

一种应用于空间氢钟的 C 场组件设计

王文明

(北京无线电计量测试研究所, 北京 100039)

摘要: 基于零磁环境下, 以空间主动氢脉泽对 C 场组件实际功能要求为设计依据, 首先借助电磁理论, 同时兼顾工程设计确定中心场及补偿场线圈的绕制方法及圈数; 其次通过通电螺线圈的经验公式计算获得目标均匀静磁场所需要的稳恒电流; 最后借助仿真优化及实验验证, 确定中心场及补偿场线圈电流分别为 0.378mA 和 0.259mA 时可实现小于 1% 的场不均匀度, 由此引起的氢钟磁场不均匀频移可以忽略。

关键词: C 场组件; 空间氢钟; 磁场

中图分类号: TH714 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2016)01-0060-04

A Design of C-field for Space Hydrogen Maser

WANG Wen-ming

(Beijing Institute of Radio Metrology and Measurement, Beijing 100039, China)

Abstract: Based on the requirement for hydrogen maser design constraints, the C-field is designed without considering the effect of magnetic shield in this paper. First, winding coil method and number of laps are gotten from the basic electromagnetic theory and engineering design point of views, then the target steady current which can generate a uniform magnetic field is calculated by Biot-Savart law, and finally when the main and auxiliary coil current are set at 0.378mA, 0.259mA respectively by numerical calculation, simulation and experiment, the magnetic field inhomogeneous is less than 1% which can be neglected.

Key words: C-field; Space hydrogen maser; Magnetic field

0 引言

氢钟作为一种时间频率测量设备, 以其高准确度 and 良好的中长期稳定度广泛应用于卫星导航与定位、深空探测、基础理论研究等领域。C 场是氢钟当中的关键组件, 主要用于产生一个均匀、稳恒的弱磁环境, 使氢原子 $F=1, m_f=0$ 态的磁能级与其他三个磁能级分开^[1], 同时保持磁矩处于某一特定取向。其产生磁场的大小尤其均匀度决定着氢钟的准确度及稳定度水平。

虽然传统氢钟 C 场组件的设计方案及制作工艺均已固化, 但无法满足工作于空间环境的氢钟^[2]。这不仅是因为其结构要根据相关联组件重新做适配设计, 而且其设计工艺不满足空间氢钟内的高真空环境要求。因此, 需对 C 场组件重新做结构和工艺设计。

1 C 场组件的结构设计

C 场组件位于微波腔与内层屏蔽之间, 其在泡区磁场的方向与微波腔磁矢量方向相同, 其圆筒

收稿日期: 2015 - 07 - 14; 修订日期: 2015 - 09 - 22。

作者简介: 王文明 (1985 -), 男, 博士, 高工, 主要从事地面守时主动氢钟、空间主动氢钟及星载被动氢钟方面的研究。E-mail: wwm_Kingdom@163.com

状设计恰好与 H_{011} 腔同轴。应用于地面氢钟的 C 场组件多暴露于大气环境，通常采用 PCB 制作，工艺简单可靠且线圈均匀（见图 1），但存在材料放气及受力易变形引起磁场分布变化的不足。空间氢钟的 C 场组件工作环境为高真空，对所选用材料放气率有特殊要求。设计中，以钛材制成的微波腔紧固筒同时作为 C 场导线的结构筒，考虑到可靠性设计要求，选用低放气率绝缘镀层材料的导线，在导线与微波腔紧固筒之间包覆一层聚四氟乙烯膜，且膜上等间距刻限位槽以保证导线均匀分布。实际上，导线紧密绕制最理想；但在实际应用中该方案不可靠，导线之间容易发生短路且考虑到工艺实现难度，其产生的磁场并不理想。同时，金属导线自有的刚性较难实现紧密均匀绕制，且在制作过程中，由于作业环境因素难以保持其高真空环境设计要求，设计中导线限位槽间距定为 5mm。



图 1 PCB 板 C 场组件实物图

Fig. 1 PCB C-field

理想导流线圈的内部磁场分布应为大小均匀、方向一致，但在实际工程应用中受结构尺寸限制，致使 C 场在泡区产生的磁场呈现出一定的梯度分布且取向不一致，由此引起原子跃迁中心频率发生偏移并伴有谱线增宽，致使整钟输出信号指标下降^[3]。空间氢钟 C 场筒对称两头各绕制等间距绝缘导线以消除磁场分布梯度。两端导线的绕制宽度相对较短，本设计中绕制长度为 20mm。为便于下文分析论述，在 C 场组件中定义紧固筒上等间距的导线为中心场，两头对称分布导线为补偿

场，新制作的 C 场组件如图 2 所示。



图 2 空间氢钟 C 场组件实物图

Fig. 2 Space hydrogen maser C-field

2 C 场组件内磁场的理论计算

C 场组件所产生静磁场分布满足毕奥-萨伐尔定律，图 3 为过 C 场筒轴线任一平面与筒的相交面，其中取 C 场筒轴线为 X 轴、C 场筒中心处为坐标原点 O ，设中心场截面内径为 R ，线径长度为 L ，单位长度内导线圈数为 n ，则 X 轴上任一坐标处静磁场分布为^[4]

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} 2\pi n I (\cos \beta_1 - \cos \beta_2) \quad (1)$$

其中， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}$ ， I 表示流经导线的直流电数值

$$\begin{cases} \cos \beta_1 = \frac{X + \frac{L}{2}}{\sqrt{R^2 + \left(X + \frac{L}{2}\right)^2}} \\ \cos \beta_2 = \frac{X - \frac{L}{2}}{\sqrt{R^2 + \left(X - \frac{L}{2}\right)^2}} \end{cases} \quad (2)$$

基于微波腔与内层屏蔽的有限空间，该 C 场筒结构尺寸取 $L = 2R = 310\text{mm}$ 、 $n = 200$ ， X 轴与泡区界面交点为 A 、 B 两处且关于坐标原点 O 对称，圆形泡区界面直径大小为 180mm， A 、 B 两处坐标分别为 $(-90, 0)$ $(90, 0)$ 且两处磁场分布相同。上述三处对应的磁场分布为：

$$B_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} \mu_0 n I \quad (3)$$

$$B_A = B_B = \frac{\mu_0}{2} n I \left(\frac{0.065}{\sqrt{0.155^2 + 0.65^2}} + \frac{0.245}{\sqrt{0.155^2 + 0.245^2}} \right) \quad (4)$$

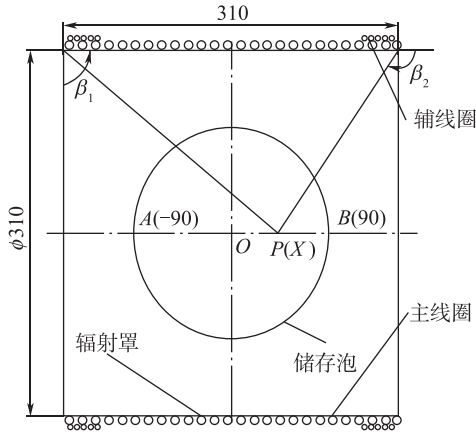


图3 过C场筒轴线任一平面与其相交截面图

Fig. 3 The intersect surface of C-Field and the plane over the axis

补偿场宽度相较于中心场长度较小,可等效为单股通电导线,其对应坐标为两个补偿场的中间点,分别为 $(-145, 0)$ 和 $(145, 0)$,由单股线圈产生轴线分布场的计算公式^[4]

$$B' = \frac{\mu_0}{2} \frac{R^2 I'}{(R^2 + X^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

推知,两个补偿场在X轴上任一坐标处静磁场分布为:

$$B' = \frac{\mu_0}{2} \frac{R^2 I'}{(R^2 + (0.145 + X)^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (6)$$

$$B'' = \frac{\mu_0}{2} \frac{R^2 I'}{(R^2 + (0.145 - X)^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (7)$$

由于上文提到计算式将补偿场视为单股导线,式(6)、式(7)中 I' 等于补偿场导线中电流 $I_{\text{补}}$ 与补偿场导线匝数(已知匝数为40)之积。将两个场(三个线圈)产生静磁场叠加,得到O、A、B三处的静磁场分布为:

$$B''_0 = B'_0 = \frac{\mu_0}{2} \frac{0.155^2 I'}{(0.155^2 + 0.145^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

$$B''_A = B'_B = \frac{\mu_0}{2} \frac{0.155^2 I'}{(0.155^2 + 0.235^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (9)$$

$$B''_B = B'_A = \frac{\mu_0}{2} \frac{0.155^2 I'}{(0.155^2 + 0.055^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (10)$$

由于A、B两处严格对称,理论上两处磁场分布相同。计算中仅取O、A两点,若X轴线上C场组件产生的磁场均匀,则有

$$B_0 + B'_0 + B''_0 = B_A + B'_A + B''_A \quad (11)$$

由量子频标理论知,氢原子实际跃迁频率与C场有如下关系

$$f = f_0 + 2766 H_c^2 \quad (12)$$

式中, f 为氢原子实际跃迁频率, f_0 为氢原子无磁环境下 σ 跃迁中心频率, H_c 为泡区磁场强度。C场组件内磁场强度越大,对应区域内磁场涨落效应越显著,由此引起的磁不均匀度越大,最终氢钟输出频率变化率就越大。为实现氢钟 10^{-13} 量级的准确度,通常取 $B \leq 1 \times 10^{-7} \text{T}$,现取

$$B_0 + B'_0 + B''_0 = 1 \times 10^{-7} \text{T} \quad (13)$$

计算求得中心线和补偿场导线中的电流分别为:

$$\begin{cases} I_{\text{中}} = 0.386 \text{mA} \\ I_{\text{补}} = \frac{I'}{40} = 0.246 \text{mA} \end{cases} \quad (14)$$

3 C场组件仿真优化

前文所得结果,是以X轴线上的两处代表性的点为研究对象,将式(14)中数值带入式(15)

$$B_{\text{总}} = B + B' + B'' \quad (15)$$

借助仿真软件得到C场组件X轴线上泡区内静磁场分布曲线,如图4所示。

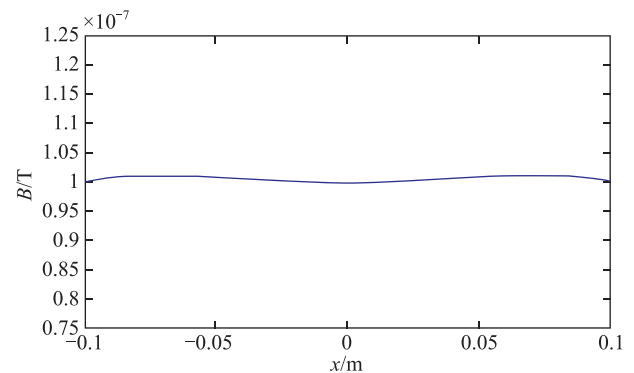


图4 X轴线上泡区内静磁场分布曲线

Fig. 4 The magnetic induction distribution within the storage bubble region

显然, X 轴线上静磁场分布并不均匀, 造成这一结果的原因正是由于在设计过程中采用了以点代线的方法, 即由特殊性代替一般性, 因此取得这一结果也在情理之中。需要说明的是: 虽然基于理论值下求得结果并不理想, 但它具有十分重要的实验指导意义。

在仿真环境下, 基于前文理论计算结果, 对通入三个线圈的直流电大小在该数值附近进行优化调节, 分析不同取值下的 X 轴线静磁场分布曲线, 在中心场和补偿场导线电流分别为 0.378mA、0.259mA 时, 得到优于 1% 的磁场不均匀度, 如图 5 所示。

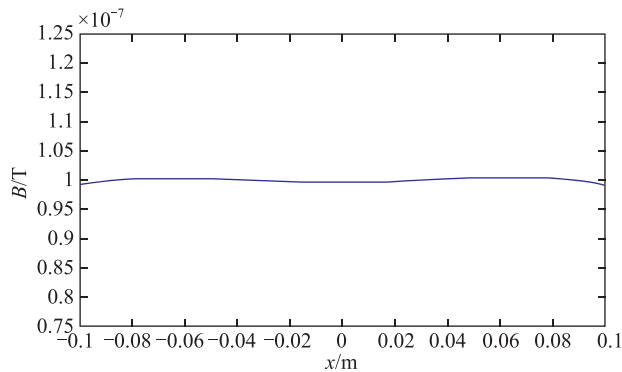


图 5 仿真调节后 X 轴线上泡区内静磁场分布曲线

Fig. 5 Optimized magnetic induction distribution within the storage bubble region

式 (12) 可推得由磁场不均匀度所致的氢钟输出频率相对变化率为

$$\frac{\delta f}{f_0} = 5532 \frac{H_c}{f_0} \frac{\delta H}{H_c} \quad (16)$$

其中, $f_0 = 1.4204057\text{GHz}$, $H_c \approx 1 \times 10^{-3}\text{G}$, 1% 的磁场不均匀度对应的 $\delta H < \Delta H_c = 1 \times 10^{-5}\text{G}$, 相对频率变化率 $\frac{\delta f}{f_0} < 4 \times 10^{-14}$ 。显然由磁场不均匀性引起的频率相对变化率对氢钟频率准确度 (5×10^{-13}) 的影响可以忽略, 同时, 设计结果也优于现有工程化氢钟内 C 场组件的性能水平 (7×10^{-14} 左右)。

4 C 场组件性能的试验验证

将图 2 所示的 C 场组件安装于验收合格的磁屏蔽组件内并退磁, 用直流电源分别给 C 场组件的三个线圈单独供电, 通电电流分别为 0.378mA、

0.259mA。在泡区范围内沿 X 轴线方向平移磁通门磁强计探头, 同时每移动 10mm 记录一个数值。测试结果显示表明该 C 场组件内 X 轴线上的静磁场的均匀度小于 1%, 但磁场大小大于 1mG。

上述结果可以通过磁屏蔽组件的工作原理解释。因为磁屏蔽不仅可以将其外界杂散磁场通过自身的高磁导率阻止其进入屏蔽的内环境, 还可以将内环境的磁场封闭在其空间内。如此导致 C 场组件所产生的静磁场几乎全部分布在磁屏蔽组件的有限内部空间内, 以至于改变了 C 场筒内的磁场分布, 但要量值计算屏蔽筒内 C 场组件磁场分布根本是不可能的^[5]。从工程角度讲, 求解屏蔽对 C 场组件场分布影响是没有意义的, 因为在氢钟调试过程中, C 场组件所需直流电的大小是要根据每台钟的不同状态做具体调节的, 甚至于调试完毕的氢钟在更换工作场所时都要进行细微调整。

上述仿真求得的优化数值仅用作证明所设计 C 场组件可以实现指标要求, 具体工程应用仍需对所加直流电流进行调试。

5 结论

本文从氢钟对 C 场组件的工作要求出发, 考虑具体工程设计中的局限性, 得到主辅场线圈的绕制结构, 然后通过数值计算及优化处理得到其工作参数, 最后通过实验测定验证设计的合理性。

目前, 该 C 场组件已装配于某型号主动型氢钟当中, 脉泽信号最优时所对应的磁场拨盘值在经验值附近, 经过调试后, 对该型号氢钟进行指标测试, 测试数据满足设计指标要求。证明该 C 场组件已能够稳定可靠地工作。

参考文献

- [1] 王义道, 王庆吉, 傅济时, 等. 量子频标原理[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 409-433.
- [2] 苏怀朋, 赵振昊, 孙永进, 等. 载人空间站空间科学应用研究[J]. 宇航学报, 2014, 35 (9): 985-991.
- [3] 袁博, 裴晓强, 陈江, 等. 星载铯钟 C 场设计及磁场分析[J]. 宇航学报, 2010, 31 (12): 2813-2817.
- [4] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984, 4: 356-364.
- [5] 王关中. 绝束频标中 C 场装置长度对其均匀性影响的研究[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 1986, 8 (8): 190-196.