

用磁场线圈产生磁屏蔽效果在氢钟上运用的可行性分析

裴雨贤^{1,2}, 林传富¹

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 随着中国航天技术的发展, 对小型化的氢原子钟的需求越来越迫切。在减小体积和重量的前提下为保持氢钟现有的工作指标, 对现有的氢钟物理条件提出了更高的要求, 其中包括在氢钟屏蔽层数减少时保持磁屏蔽系数不变。原理分析、计算仿真了高磁导材料和磁场线圈 2 种屏蔽方法在氢钟上使用的优劣性, 并通过对比实验验证了在氢钟上使用磁场线圈代替磁屏蔽材料产生磁屏蔽效果的可行性。

关键词: 小型化; 磁屏蔽系数; 磁场线圈; 可行性

中图分类号: TB939, TH714.1⁺4

1 磁场线圈使用背景

氢钟是 20 世纪 60 年代的产物, 发展到现在无论在理论上还是技术运用上都已经非常成熟, 提高氢钟的稳定度和小型化是当前发展的方向^[1]。对于氢钟小型化, 在现有技术指标下减小氢钟体积和重量的要求更为迫切。在实际运用中, 减少氢钟体积和重量的最直接的方法就是减少磁屏蔽层数。但是对于氢钟物理部分来说, 大部分的结构空间受到了屏蔽系统的限制, 只有部分区域满足氢钟稳定工作的磁场条件。层数的减少不但缩小了氢钟正常工作的磁场区域, 而且其带来的磁屏蔽系数的降低会严重影响氢钟工作的稳定度。另外, 屏蔽材料自身也存在缺点, 比如在初始磁导率不足的情况下其在弱磁场和强磁场中的表现并不理想。因此, 考虑用磁场线圈实现屏蔽层的功能, 以减少氢钟在减小体积和重量过程中所产生的负面效应。

2 磁场屏蔽的途径

现阶段, 屏蔽磁场的方法主要有主动型屏蔽和被动型屏蔽 2 种方法。

(1) 主动型屏蔽是对电介质通电使其产生磁场, 抵消外界磁场, 达到屏蔽效果。如图 1 所示, 将长螺线管放入均匀磁场环境中, 螺线管通电后产生了与外界反向的磁场, 将其内部的磁感应线“搬移”到螺线管外, 使螺线管内部磁场值远小于外界磁场从而达到磁屏蔽效果。实际运用有: 磁通门磁强计缠绕在探头上的置零线圈、屏蔽地磁场的三维亥姆霍兹线圈等。

(2) 被动型屏蔽是利用铁磁材料的强磁导率改变空间磁路, 使空间分布的磁力线都集中在铁磁材料上, 从而使其他区域的磁场值降低到一个很小的数值。如图 2 所示, 将高磁导率

的材料放入匀强磁场中，其附近的磁力线被“吸引”到材料周围沿着材料表面走向分布，使材料腔部磁场远小于外界磁场。实际运用有：氢钟上的四层屏蔽筒以及各种类型的屏蔽筒。

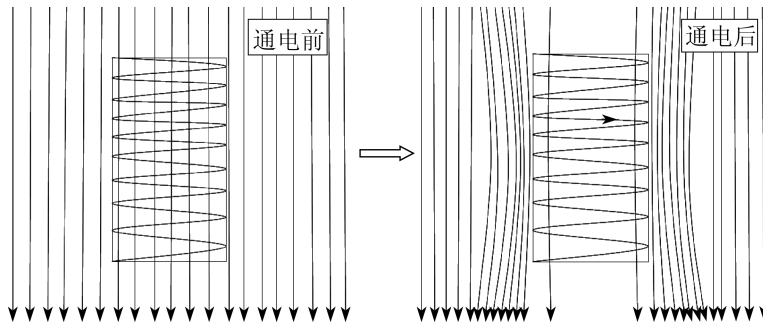


图 1 螺线管的屏蔽效应图

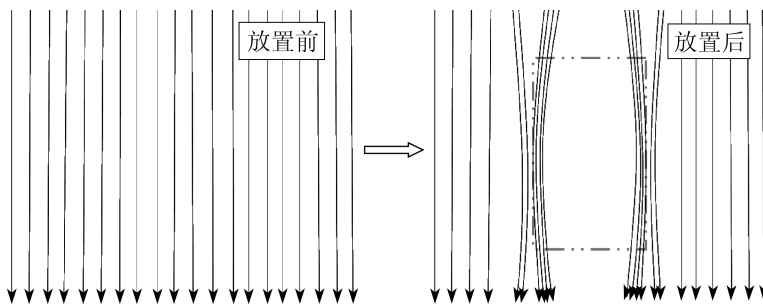


图 2 屏蔽材料的屏蔽效应图

3 屏蔽筒内部磁场分布的理论分析

氢钟采用被动型屏蔽磁场的方法：玻莫合金材料做成若干封闭的圆柱筒，按照形状大小依次嵌套使屏蔽筒中心磁场最小^[2]，因为氢钟工作原理主要关心与微波场磁分量方向平行的磁场分量，所以只考虑沿 Z 轴方向的磁场分量。我们通过 maxwell 仿真软件定性分析氢钟屏蔽筒内部磁场的分布情况：首先按照 1:1 的比例画出氢钟其中一层磁屏蔽的模型，其次使用亥姆霍兹线圈模拟地磁场得到较为接近实际情况的物理环境，最后给定材料的初始磁导率得出仿真结果，如图 3、4 所示。

由图 4 可以得出：①对于圆柱筒形状的屏蔽层，由于顶部、底部与侧面的不平滑过渡，使得磁感应线通过屏蔽筒时分为 2 部分：小部分磁感应线穿透屏蔽层进入屏蔽筒，其余大部分磁感线被迫沿磁屏蔽筒外侧走向分布；②穿透进入屏蔽筒的磁感应线也顺着磁路逐渐沿着内层屏蔽筒走向分布；③开孔处磁力线能够直接进入屏蔽材料中，但是屏蔽材料本身影响了磁力线的走向。假设初始磁力线的方向是沿着 Z 轴正方向，由于屏蔽材料的吸引会使其偏离 Z 轴正方向。以上因素使得磁感应线在过渡区域分布相当混乱，从而造成了 2 个面的衔接处的磁场波动。

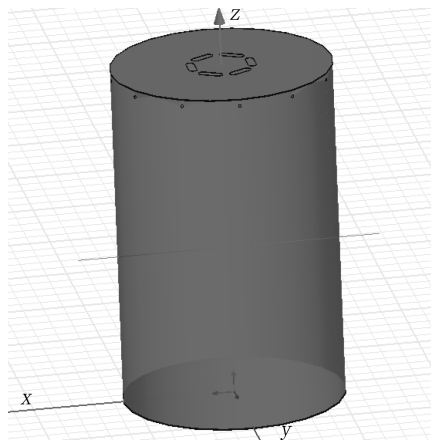


图3 氢钟磁屏蔽模型

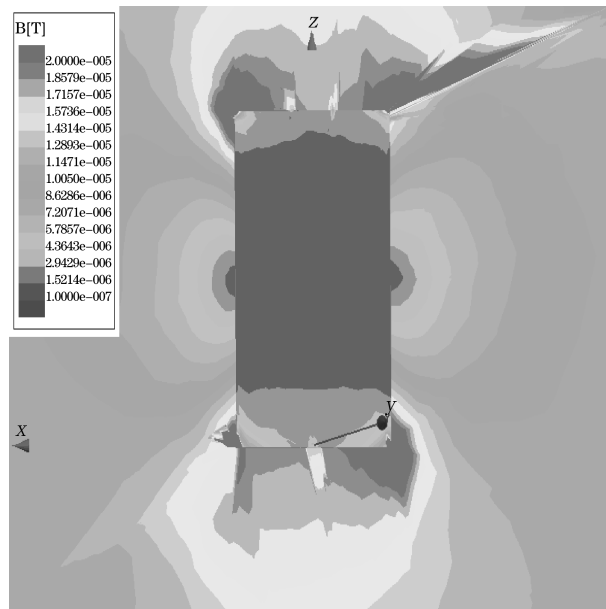


图4 磁屏蔽仿真效果图

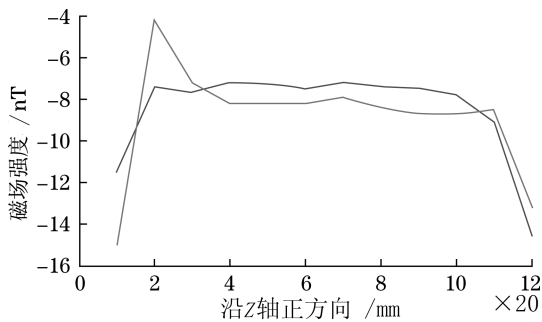


图5 2套屏蔽筒内部磁场分布图

使得磁场大小在屏蔽筒中心磁场最小, 两端随着离开中心距离的增加磁场绝对值逐渐增大(两端符号不同)。

以上是磁屏蔽筒一系列缺点。理论上, 我们可以通过增加屏蔽层数的方法弥补这些缺点, 但是设备的重量将会增加, 而如果层数减少, 会暴露这些问题。

4 磁场线圈内部磁场分布的理论分析

使用磁场线圈产生磁场来抵消外界磁场是主动型屏蔽磁场的方法。在氢钟内部, 由于磁屏蔽层部分的结构已经确定为圆柱体结构, 磁场线圈的形状、绕法以圆柱体为支撑较好装配, 因此使用长螺线管作为磁场线圈的基本单元是较好的选择。

在实际屏蔽层中, 内部磁场分布情况还受到材料的磁导率的变化、工艺制作和开孔位置等因素的影响, 因而磁场分布的均匀程度更加不理想, 另外还具有有一定不规则性的缺点。例如, 2套屏蔽筒以相同的方式装配、退磁后, 测量中心区域的磁场也有显著的区别, 如图5所示。

除了这些因素的影响, 考虑到外界磁场是个三维的变量, X、Y方向的磁场对屏蔽筒中心区域的Z轴方向磁场也有影响:

4.1 螺线管的数学描述

螺线管可以看成多个螺旋线圈的组合物，因此可以先从单个螺旋线圈进行分析。设单个螺旋线圈的柱坐标方程^[3]为：

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \\ z = \rho \theta \end{cases}$$

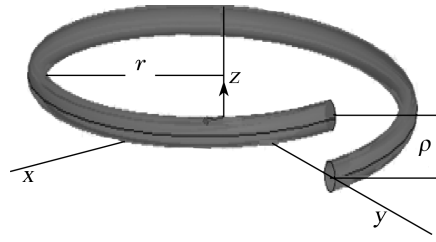


图 6 2 套屏蔽筒内部磁场分布图

其中 r 与 ρ 的意义见图 6。

假设通过螺旋线圈的电流强度为 I ，在线圈上任意一点 (x, y, z) 取单位电流源 $I d\mathbf{l}$ ，则该电流源在空间任意一点的磁场强度^[4]为：

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_n I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{4\pi r^2} .$$

又因为 $d\mathbf{l} = (dx, dy, dz) = (-r \sin \theta d\theta, r \cos \theta d\theta, 2\rho \pi d\theta)$ ， $\mathbf{r} = (x_0 - x, y_0 - y, z_0 - z)$ ，则

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_n I}{4\pi \left((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 \right)^{3/2}} \left[(r(z_0 - z) \cos \theta - \rho(y_0 - y)) d\theta + (r(z_0 - z) \sin \theta + \rho(x_0 - x)) d\theta \mathbf{j} + (r(y - y_0) \sin \theta + r(x - x_0) \cos \theta) d\theta \mathbf{k} \right] ,$$

$$d\mathbf{B}_z = \frac{\mu_n I}{4\pi \left((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 \right)^{3/2}} \left(r(y - y_0) \sin \theta + r(x - x_0) \cos \theta \right) .$$

单个螺旋线圈在空间任意一点 z 轴方向上产生的磁场强度为：

$$B_z = \int_0^{2\pi} d\mathbf{B}_z .$$

设螺线管由 n 个螺旋线圈组成，总长度为 l ，则整个螺线管在该点所产生的磁场为：

$$\begin{aligned} B_z &= \int_0^l \int_0^{2\pi} d\mathbf{B}_z dz \frac{\mu_n I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{r(y - y_0) \sin \theta + r(x - x_0) \cos \theta}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \\ &\quad \left(\frac{1 + \rho\theta - z_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (1 + \rho\theta - z_0)^2}} - \frac{\rho\theta - z_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (\rho\theta - z_0)^2}} \right) d\theta \\ &= \frac{\mu_n I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{r(r \sin \theta - y_0) \sin \theta + r(r \cos \theta - x_0) \cos \theta}{(r \cos \theta - x_0)^2 + (r \sin \theta - y_0)^2} \\ &\quad \left(\frac{1 + \rho\theta - z_0}{\sqrt{(r \cos \theta - x_0)^2 + (r \sin \theta - y_0)^2 + (1 + \rho\theta - z_0)^2}} - \frac{\rho\theta - z_0}{\sqrt{(r \cos \theta - x_0)^2 + (r \sin \theta - y_0)^2 + (\rho\theta - z_0)^2}} \right) d\theta , \end{aligned} \tag{1}$$

5 Matlab 数值分析

将式(1)归一化,设定螺线管的长度为300,半径为100,螺旋系数为1,通过Matlab仿真得出螺线管内部磁场分布,如图7所示。

由图7可以得出,螺线管产生的磁场在空间上分布比较均匀。此外由于螺旋管是通过电流来产生磁场,可控性较好,能使其内部磁场达到一个很小的数值以达到我们物理条件的需求。图8是螺线管与屏蔽层内部磁场均匀度的对比图。长度相近的前提下,磁场线圈内磁场均匀区域较广,且不受加工、物理形状的影响,具有可控性、重复性强等优点。

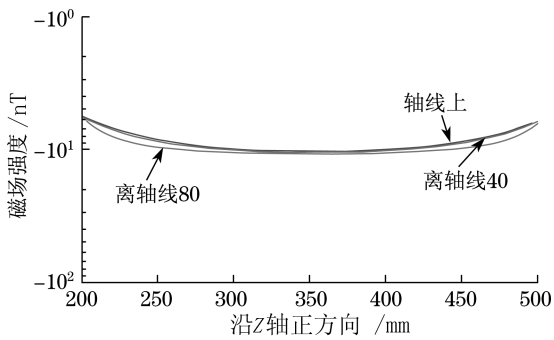


图7 螺线管内部磁场分布图

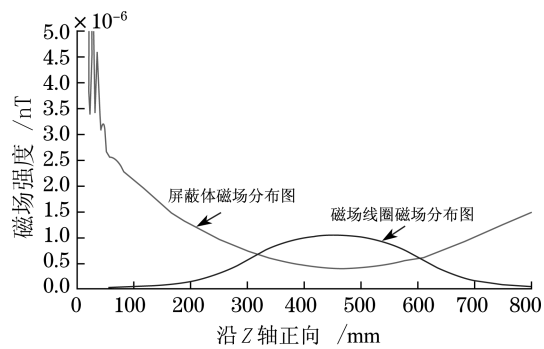
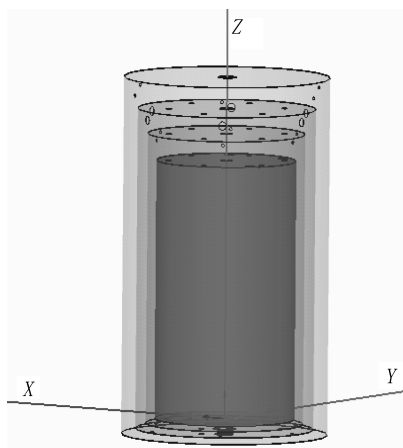
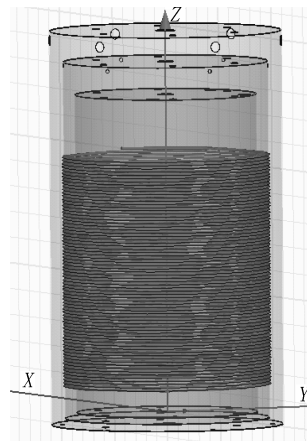


图8 磁场线圈与屏蔽层内部磁场分布图



(a) 氢钟四层屏蔽装配图



(b) 氢钟三层屏蔽装配图

图9 氢钟三、四层屏蔽装配图对比

6 磁场线圈实验验证

在氢钟三层屏蔽中的次内层上均匀缠绕长度约为180 mm的螺线管,与四层屏蔽进行磁场均匀度的对比试验,如图9所示。组装后,退磁并测量两者中心区域轴线上的磁场大小。

图 10 是磁场线圈工作前与工作后三层屏蔽同四层屏蔽的对比图。通过对比可知, 磁场线圈工作时可以明显地降低屏蔽体中心区域的剩磁大小: 磁场线圈未通电状况下剩磁大小为 6~10 nT, 通电后为 4~0.5 nT, 与四层屏蔽相比在数值上比较接近 (四层屏蔽剩磁大小为 1.8~2.8 nT), 能够满足氢钟的磁场要求。这一点也证明了氢钟在减重工作中考虑结构时利用一组磁场线圈替代屏蔽层的可行性。

但是磁场线圈在中心区域的均匀度方面略有不足, 可能是由于试验中磁场线圈长度只有 180 mm, 限制了磁场均匀度的分布。通过增加磁场线圈的长度、调整控制电流应该会取得更好的效果。将在后续工作中针对线圈的尺寸做进一步的改进, 同时为保证磁场的稳定性, 在电流控制方面将深入研究。

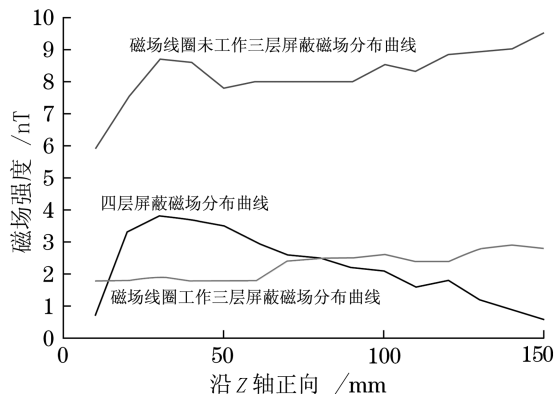


图 10 氢钟四层屏蔽与三层屏蔽内部磁场分布图

7 总结

本文通过原理分析、计算仿真和试验的方法, 阐述并论证了使用磁场线圈提高屏蔽整体性能的方法。基于磁屏蔽体本身缺点的限制和氢钟小型化的需求, 磁场线圈在氢钟上的运用是一种有效的途径。因此, 合理地设计符合实际要求的磁场线圈以及实现控制方法是今后工作的重点。

致谢: 感谢上海天文台时频中心的老师和同学给予的支持和帮助。

参考文献:

- [1] 翟造成, 张为群, 蔡勇等. 原子钟基本原理与时频测量技术. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2009: 63
- [2] Kleppner D, BERG H C, CRAMPTON S B. Physical review, 1965, 138(4): 972-980
- [3] 冯旺军, 魏志强, 赵伟等. 电子学报, 2005, 25(4): 13-16
- [4] 吴泽华, 陈治中, 黄正东等. 大学物理. 浙江: 浙江大学出版社, 2005: 15

The Feasibility Analysis of Magnetic Solenoid that Yields Magnetic Shielding Function used in the Hydrogen Clock

PEI Yu-xian^{1,2}, LIN Chuan-fu¹

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

Abstract: With the development of Chinese space technology, the miniaturization of the hydrogen clock is an impatient need. Under the premise of maintaining the current performance index of the hydrogen clock, reducing size and weight puts existing physical conditions of the hydrogen clock a higher requirements — reducing the numbers of magnetic shielding and keeping the magnetic shielding factor unchanged. In this paper, by principles analysis, computer simulation of the high-permeability magnetic materials and magnetic coil advantages and disadvantages of being used in hydrogen clock, and by the Comparative experiments verify the feasibility that the magnetic field coil can be used in hydrogen clock, instead of magnetic materials for yielding magnetic shielding function

Key words: Hydrogen Clock; Miniaturization; magnetic shielding factor; magnetic field coil