

引用格式: 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.

新型高性能磁屏蔽系统 在被动型氢原子钟上的应用

潘志兵^{1,2}, 谢勇辉¹, 帅涛¹, 陈鹏飞¹, 裴雨贤¹,
潘晓燕¹, 赵阳¹, 徐昊天¹, 林传富¹

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 磁屏蔽系统有效地屏蔽了地球磁场和空间杂散磁场对氢原子跃迁信号的干扰, 在被动型氢原子钟中发挥着重要作用。一种高性能磁屏蔽材料构建的新型磁屏蔽系统在被动型氢原子钟投入使用, 磁屏蔽系数、磁滞回线、抗磁化能力以及磁敏感度等各项指标测试都优于传统磁屏蔽系统。新型磁屏蔽系统的重量仅为传统磁屏蔽系统的80%, 从而减轻了整机的重量。新型磁屏蔽系统的应用, 为被动型氢原子钟实现高质量高信噪比的氢原子跃迁信号, 以及保持其高精度高稳定度的时频信号打下了坚实的基础。

关键词: 被动型氢原子钟; 高性能磁屏蔽系统; 磁屏蔽系数; 磁滞回线; 抗磁化能力; 磁敏感度
DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2021-01-0045-10

Application of new high-performance magnetic shielding assembly in passive hydrogen maser

PAN Zhi-bing^{1,2}, XIE Yong-hui¹, SHUAI Tao¹, CHEN Peng-fei¹, PEI Yu-xian¹,
PAN Xiao-yan¹, ZHAO Yang¹, XU Hao-tian¹, LIN Chuan-fu¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The magnetic shielding assembly plays an important role in passive hydrogen maser (PHM), and effectively shields the interference of the earth's magnetic field and the space stray magnetic field on the hydrogen atom transition signal. A new type of magnetic shielding assembly constructed with high-performance magnetic shielding material is applied in PHM. It is better than the traditional one in various aspects, such as magnetic shielding coefficient, hysteresis loop, anti-magnetization ability, and magnetic sensitivity. In addition, the new magnetic shielding assembly weighs only 80% of the traditional one, and thus reduce the weight of PHM. The new magnetic shielding assembly provides better magnetic environment for the PHM to achieve high-quality

and high signal-to-noise ratio hydrogen atom transition signals and maintain its high accuracy and high stability of $0\mu\text{T}/\mu\text{T}$ signals of PHM.

Key words: passive hydrogen maser; high-performance magnetic shielding assembly; magnetic shielding coefficient; hysteresis loop; anti-magnetization ability; magnetic sensitivity

0 引言

被动型氢原子钟使用基态氢原子自 ($F = 1, m_f = 0$) 态至 ($F = 0, m_f = 0$) 态的超精细能级跃迁谱线对压控晶振进行鉴频锁定, 从而实现高准确度、高稳定性和低漂移率的时频信号输出, 并用于高精度计时。目前其长期频率稳定度可达 $3 \times 10^{-15}/\text{d}$, 频率漂移率小于 $5 \times 10^{-15}/\text{d}$, 已在卫星导航定位系统如北斗系统和伽利略系统中得到了广泛应用^[1-2]。

被动型氢原子钟的工作磁场一般约为 100 nT (1 mGauss), 远小于地球磁场和周围空间杂散磁场, 同时被动型氢原子钟一般会使用钛泵维持其高真空度, 而后者带有较大磁场强度的磁铁, 因此好的磁屏蔽系统是非常必要的。为了屏蔽地球磁场和其他空间杂散磁场对原子跃迁的干扰, 被动型氢原子钟一般采用高磁导率并经过细致热处理和大电流退磁后的坡莫合金 (permalloy) 同轴圆柱筒构建磁屏蔽系统, 以达到较好的屏蔽效果^[3]。

被动型氢原子钟物理部分结构图如图 1 所示。由图中可知, 内层磁屏蔽、中层磁屏蔽和外层磁屏蔽同轴线放置, 共同组成了磁屏蔽系统, 微波谐振腔位于内层磁屏蔽内部, 原子运动区域原子储存泡位于微波谐振腔内部。内层磁屏蔽的直径约为 10 cm, 高度约为 20 cm。中层磁屏蔽的直径约为 11 cm, 高度约为 22 cm。外层磁屏蔽的直径约为 12 cm, 高度约为 24 cm。每层磁屏蔽的厚度均为 1 mm, 3 个磁屏蔽筒同轴线等间距放置。

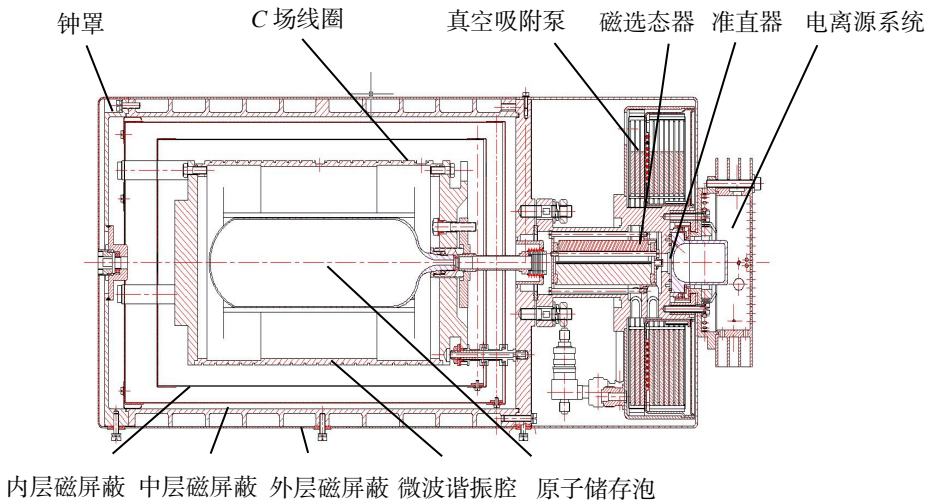


图 1 被动型氢原子钟物理部分结构图

磁屏蔽材料本身的剩余磁场要尽可能地小。磁屏蔽系统的性能决定了其抵抗外部磁干扰的能力, 进而影响氢原子钟原子跃迁信号幅度及其信噪比, 磁屏蔽系统的质量与被动型氢原子钟的性能指标息息相关。

1 磁屏蔽系统的分析和设计

被动型氢原子钟的跃迁谱线频率可用式 (1) 表示:

$$\nu = \nu_0 + 2766 \times H^2, \quad (1)$$

式 (1) 中, ν_0 为外磁场为 0 时的超精细能级跃迁频率, 其值为 $\nu_0 = 1420405751.768 \text{ Hz}$ 。

对式 (1) 求偏导, 可得到式 (2)^[4]:

$$\frac{\partial \nu}{\nu} = \frac{5532}{\nu} \times H^2 \times \left(\frac{\partial H}{H} \right) = 3.872 \times 10^{-6} \times H^2 \times \left(\frac{\partial H}{H} \right). \quad (2)$$

由式 (2) 可知, 被动型氢原子钟由于磁场微弱变化而引起的输出频率的变化与磁场 H 相关。磁场值 H 越大, 对其的稳定性要求就越高。因此, 要使得输出频率对磁场的磁敏感度较小, 且降低磁场的稳定性要求, 则磁场值 H 不宜取较大的值。

坡莫合金主要成分是铁和镍, 其最大特点是具有很高的弱磁场磁导率, 其含镍量不同其性能也有所差异。对于三层同轴圆柱形磁屏蔽筒, 其横向屏蔽因子可用下式 (3) 计算^[5-6]:

$$\frac{H_0}{H'} = \frac{1}{2} \frac{\mu_1 t_1}{r_1} \frac{\mu_2 t_2 (s_{12} - s_{12}^2 / 2r_2)}{r_2^2} - \frac{\mu_3 t_3 (s_{23} - s_{23}^2 / 2r_3)}{r_3^2}, \quad (3)$$

式 (3) 中, H_0 和 H' 分别是屏蔽外和屏蔽内的磁场强度, μ_1, μ_2, μ_3 分别是自内向外三层磁屏蔽筒材料的磁导率, 其余符号的意义如图 2 所示。屏蔽因子 H_0 / H' 随 μ 等参数的大小不同而不同。

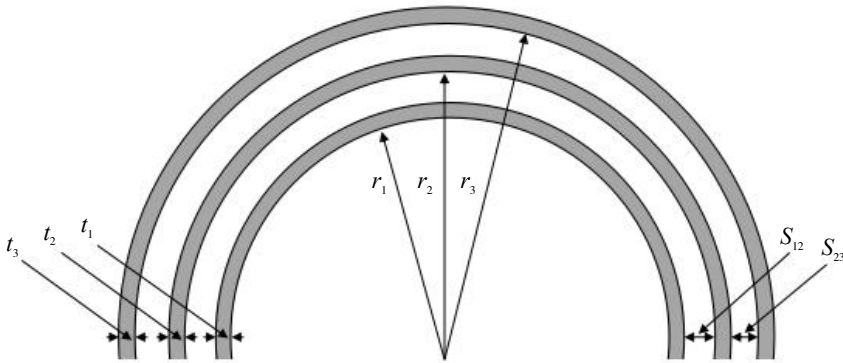


图 2 圆柱形磁屏蔽筒示意图

对于三层同轴圆柱形磁屏蔽筒, 其横向屏蔽因子还可以简单表示为式 (4)^[7-8]:

$$\frac{H_0}{H'} = \frac{1}{2} (\mu_1 \mu_2 \mu_3) \times (t'_1 t'_2 t'_3) \times (S_{12} S_{23}), \quad (4)$$

式 (4) 中, μ_1, μ_2, μ_3 是内层、中层、外层磁屏蔽材料在其具体磁感应强度下的磁导率, t'_1, t'_2, t'_3 是内层、中层、外层各层磁屏蔽的厚度与半径之比, S_{12}, S_{23} 代表内层和中层, 中层与外层之间的间距。由此可知, 如果在不大幅度更改磁屏蔽结构的话, 各层磁屏蔽的半径和各层之间的间距一般是不变的, 通过增加各层磁屏蔽的厚度也会对应增加磁屏蔽的重量, 因此, 通过使用新材料, 提高磁屏蔽的磁导率 μ_1, μ_2, μ_3 , 是提高磁屏蔽系统屏蔽系数的有效方法之一。

本单位被动型氢原子钟使用的新型磁屏蔽系统和传统磁屏蔽系统结构上基本一致, 两者的差异主要在于新型磁屏蔽筒采用了新型特种坡莫合金材料, 其重量仅为传统磁屏蔽系统的 80%, 且磁屏蔽系数更高, 磁滞回线更“窄”更“瘦”, 抗磁干扰能力和抗磁化能力均有较大提升, 为在微波腔内实现高质量高信噪比的氢原子跃迁信号创造了良好的条件。

2 磁屏蔽系统的性能测试

2.1 磁屏蔽系数

为了测试磁屏蔽系统的屏蔽系数，首先将三层圆柱形的磁屏蔽筒呈轴对称状态组装固定^[9]，并保持各个屏蔽层之间相互绝缘。磁屏蔽筒在装配完成后需要用低频大电流退磁，以去掉磁屏蔽筒中的剩磁，并改善磁场均匀度^[10]。

磁屏蔽筒完成大电流退磁后，将其放置在亥姆霍兹线圈（Helmholtz Coil）的中心区域。亥姆霍兹线圈^[11-13]是由两个相同的线圈同轴放置，其中中心间距等于线圈的半径。如果这两个线圈通以相同电流，磁场将会叠加增强，并在一定区域内形成均匀磁场。被测试的磁屏蔽筒放置在亥姆霍兹线圈的中心区域，高精度磁强计的探头放置在磁屏蔽系统内的中心轴线正中央处，以探测该点磁场 H' 。

在测量磁屏蔽系数的过程中，磁屏蔽系统空间内部各点的磁屏蔽系数是不一样的，某个具体位置的磁屏蔽系数无法充分代表整个磁屏蔽系统的指标。被动型氢原子钟谐振腔部分只占磁屏蔽系统内部的一部分，原子的运动区域原子储存泡又只占谐振腔内部的一部分，因此总体来说原子储存泡所在位置的磁屏蔽系数较为均匀一致。同时，原子的运动区域原子储存泡的长度约为 10 cm，而高精度磁强计的探头长度约为 5 cm，探头长度较长，所以选择将磁强计探头放置在原子储存泡的正中央处，以此处测量得到的磁屏蔽系数作为较为均衡的磁屏蔽系数指标。

恒流电源输出 2.5 A 电流到亥姆霍兹线圈上，后者产生正向或者反向大小为 200 μT （2 Gauss）的外界干扰磁场 H_0 ，此时高精度磁强计探头处的磁场测量值为 H' ，计算 H_0 / H' 即可得出磁屏蔽系数。在实验中，对传统和新型磁屏蔽筒分别进行了测量，整理实验数据后对两者的性能进行了比较。

在传统磁屏蔽筒测量实验中，亥姆霍兹线圈产生的外界干扰磁场 H_0 按照顺序 0 T \rightarrow +200 μT \rightarrow 0 T \rightarrow -200 μT \rightarrow 0 T 进行变化，高精度磁强计探头处 H' 的数值如表 1 所示。由表 1 的测量数据可计算出传统磁屏蔽筒的磁屏蔽系数约为 25 000。

表 1 传统磁屏蔽筒磁屏蔽系数测量数据

外界干扰磁场 H_0	磁屏蔽筒中心处磁场 H' / nT
0 T	-27.7
+200 μT	-36.8
0 T	-26.5
-200 μT	-18.8
0 T	-32.8
+200 μT	-37.1
0 T	-26.7
-200 μT	-18.7
0 T	-33.1
+200 μT	-37.7
0 T	-26.7
-200 μT	-18.8
0 T	-33.0

针对新型磁屏蔽筒的测试，亥姆霍兹线圈产生的外界干扰磁场 H_0 和上面保持一致，高精度磁强计探头处 H' 的数值如表 2 所示。由表 2 的测量数据可计算出新型磁屏蔽筒的磁屏蔽系数为 70 000 以上。

表 2 新型磁屏蔽筒磁屏蔽系数测量数据

外界干扰磁场 H_0	磁屏蔽筒中心处磁场 H' /nT
0 T	-28.2
+200 μ T	-31.7
0 T	-28.9
-200 μ T	-25.9
0 T	-29.2
+200 μ T	-31.9
0 T	-29.0
-200 μ T	-25.9
0 T	-29.2
+200 μ T	-32.0
0 T	-28.8
-200 μ T	-25.8
0 T	-29.1

由此可知，采用新型材料的新型磁屏蔽筒磁屏蔽系数得到了极大提高，可对被动型氢原子钟复杂的周围杂散磁场提供更优秀的磁屏蔽效果。

2.2 磁滞回线

为了全面评估外界干扰磁场 H_0 变化时磁屏蔽系统的状态变化，可在亥姆霍兹线圈中施加正负扫描电流测试其磁滞回线^[14-16]。在本次实验中，将恒流电源输出的-3 A 到+3 A 电流输入到亥姆霍兹线圈中，亥姆霍兹线圈会产生-240 μ T 到+240 μ T 的正反方向磁场施加在磁屏蔽系统上。依次将传统磁屏蔽筒和新型磁屏蔽筒放置在亥姆霍兹线圈的中心区域，测量磁屏蔽筒中心轴线正中央处的高精度磁强计探头的数值 H' 的变化，即可测试得出两种屏蔽筒的磁滞回线，如图 3 所示。

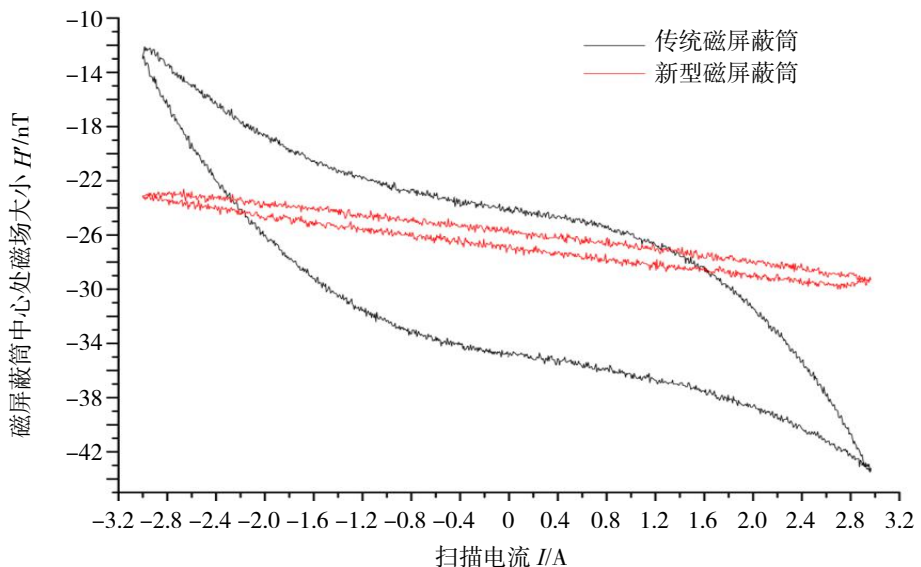


图 3 传统和新型磁屏蔽筒磁滞回线测量数据

从图 3 的数据可知，新型磁屏蔽筒的磁滞回线更“窄”更“瘦”，在同样的外界磁场干扰下，能更

大程度保持被动型氢原子钟微波腔的磁环境。

2.3 抗磁化能力测试

2.3.1 外部抗磁化能力测试

被动型氢原子钟在长期工作过程中会不断受到外界干扰磁场的影响,可能会导致磁屏蔽系统被重新磁化^[17]。因此,有必要检验磁屏蔽系统在外界干扰磁场作用下的磁性能保持情况。

测量中采用亥姆霍兹线圈模拟外部磁场干扰。模拟实验步骤如下:

① 从恒流电源输入到亥姆霍兹线圈的电流从 0 A 开始,每 1 s 递增 0.01 A,一直增加到 3 A,对应最大外加磁场为 240 μT ,此后从 3 A 每 1 s 递减 0.01 A,直到电流输入为 0 A,完成一次扫描。

② 在较长时间内重复步骤①,即可完成正方向磁场的循环扫描。

③ 此后更换恒流电流的输入方向,此时最大外加磁场为-240 μT ,在较长时间内重复步骤①和步骤②,即可完成反方向磁场的循环扫描。

④ 在较长时间内反复进行步骤①~③,即可完成外部磁场干扰的模拟测试。

图 4 和图 5 分别显示了传统和新型磁屏蔽筒在模拟外部磁场干扰测试下其中心轴线正中央处磁场 H' 的变化。

从图 4 数据可以计算出,传统磁屏蔽筒经历了 4 次共计 935 min 的正方向循环扫描和 4 次共计 783 min 的反方向循环扫描。正方向和反方向的循环扫描时间是随机的,时间或长或短,但其中心轴线正中央处磁场 H' 始终能够保持在其磁滞回线的范围内,内部剩余磁场变化为 7.33 nT,磁性能基本保持稳定。

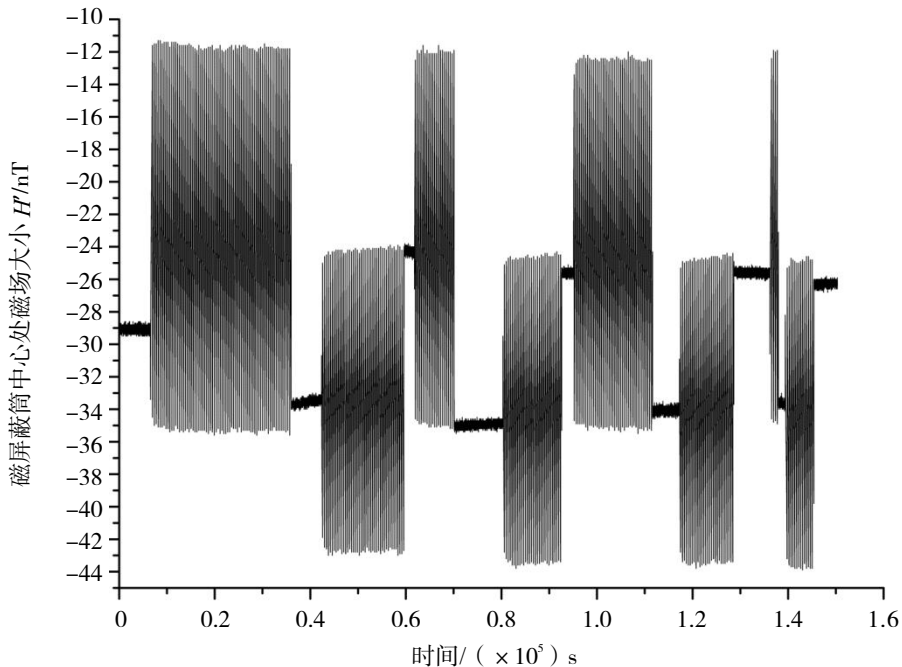
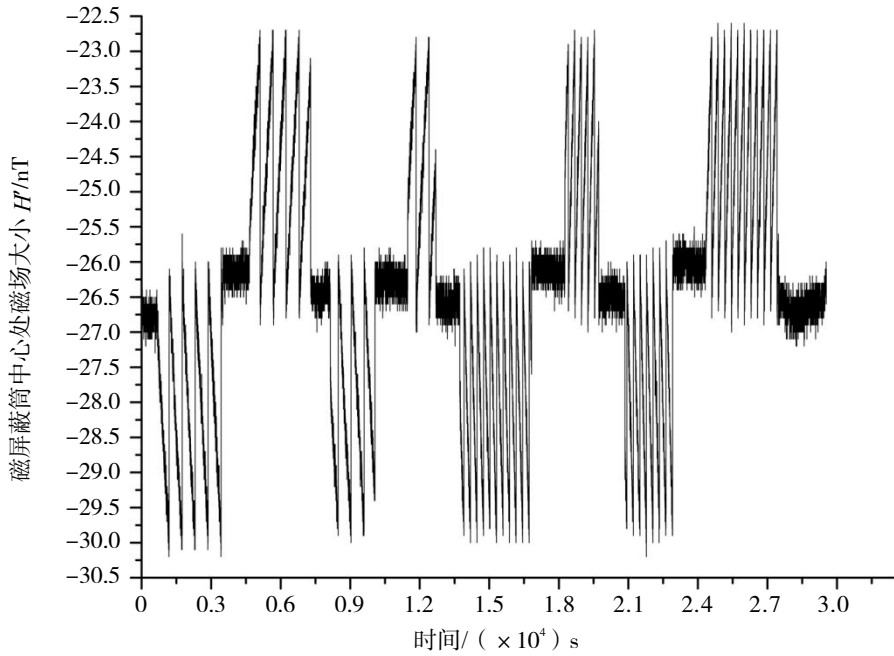


图 4 模拟外部干扰磁场测试的传统磁屏蔽筒中心处磁场 H' 数据

从图 5 数据可以计算出,新型磁屏蔽筒经历了 4 次共计 165 min 的反方向循环扫描和 4 次共计 141 min 的正方向循环扫描。正方向和反方向的循环扫描时间是随机的,时间或长或短,但其中心轴线正中央处磁场 H' 始终能够保持在其磁滞回线的范围内,内部剩余磁场变化为 0.57 nT,其磁性能变化幅度远小于传统磁屏蔽筒,能在更小的范围内保持稳定。

图 5 模拟外部干扰磁场测试的新型磁屏蔽筒中心处磁场 H' 数据

2.3.2 内部抗磁化能力测试

被动型氢原子钟磁屏蔽系统内部设置有 C 场线圈,在特定测试场景下会产生数百倍于基态氢原子跃迁所需磁场(约 100 nT)的强磁场,易导致磁屏蔽系统被磁化。因此磁屏蔽系统的内部抗磁化能力也是一项重要的性能指标。

为了测试磁屏蔽系统的内部抗磁化能力,将在 C 场线圈上依次施加不同方向不同大小的电压,从而产生强度较高的内部干扰磁场。测试前标定内部剩余磁场,测试后再次标定内部剩余磁场,从而判断磁屏蔽系统的内部抗磁化能力。在测试过程中,将分别进行循环扫描测试和定值压力测试两项测试。

表 3 和表 4 分别展示了这两种磁屏蔽筒内部抗磁化能力的循环扫描测试数据。在循环扫描测试过程中, C 场电压从 0~2 V 变化,每次变化 0.01 V,每次变化维持 1 s,循环维持长达一个小时的测试时间,施加过程中最大磁场约为 120 000 nT,并测定正向和反向两个方向的数据。

对于传统磁屏蔽筒,其内部抗磁化能力的循环扫描测试数据如表 3 所示。在正向循环扫描过程中,传统磁屏蔽筒测试前后的内部剩余磁场分别为-14.4 nT 和+1.3 nT,其磁场变化量为+15.7 nT。在反向循环扫描过程中,传统磁屏蔽筒测试前后的内部剩余磁场分别为+1.3 nT 和-7.9 nT,其磁场变化量为-9.2 nT。

表 3 传统磁屏蔽筒内部抗磁化能力循环扫描测试

C 场方向	持续时间/h	初始值/nT	结束值/nT	变化量/nT
正向	1	-14.4	+1.3	+15.7
反向	1	+1.3	-7.9	-9.2

对于新型磁屏蔽筒,其内部抗磁化能力的循环扫描测试数据如表 4 所示。在正向循环扫描过程中,新型磁屏蔽筒测试前后的内部剩余磁场分别为-26.9 nT 和-25.8 nT,其磁场变化量为+1.1 nT。在反向循环扫描过程中,新型磁屏蔽筒测试前后的内部剩余磁场分别为-25.8 nT 和-26.6 nT,其磁场变化量为-0.8 nT。

表 4 新型磁屏蔽筒内部抗磁化能力循环扫描测试

C 场方向	持续时间/h	初始值/nT	结束值/nT	变化量/nT
正向	1	-26.9	-25.8	+1.1
反向	1	-25.8	-26.6	-0.8

由表 3 和表 4 的测试数据可知,新型磁屏蔽筒在循环扫描测试过程中其内部抗磁化能力远优于传统磁屏蔽筒。

表 5 和表 6 分别展示了这两种磁屏蔽筒内部抗磁化能力的定值压力测试数据。在定值压力测试过程中, C 场线圈上施加了较高的 2 V 定值电压,产生约为 120 000 nT 的磁场,保持长达 30 min 的施加时间,并测定正向和反向两个方向的数据,以判断强磁场对磁屏蔽系统的影响。

对于传统磁屏蔽筒,其内部抗磁化能力的定值压力测试数据如表 5 所示。在正向定值压力测试过程中,传统磁屏蔽筒测试前后的内部剩余磁场分别为+3.6 nT 和-3.6 nT,其磁场变化量为-7.2 nT。在反向定值压力测试过程中,传统磁屏蔽筒测试前后的内部剩余磁场分别为-3.6 nT 和+3.3 nT,其磁场变化量为+6.9 nT。

表 5 传统磁屏蔽筒内部抗磁化能力定值压力测试

C 场方向	持续时间/min	初始值/nT	结束值/nT	变化量/nT
正向	30	+3.6	-3.6	-7.2
反向	30	-3.6	+3.3	+6.9

对于新型磁屏蔽筒,其内部抗磁化能力的定值压力测试数据如表 6 所示。在正向定值压力测试过程中,新型磁屏蔽筒测试前后的内部剩余磁场分别为-27.6 nT 和-24.3 nT,其磁场变化量为+3.3 nT。在反向定值压力测试过程中,新型磁屏蔽筒测试前后的内部剩余磁场分别为-24.3 nT 和-26.9 nT,其磁场变化量为-2.6 nT。

表 6 新型磁屏蔽筒内部抗磁化能力定值压力测试

C 场方向	持续时间/min	初始值/nT	结束值/nT	变化量/nT
正向	30	-27.6	-24.3	+3.3
反向	30	-24.3	-26.9	-2.6

由表 5 和表 6 的数据可知,新型磁屏蔽筒在定值压力测试过程中其内部抗磁化能力也优于传统磁屏蔽筒。

3 磁屏蔽系统在氢钟的应用

完成传统和新型磁屏蔽筒的磁屏蔽系数,磁滞回线以及抗磁化能力测试后,将其依次安装在同一台被动型氢原子钟上,并将其作为唯一可变量。被动型氢原子钟整机放置在亥姆霍兹线圈的中心区域,其锁定后,输出的 10 MHz 信号与参考源信号进行比对,即可进行整机输出频率磁敏感度指标的测试,测试框图如图 6 所示。

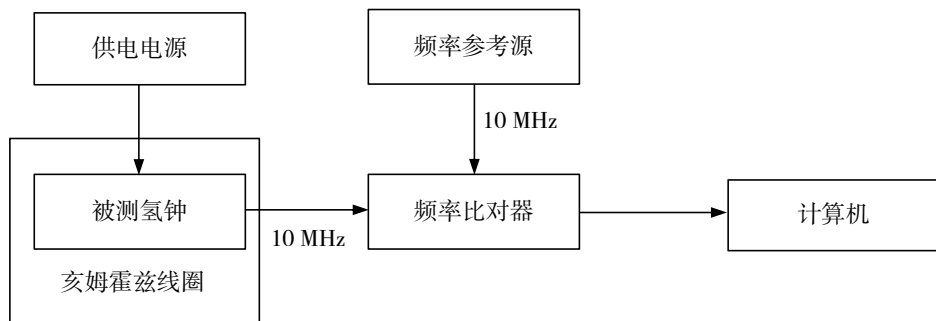


图 6 被动型氢原子钟磁敏感度测试框图

在测试过程中，通过亥姆霍兹线圈依次施加正方向和反方向大小为 $200 \mu\text{T}$ 的外界磁场，按照“外界磁场为 $0 \rightarrow$ 外界磁场为 $+200 \mu\text{T} \rightarrow$ 外界磁场为 $0 \rightarrow$ 外界磁场为 $-200 \mu\text{T} \rightarrow$ 外界磁场为 0 ”进行测试。测试其输出频率的变化，即可计算得出整机的磁敏感度指标。

装备传统磁屏蔽系统的整机磁敏感度，一般情况下约为 $2 \times 10^{-9}/\text{T}$ ($2 \times 10^{-13}/\text{Gauss}$)。

图 7 和图 8 展示了装备新型磁屏蔽系统的整机磁敏感度测量数据。从图 8 数据可知，新型磁屏蔽筒的磁敏感度为 $5.78 \times 10^{-10}/\text{T}$ ($5.78 \times 10^{-14}/\text{Gauss}$)，优于传统磁屏蔽系统的数据。

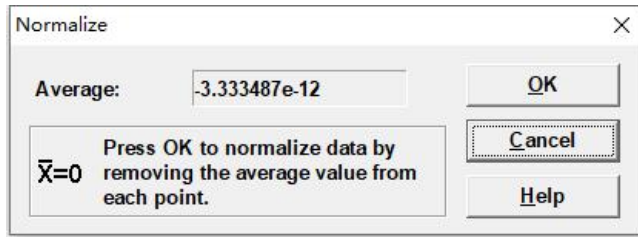
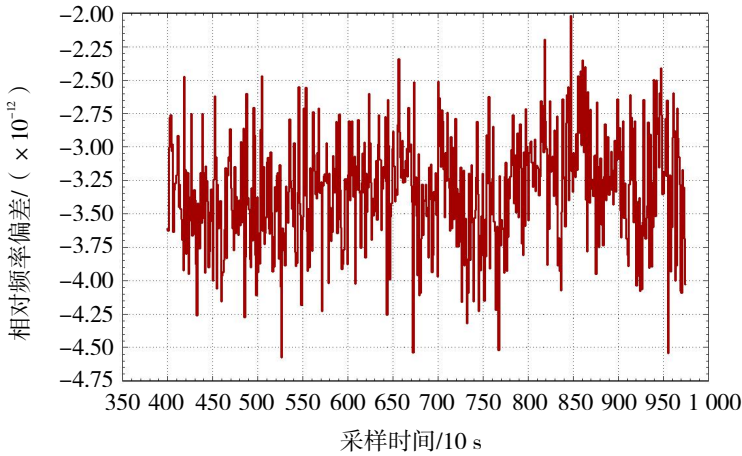


图 7 新型磁屏蔽筒磁敏感度测量数据 (0 T)

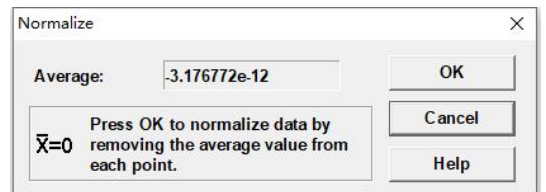
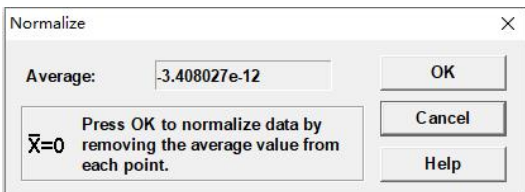
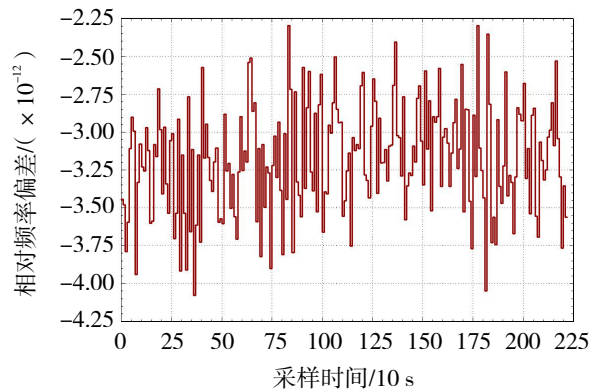
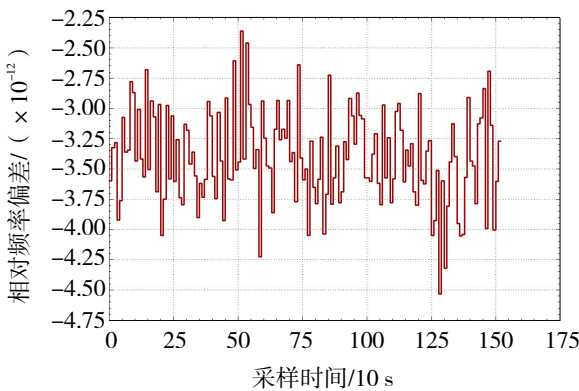


图 8 新型磁屏蔽筒磁敏感度测量数据 (左: $+200 \mu\text{T}$, 右: $-200 \mu\text{T}$)

4 结语

被动型氢原子钟的发展方向是在进一步提高其性能指标的同时实现其更小体积和更轻重量。以新型磁屏蔽材料为核心构建的新型高性能磁屏蔽系统使用了三层磁屏蔽筒设计,其体积和传统磁屏蔽筒相当,但其重量大大减轻,仅为传统磁屏蔽筒的 80%,其磁屏蔽系数可达 70 000 以上,磁滞回线更优,抗磁化能力更强,整机磁场敏感度优于 $1 \times 10^{-9}/T$ ($1 \times 10^{-13}/\text{Gauss}$),为实现高质量、高信噪比的原子跃迁信号和高准确度、高稳定度的被动型氢原子钟时频信号提供了坚实保障。

参考文献:

- [1] 谢军,王金刚.北斗-3 卫星的创新和技术特点[J].国际太空,2017(11):6-9.
- [2] 钦伟瑾,葛玉龙,杨旭海.伽利略星载被动型氢原子钟性能评估[J].仪器仪表学报,2018(10):93-99.
- [3] 张为群,何克亮.主动型氢脉泽物理系统的小型化[J].计量学报,2015,36(6):638-641.
- [4] 张为群.氢脉泽磁屏蔽的改进与性能测定[J].中国科学院上海天文台年刊,1997:209-213.
- [5] 王义遒.量子频标原理[M].北京:科学出版社,1986:7.
- [6] 冷如冰,王瑞,戴家瑜.基于计算机仿真的被动型氢钟磁屏蔽系统磁场分析[J].中国科学院上海天文台年刊,2016:49-58.
- [7] VANIER J, AUDOIN C. The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards[M]. Bristol and Philadelphia: Adam Hilger, 1989. 937-940.
- [8] 王文明,代克,张燕军,等.新型氢脉泽磁屏蔽的设计[J].时间频率学报,2010,33(1):54-61.
- [9] 裴雨贤,林传富.用磁场线圈产生磁屏蔽效果在氢钟上运用的可行性分析[J].中国科学院上海天文台年刊,2011:114-120.
- [10] 冷如冰,王瑞,刘铁新,等.被动型氢原子钟退磁装置设计[J].电子测量技术,2018(4):76-80.
- [11] 叶邦角.电磁学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2014.
- [12] 高静,孙鑫,刘俊伟.亥姆霍兹线圈磁场空间分布的研究[J].科技通报,2018,34(7):34-37.
- [13] 宋新昌.亥姆霍兹线圈及麦克斯韦线圈磁场分布及均匀性比较[J].磁性材料及器件,2016,47(5):16-18.
- [14] 王建国,邵雪辉.磁滞回线的物理机理[J].河北建筑工程学院学报,2001(3):90-92.
- [15] 冯本珍.铁磁材料磁滞回线的研究[J].中国科技信息,2006(22):307-308+311.
- [16] 常清英,李春燕,金仲辉.从磁滞回线了解铁磁性材料的性能[J].物理通报,2011(6):72-73.
- [17] 彭向凯.空间冷原子钟关键技术研究[D].北京:中国科学院大学,2019.