。从式(3)可以看到,选取大磁导率材料、小尺寸设计可以增强磁屏蔽装置的屏蔽效果。

实际使用中屏蔽层通常采用多层结构。假设一个三层圆筒状磁屏蔽装置圆筒的厚度为 t , 最内层圆筒的半径为 R , R_i 和 L_i 分别为磁屏蔽圆筒第 n 层的平均半径和平均长度 ($i = 1, 2, 3$)。分隔良好的 n 层屏蔽装置的磁屏蔽因子 SE 可由式(3)递推得出:

$$SE_{tot} = \prod_{i=1}^{n-1} SE_n SE_i \left[1 - \left(\frac{R_i}{R_{i+1}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

其中, SE_{tot} 是总的横向磁屏蔽因子, $SE_i = \mu_i t_i / 2R_i$ 。代入 $i=1$ 和 $i=2$ 的项得到三层磁屏蔽因子的计算公式:

$$SE_{tot} = \frac{\mu_1 t_1}{2R_1} \cdot \frac{\mu_2 t_2}{2R_2} \cdot \left(1 - \frac{R_1^2}{R_2^2} \right) \cdot \left(1 - \frac{R_2^2}{R_3^2} \right) \quad (5)$$

从式(4)和(5)可以看出,多层磁屏蔽结构的磁屏蔽因子的大小会随屏蔽层数的增多而增大。若单层磁屏蔽厚度 $t=2$ mm、每层磁屏蔽间隔均匀,由式(5)可得当最内层磁屏蔽半径 $R_1=417$ mm 时总三层磁屏蔽因子 $SE_{tot}=10\ 000$,屏蔽层内的磁场起伏仅为 1 nT,此时继续缩小半径、增加层数的对增强屏蔽效果的影响很小,但缩小半径可以降低装置的体积重量。

1.3 消磁原理

加工完成的磁屏蔽装置受应力影响会留有一定的剩余磁场,需要进行消磁处理。常用的消磁方法有高温消磁法和交流消磁法。高温消磁法是将磁屏蔽进行热处理,使其温度达到居里温度以上,在无外场条件下缓慢冷却到室温,从而实现对磁屏蔽的消磁^[18];初次加工完成的磁屏蔽都要进行高温消磁。交流消磁的原理是给磁屏蔽施加一规律变化的磁场,用来破坏磁屏蔽内部因磁化而形成的磁畴方向的一致性,使其内部的磁畴恢复到未磁化前杂乱无章的磁中性状态^[19]。通过向屏蔽材料施加幅值大于其矫顽力 H_c 且随时间逐渐减小的交流磁场,

让材料跟随该磁场不断经历磁化和反磁化的过程,磁感应强度跟随磁滞回线的变化,涡旋式地趋近于零点,当消磁磁场降低至 0 时,磁性材料的磁化强度和磁感应强度也接近于 0^[20]。

高温消磁后的 1J85 坡莫合金的三层磁屏蔽装置在运输、安装的过程中会产生 200~300 nT 的剩余磁场。式(6)为长直导线的安培定律, n 为线圈匝数,对于圆筒形材料,路径是半径为 r 的圆周,因此 H 是均匀的,且沿圆周方向,所以积分简化:

$$\oint H \cdot dl = nI \Rightarrow H = \frac{nI}{2\pi r} \quad (6)$$

三层圆筒存在厚度,假设第 i 层的内外半径分别为 $r_{i,内}$ 和 $r_{i,外}$ ($i=1,2,3$),圆筒轴向长度为 L ,间隙为空气,磁场近似均匀分布于每层。每层材料和空气间隙的磁阻为:

$$\begin{cases} R_{m,i} = \frac{\ln(r_{i,外}/r_{i,内})}{2\pi\mu L} \\ R_{air,j} = \frac{\ln(r_{j,外}/r_{j,内})}{2\pi\mu_0 L} \end{cases} \quad (7)$$

总磁阻为各层材料和空气间隙磁阻之和,即:

$$R_{\text{总}} = \sum_{i=1}^3 R_{m,i} + \sum_{j=1}^2 R_{air,j} \quad (8)$$

每层材料中的磁场强度为:

$$\begin{cases} H_i = \frac{nI}{2\pi r_{i,avg} \mu R_{\text{总}}} L \\ r_{i,avg} = \frac{r_{i,内} + r_{i,外}}{2} \end{cases} \quad (9)$$

每层磁场需满足 $H_i \geq kH_c$ ($k=1.5 \sim 2$),取最严格条件 $H = \max(kH_c)$,结合上述公式,消磁电流峰值为:

$$I_{\text{peak}} = \frac{kH_c \cdot 2\pi r_{\text{avg}} \mu L \cdot R_{\text{总}}}{n} \quad (10)$$

坡莫合金的矫顽力约为 0.49 A/m,根据式(10)可得此时需要大约 128 A 工频交流电就可以将应力产生的剩余磁场退掉。

2 磁屏蔽装置仿真与设计

2.1 装置概述

磁屏蔽的屏蔽效果与屏蔽体的材料、形状、尺寸以及封闭情况等因素密切相关^[21-22]。设计如图 2 所示的磁屏蔽装置,建立 3 层结构的磁屏蔽以获取大屏蔽因子,其中三层磁屏蔽筒及上下磁屏蔽盖均设为高磁导率的 1J85 坡莫合金,筒身部分为三层嵌套结构,上下端盖留有真空管道穿行孔,孔的边缘设计外翻沿结构。每层磁屏蔽连接处采用钛合金螺丝和垫环固定。屏蔽筒上端盖中心区域对称设置双通孔,相比只有中心开孔的情况,上端盖附近的磁场均匀性变差。为扩大均匀磁场范围,设计增加

了屏蔽筒的轴向高度。为了减小缝隙对屏蔽效果的影响,上端盖由一层完整板和一层半圆板拼接而成,下端盖由两层半圆板拼接而成,两层半圆板的接缝相互垂直。

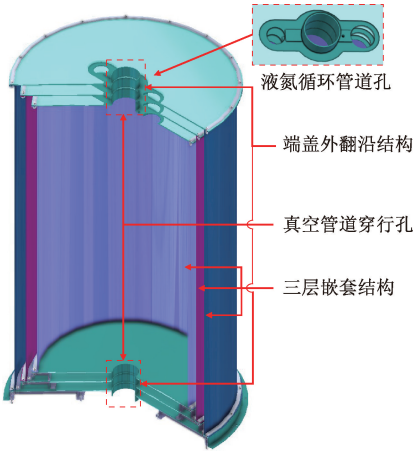


图 2 磁屏蔽装置整体示意图

Fig. 2 Diagram of the magnetic shielding device

2.2 参数设计与仿真计算结果

为了预留磁场线圈和液氮夹层空间,同时考虑系统的机械结构和最佳磁屏蔽效果,通过仿真计算确认了最优尺寸如表 1 所示。

表 1 磁屏蔽结构参数

Table 1 Magnetic shield structure parameters

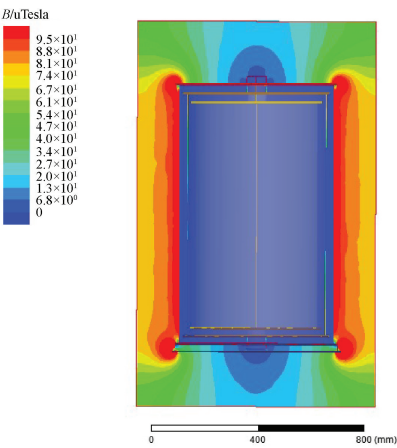
(mm)			
磁屏蔽层	直径	高度	厚度
1	465	861	2
2	525	925	2
3	585	989	2

上下端盖的真空管道穿行孔直径分别设置为 73 和 70 mm,上下端盖外翻沿长度分别设置为 29 和 26 mm,两个液氮循环管道孔直径分别设置为 40 和 53 mm。

根据地磁场对磁屏蔽作用的对称性,将地磁场分为水平方向和竖直方向。水平地磁场作用下磁屏蔽在整个空间内的磁场 B_H 分布如图 3(a) 所示。

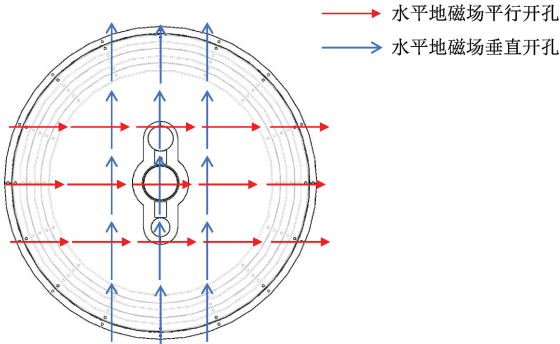
由于上端盖结构不中心对称,水平地磁场垂直或平行开孔的效果不同,如图 3(b) 所示根据仿真计算结果,可得到两种情况水平地磁场在中心轴向路径上的剩磁分布如图 4 所示,其中坐标零点位于磁屏蔽最外层下翻沿最下端处。

由于垂直磁场方向不存在开孔,水平方向磁屏蔽效果较好。上端盖位置在水平磁场平行开孔时对剩磁分布的影响更为明显,总体来说,水平地磁场对于磁屏蔽装置的影响很小,核心区域磁场起伏 <0.01 nT。



(a) 水平地磁场分布(垂直开孔)

(a) Horizontal geomagnetic field distribution (vertical opening)



(b) 水平地磁场矢量示意图

(b) Diagram of the horizontal geomagnetic field vector

图 3 水平地磁场在空间内的磁场分布

Fig. 3 Magnetic field distribution of horizontal geomagnetic field in space

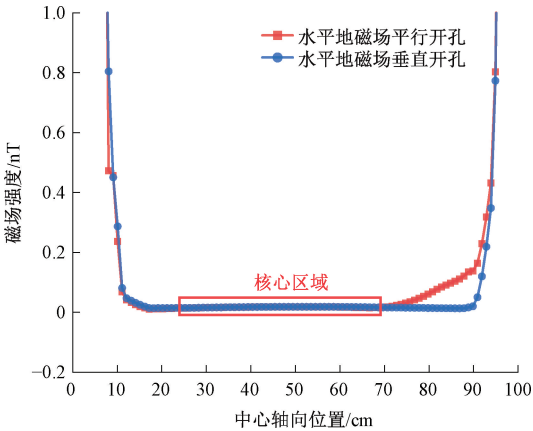


图 4 水平地磁场在中轴路径上剩磁分布

Fig. 4 Remanent magnetic distribution of horizontal geomagnetic field on the central axis path

由于磁屏蔽上下两端口均有开孔,因此轴向磁屏蔽效果相对较差。竖直地磁场在整个空间内的 B_V 分布如图 5 所示。

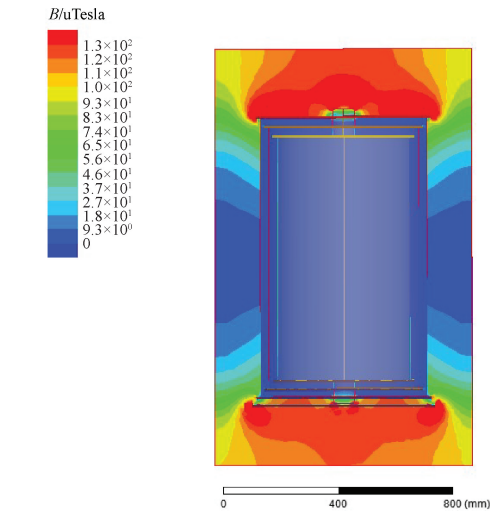


图 5 竖直地磁场在空间内的磁场分布
Fig. 5 Magnetic field distribution perpendicular to the Earth's magnetic field in space

应用与水平方向计算相似的方法,根据仿真计算结果,可得到竖直地磁场在中心轴向路径上的剩磁分布如图 6 所示。

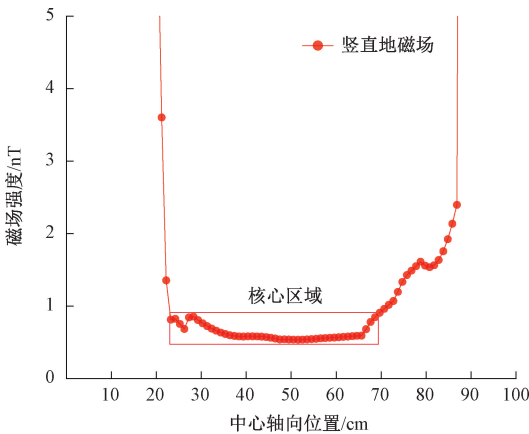


图 6 竖直地磁场在中轴路径上剩磁分布
Fig. 6 Remanent magnetic distribution of vertical geomagnetic field on the central axis path

根据图 6,在中心轴上,竖直地磁场强度最大点在磁屏蔽的两端,上端区域磁场均匀性最差。在 20~80 cm 的范围内磁场强度起伏为 1.5 nT,核心区域磁场起伏为 1.0 nT。

通过模拟外加磁场可以计算出在磁屏蔽装置中心轴向不同位置的磁屏蔽因子,如图 7 所示,中心处的磁屏蔽因子最大为 67 000。由于磁屏蔽两端都设有开孔,磁屏蔽因子会从中间区域向两侧逐渐减小,上端盖开孔数量更多,导致上端磁屏蔽因子小于下端。

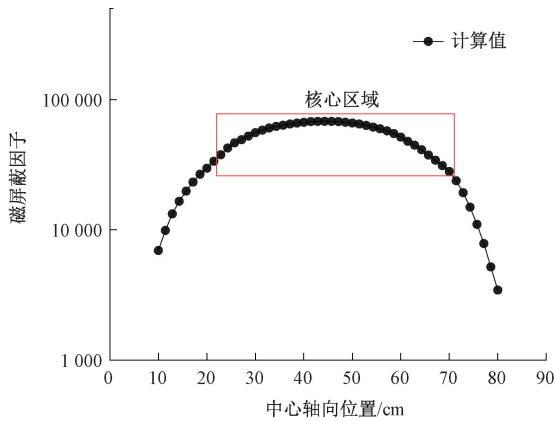


图 7 磁屏蔽装置中心磁屏蔽因子仿真计算
Fig. 7 Simulation of the central magnetic shielding factor of the magnetic shielding device

3 加工后磁屏蔽装置指标测量

3.1 磁屏蔽的消磁处理

依据第 2 章的设计进行磁屏蔽加工,坡莫合金的高磁导率和低矫顽力容易受到加工影响,高温退火可优化晶粒结构,恢复其软磁特性,高温消磁曲线如图 8 所示,在开始的 4 h 内升温到 1 180℃,保持 3 h,然后在 4.5 h 内逐渐降温到 500℃,最后 1 h 降温到 100℃。高温消磁后的磁屏蔽装置在拆卸、运输、安装过程中受到碰撞和应力改变而产生微量磁场,图 9 是高温消磁后磁屏蔽轴向的剩磁分布,为使磁屏蔽达到最佳性能还需进行交流消磁。

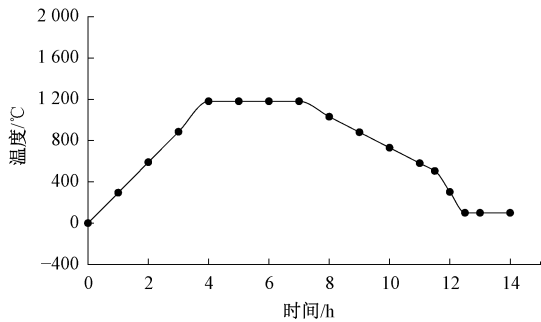


图 8 高温消磁温度变化曲线
Fig. 8 High temperature demagnetization temperature curve

根据 1.3 节的计算,交流消磁是将单根直径 2 mm 的导线通过中心孔缠绕三层磁屏蔽 8 圈,运用两台调压器产生 20 A 的工频交流电通入导线中,电流缓慢从 0 增到 20 A,保持 1 min,再缓慢降低到 0 完成消磁。

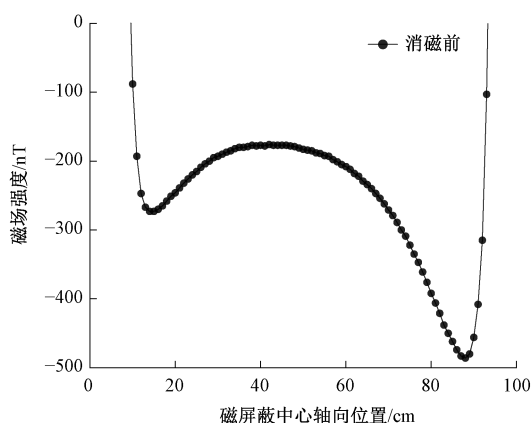


图9 消磁前中心轴向剩磁分布

Fig. 9 Distribution of central axial remanence before demagnetization

3.2 磁屏蔽轴向剩余磁场分布测量

根据2.2节的仿真,磁屏蔽内部的剩余磁场分布包含水平和竖直两个方向,但水平地磁场的影响很小且现有商用磁强计无法准确测量 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ nT 量级的磁场,实验上只对轴向的剩余磁场分布进行了测量。图10是利用Mag-01H磁通门磁强计以1 cm为间隔测量三层磁屏蔽消磁后的轴向磁场强度分布,

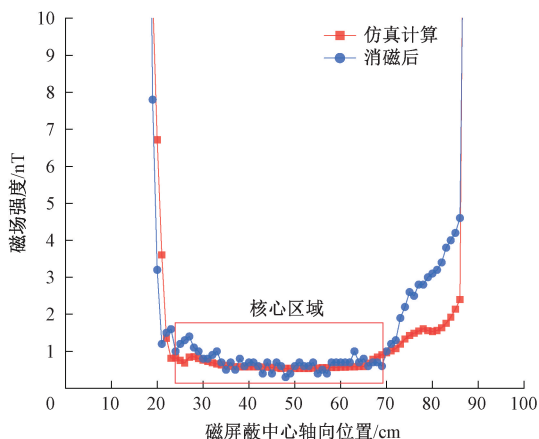


图10 消磁后中心轴向剩磁分布与仿真计算结果对比

Fig. 10 Comparison between the central axial remanence distribution after demagnetization and the simulation results

消磁后实验测量磁屏蔽中心磁场分布与仿真计算结果相一致,靠近磁屏蔽上端的测量结果差于仿真结果。20~80 cm 的范围内磁场强度起伏为2 nT,核心区域内磁场强度起伏 <1.3 nT,这样的结果满足超低温铯原子喷泉钟的应用需求。

3.3 磁屏蔽因子的测量

对于磁屏蔽因子,可以通过给磁屏蔽外加磁场进行

测量。由于磁屏蔽中心附近屏蔽因子较大和磁强计测量精度所限,实验上很难在磁屏蔽外围产生一个理想的均匀磁场。实际实验中制作了一个边长93 cm的正方形线圈,对磁屏蔽两端的屏蔽因子进行了测量。线圈缠绕106匝通入1 A电流能在中心产生 $1.47 \mu\text{T}$ 的磁场。

将方形线圈依次水平放置在磁屏蔽装置的两端,缓慢增加电流,计算中心处磁场的变化,同时测量磁屏蔽内部线圈中心磁场的变化,应用式(2)计算这个位置的磁屏蔽因子。测量结果如图11所示。磁屏蔽两端的屏蔽因子与仿真结果基本一致,两者偏差源自磁屏蔽结构的不理想,有理由相信磁屏蔽内部的屏蔽因子与仿真的结果接近。

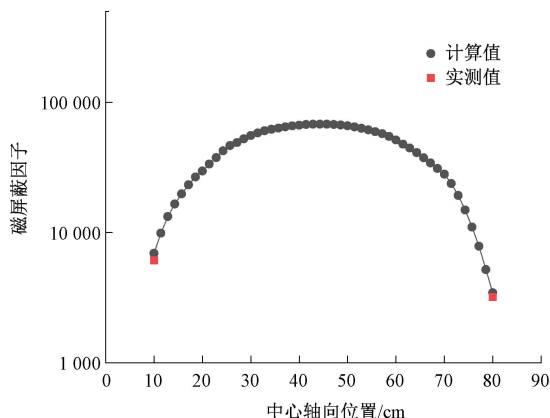


图11 磁屏蔽装置中心轴向磁屏蔽因子实测与仿真对比

Fig. 11 Comparison diagram of the measured and simulated axial magnetic shielding factor in the center of the magnetic shielding device

4 结论

针对超低温铯喷泉钟的结构特点,设计了相配套的磁屏蔽装置,通过选择开孔位置、选用高磁导率的磁屏蔽材料、运用仿真计算确定最佳层数、厚度、尺寸、层间间隔等参数,对加工成型的磁屏蔽装置进行了消磁处理,经过测试,磁屏蔽装置核心区域轴向磁场变化 <1.3 nT,两端位置屏蔽因子 $>10\,000$,中心区域屏蔽因子 $>60\,000$,研制的磁屏蔽满足超低温铯原子喷泉钟的应用需求。

参考文献

- [1] 王倩,魏荣,王育竹. 原子喷泉频标:原理与发展[J]. 物理学报, 2018, 67(16): 154-170.
WANG Q, WEI R, WANG Y ZH. Atomic fountain frequency standard: Principle and development[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(16): 154-170.
- [2] 王义道. 量子频标原理[M]. 北京: 科学出版社, 1986.

- WANG Y Q. Principle of quantum frequency standard[M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [3] WANG X L, RUAN J, LIU D D, et al. First evaluation of the primary frequency standard NTSC-CsF2 [J]. Metrologia, 2023, 60(6):065012.
- [4] 陈伟亮, 刘昆, 郑发松, 等. 长期稳定度 2.6×10^{-16} 的工程化高可靠铷原子喷泉钟[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2):79-86.
- CHEN W L, LIU K, ZHENG F S, et al. Engineering highly reliable Rb fountain clock with a long-term instability of 2.6×10^{-16} [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 79-86.
- [5] 王玉琢, 徐倩, 刘昆, 等. NIM5 驾驭氢钟守时能力分析[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2):129-136.
- WANG Y ZH, XU Q, LIU K, et al. Timekeeping capability analysis of steering hydrogen maser to NIM5[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2):129-136.
- [6] 王先华, 贾森, 郝安庆, 等. 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[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5): 1-9.
- WANG X H, JIA S, HAO AN Q, et al. Performance analysis and experiment study on multi-sectional cylindrical magnetic shield device used for atom interferometric measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(5): 1-9.
- [7] 张泽, 王心亮, 聂帅, 等. 超低温铯原子喷泉钟微波腔测试系统研制[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(3): 1-8.
- ZHANG Z, WANG X L, NIE SH, et al. Development of the ultra-low temperature cesium atomic fountain clock microwave cavity test system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(3): 1-8.
- [8] 杨帆. NTSC-F2 铯原子喷泉钟物理系统研制与黑体辐射频移研究[D]. 西安:中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2023.
- YANG F. Development of physical system of cesium atomic fountain clock NTSC-F2 and research on blackbody radiation frequency shift[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences), 2023.
- [9] HEAVNER T P, DONLEY E A, LEVI F, et al. First accuracy evaluation of NIST-F2[J]. Metrologia, 2014, 51(3): 174-182.
- [10] JEFFERTS S R, SHIRLEY J, PARKER T E, et al. Accuracy evaluation of NIST-F1[J]. Metrologia, 2002, 39(4): 321-336.
- [11] LEVI F, CALONICO D, CALOSSO C E, et al. Accuracy evaluation of ITCsF2: A nitrogen cooled caesium fountain[J]. Metrologia, 2014, 51(3): 270-284.
- [12] 王心亮. NTSC-F1 铯原子喷泉钟性能改进及二阶塞曼频移研究[D]. 西安:中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2017.
- WANG X L. Improvement of Cesium fountain clock NTSC-F1 and the study of second-order Zeeman frequency shift [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences), 2017.
- [13] 施俊如. NTSC-F2 喷泉钟二阶塞曼频移和马跃拉纳跃迁频移的研究[D]. 西安:中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2023.
- SHI J R. Study on the second-order Zeeman shift and the Majrana shift of the NTSC-F2 fountain bell [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences), 2023.
- [14] MENG Q ZH, WANG Z L, LIN Q J, et al. Theoretical analysis of a magnetic shielding system combining active and passive modes[J]. Nanomaterials, 2024, 14(6): 538.
- [15] 李中启, 熊鑫博, 孔彭生, 等. 无线充电系统电磁屏蔽与效率优化技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(5):151-162.
- LI ZH Q, XIONG X B, KONG P SH, et al. Research on electromagnetic shielding and efficiency optimization technology for wireless charging systems [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(5): 151-162.
- [16] XU X P, LIU W, HUANG Y J, et al. Magnetic shielding mechanism and structure design of composites at low frequency: A review[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2023, 570: 170509.
- [17] 潘志兵, 谢勇辉, 帅涛, 等. 新型高性能磁屏蔽系统在被动型氢原子钟上的应用[J]. 时间频率学报, 2021, 44(1): 45-54.
- PAN ZH B, XIE Y H, SHUAI T, et al. Application of new high-performance magnetic shielding assembly in passage hydrogen maser [J]. Journal of Time and Frequency, 2021, 44(1): 45-54.
- [18] 徐武嘉贝, 阙浩辉, 鲁涛, 等. 主动型氢原子钟磁屏蔽材料研究和结构的仿真分析研究[C]. 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 2024: 117-123.
- XU W J B, QUE H H, LU T, et al. Research and simulation analysis of active hydrogen atomic clock

magnetic shielding materials [C]. Academic Exchange Center of China Satellite Navigation System Management Office, 2024: 117-123.

[19] ĐEKIĆ S B, NIKEZIĆ D P, BRAJOVIĆ D V. Passive and active shielding against electromagnetic radiation[J]. Nuclear Technology & Radiation Protection, 2020, 35(4): 331-338.

[20] 孟祥鹏, 张建强, 徐静, 等. 静态法磁滞回线测量实验分析及微观机理解释[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31(9): 40-44.

MENG X P, ZHANG J Q, XU J, et al. Experimental analysis and microscopic mechanism explanation of static hysteresis loop measurement [J]. Laboratory Research and Exploration, 2012, 31(9): 40-44.

[21] 孙芝茵. 大型零磁装置的磁场分析方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

SUN ZH Y. Research on magnetic field analysis method of large-scale zero-magnetic device[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[22] 练云扬. 基于 SQUID 磁强计的超导重力仪磁屏蔽系统性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.

LIAN Y Y. Study on the performance of magnetic shielding system of superconducting gravimeter based on SQUID magnetometer [D]. WuHan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.

作者简介



毛晓亮, 2023 年于四川大学获得学士学位, 现为中国科学院国家授时中心在读博士生, 主要研究方向为铯原子喷泉钟。
E-mail: maoxiaoliang@ntsc.ac.cn



王心亮 (通信作者), 2005 年于济南大学获得学士学位, 2008 年于西北大学获得硕士学位, 2017 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为中国科学院国家授时中心研究员, 主要研究方向为冷原子物理与量子频标。
E-mail: wangxl@ntsc.ac.cn

Wang Xinliang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from the University of Jinan in 2005, M. Sc. degree from Northwest University in 2008, and Ph. D. degree from the University of Chinese Academy of Sciences in 2017. He is currently a researcher at the National Timing Center of the Chinese Academy of Sciences. His main research interests include cold atom physics and quantum frequency labeling.