

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.03.04

基于COMSOL Multiphysics的铷原子光钟C场线圈 磁场均匀性优化研究

刘诗佳¹, 黄军超¹, 薛毅聪¹, 陈晨¹, 张亚飞², 马明^{2*}

(1. 湖南中电星河电子有限公司, 湖南长沙 410000; 2. 国防科技大学 电子科学学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 针对铷原子光钟直螺线管在有限尺寸约束下磁场均匀性不足的问题, 基于COMSOL Multiphysics仿真软件, 对置于磁屏蔽筒内的多段式C场线圈结构进行参数化建模研究, 优化线圈分段数量、匝数密度等指标, 提升中心轴线上目标区域的磁场均匀性。研究结果显示: 优化后, 五段式线圈[80, 120] mm区域的磁场非均匀度降至0.078%; 七段式线圈[80, 120] mm区域的磁场非均匀度降至0.033%。本研究为实现铷原子光钟有限空间内的高均匀性C场提供了重要技术借鉴。

关键词: 铷原子光钟; C场线圈; 磁场均匀性; COMSOL Multiphysics软件; 多段式线圈; 有限空间; 建模分析; 参数优化

中图分类号: TB9; TM55

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 03-0022-08

Magnetic field uniformity optimization for the C-field coil in rubidium atomic optical clock based on COMSOL Multiphysics

LIU Shijia¹, HUANG Junchao¹, XUE Yicong¹, CHEN Chen¹, ZHANG Yafei², MA Ming^{2*}

(1. Hunan Xinghe Electronics Co., Ltd, Changsha 410000, China;

2. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To address the problem of insufficient magnetic field uniformity in solenoid coils for rubidium optical clocks under limited size constraints, this paper conducts a parametric modeling study on a multi-segment C-field coil structure inside a magnetic shield cylinder using the COMSOL Multiphysics simulation software. The number of coil segments, turns density, and other structural parameters are optimized to enhance the magnetic field uniformity in the target region along the central axis. The research results show that after optimization, the magnetic field non-uniformity in the [80, 120] mm region of the five-segment coil is reduced to 0.078%, while that of the seven-segment coil is further reduced to 0.033%. This research provides important technical insights for achieving a high-uniformity C-field in rubidium optical clocks within confined spaces.

Key words: rubidium atomic optical clock; C-field coil; magnetic field uniformity; COMSOL Multiphysics software; multi-segment coil; confined space; modeling analysis; parameter optimization

收稿日期: 2025-11-07; 修回日期: 2026-01-20; 录用日期: 2026-03-24; 发表日期: 2026-06-28

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2024JJ2061); 湖南省预算内基建投资高校师生创业就业创新及北斗规模应用方向支持项目(2407-430100-04-01-670288)

引用格式: 刘诗佳, 黄军超, 薛毅聪, 等. 基于COMSOL Multiphysics的铷原子光钟C场线圈磁场均匀性优化研究[J]. 计测技术, 2026, 46(3): 22-29.

Citation: LIU S J, HUANG J C, XUE Y C, et al. Magnetic field uniformity optimization for the C-field coil in rubidium atomic optical clock based on COMSOL Multiphysics[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(3): 22-29.



0 引言

原子钟作为一种高性能的频率标准,在卫星导航、通信同步、基础物理研究等领域具有广泛应用^[1-3]。原子钟中静磁场(C场)的主要作用是原子跃迁提供量子化轴并消除简并,其均匀性至关重要^[4-5]。若C场均匀性不佳,将导致原子感受到的磁场强度在作用空间内分布不均匀,会引起原子跃迁频率展宽和偏移,从而显著降低原子钟的稳定度和准确度^[6]。

直螺线管因其结构简单、易于制作,被广泛用作C场线圈,其磁场分布可由毕奥-萨伐尔定律计算^[7]。但在实际工程应用中,受限于原子钟物理部分的尺寸要求以及工艺实现的可行性,直螺线管的长度和绕制密度往往无法达到理想的无限长条件,导致其轴线磁场在两端显著衰减,磁场均匀性变差。潘志兵等人指出,星载氢原子钟中使用的直螺线管,在储存泡区域内的磁场非均匀度可达约10%,难以满足高精度原子钟的需求^[8]。在铷原子光钟系统中,C场不仅为原子提供量子化轴,其均匀性更直接影响基于磁敏感能级的原子态制备、探测以及钟跃迁本身的频率稳定性。因此,对C场线圈结构进行优化设计以提升磁场均匀性,成为原子钟研制中的一项重要课题。

为克服直螺线管的局限性,研究者们提出了多种改进方案。王勇等人针对被动型氢钟,提出了在主螺线管两端添加补偿线圈的方法,通过数值计算优化线圈参数,使轴线磁场均匀度达到了99.8%^[9]。潘志兵等人提出使用多段线圈为星载氢原子钟产生C场的方法,相较基于直螺线管九段线圈的传统方法,该方法可将C场的非均匀度降低至约1%^[8]。王文明针对空间氢钟的特殊要求,设计了一种由中心场和两端补偿场组成的C场组件,实现了储存泡区域内小于1%的磁场不均匀度^[10]。曹进等人针对空间主动型氢脉泽的C场产生问题,提出了3段螺线管和4组线圈2种设计方案,将C场均匀度进一步降低至0.066%^[11]。上述研究为提升C场均匀度提供了一定技术借鉴,但是也存在局限性:在主螺线管两端增加补偿线圈形成双层结构的方法成本较高,且工艺难度较大;设置多段线

圈式C场结构,将C场线圈段数、段间间距、绕制密度等参数作为整体进行调优的方法,前期设计工作的复杂度较高。

针对上述问题,本文提出一种多段式C场线圈结构,利用COMSOL Multiphysics软件建立精确的二维轴对称电磁场仿真模型,系统研究五段式和七段式C场线圈的几何参数对轴线磁场均匀性的影响规律,并找出最优参数组合。通过独立控制各段的绕制匝数与间距,可灵活地对轴向磁场分布进行“整形和补偿”,在有限的物理空间内实现更优的磁场均匀性,为实际工程设计与制造提供技术支持。

1 理论与仿真模型

1.1 C场均匀性

当前对C场均匀性的研究大多停留在定性描述层面,缺乏对C场均匀性与原子钟核心性能指标的量化关联研究。C场不均匀性主要表现为二阶塞曼效应引入系统性的频移。光频原子钟跃迁能级(如⁸⁷Sr的³P₀)的塞曼频移特性与传统的微波频标不同。根据光晶格钟的相关研究^[12],其二阶塞曼频移主要来自C场与能量间隔较大的精细结构能级(如⁸⁷Sr的³P₁)的相互作用。该频移 Δu 可表述为

$$\Delta u \approx \kappa_2 \sigma_B^2 \quad (1)$$

式中: κ_2 为表征钟跃迁对磁场二阶敏感度的系数,其值取决于原子的特定能级结构; σ_B 为磁场非均匀度。例如,对于⁸⁷Sr光晶格钟, κ_2 约为 $-2.33 \times 10^{-5} \text{ Hz}/\mu\text{T}^2$ ^[13];对于¹⁷¹Yb光钟, κ_2 约为 $-6.2 \times 10^{-6} \text{ Hz}/\mu\text{T}^2$ ^[14]。对于二阶塞曼系数相对较小的光频跃迁,要实现极高的频率准确度,对磁场的绝对值稳定性及其空间均匀性的要求极为苛刻——C场在其作用区域内的相对均匀度需优于0.1%。这一指标远超传统有限长直螺线管的能力极限,因此,研究能够实现此类超高均匀性C场的线圈设计方法至关重要。

1.2 直螺线管模型

直螺线管是产生均匀磁场的常用结构,其中心轴线上任意一点的磁感应强度 B 可表示为^[15-16]

$$B = \frac{\mu_0 n_0 I}{2} \left[\frac{l_1}{(l_1^2 + R_0^2)^{1/2}} + \frac{l_2}{(l_2^2 + R_0^2)^{1/2}} \right] \quad (2)$$

式中： μ_0 为真空磁导率， n_0 为单位长度线圈匝数， I 为电流， R_0 为螺线管半径， l_1 和 l_2 分别为该点至螺线管两端的轴向距离。

从式(2)可以看出，当螺线管长度远大于半径时，其中部区域磁感应强度 $B \approx \mu_0 n_0 I$ ；而在靠近两端的位置，磁场强度下降至约一半，即 $B \approx \mu_0 n_0 I / 2$ 。因此，尽管螺线管中部磁场相对均匀，但其端部磁场显著衰减，均匀性较差。

在实际应用中，铷原子光钟的原子玻璃气室位于线圈轴线中心，原子所在轴线中心工作区域的C场均匀性受到影响。为评估该影响，基于铷原子光钟物理部分磁屏蔽结构尺寸进行参数设置，借助COMSOL Multiphysics软件对其产生的磁场进行建模仿真。直螺线管三维仿真模型如图1所示。

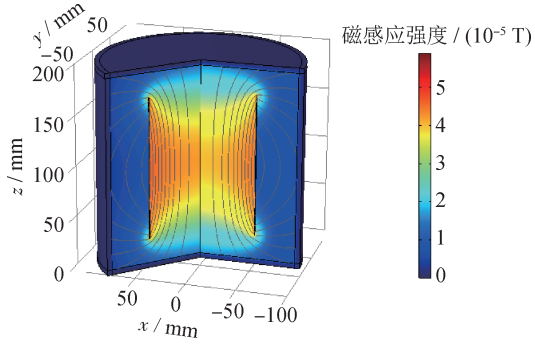


图1 直螺线管三维模型

Fig.1 Three-dimensions model of a straight solenoid

1.3 多段式线圈模型

对于多段式线圈磁感应强度的计算，可以借鉴亥姆霍兹线圈的布置理念，通过将多个独立线圈以特定方式排列组合，构成多段线圈结构，从而有效提升C场均匀性^[17]。各线圈通入同一路电流，且电流大小与方向一致。设第 n 个线圈的中心位置为 Z_n ，轴向长度为 L_n ，匝数为 N_n ，则该线圈在中心轴线上一点 z 处所产生的磁感应强度 $B_n(z)$ 可借助直螺线管磁场公式近似表示为

$$B_n(z) = \frac{\mu_0 N_n I}{2} \left[\frac{L_n / 2 - (z - Z_n)}{\{R^2 - [L_n / 2 - (z - Z_n)]\}^{1/2}} + \frac{L_n / 2 + (z - Z_n)}{\{R^2 + [L_n / 2 - (z - Z_n)]\}^{1/2}} \right] \quad (3)$$

因此，整个多段式线圈系统在轴线上产生的总磁场 $B(z)$ 为各线圈磁场 $B_i(z)$ 的叠加，即

$$B(z) = \sum_{i=1}^n B_i(z) \quad (4)$$

多段线圈的性能可通过多项结构参数进行调节，包括但不限于 n 、 N_n 、 L_n 、相邻段间距 $Z_{n+1} - Z_n$ 、线圈内径 R 和系统总长度 H 等。通过系统性优化这些参数，可实现在原子气室区域内磁场均匀性的显著提升。

磁场均匀性通常用磁场非均匀度(Magnetic Field Non-uniformity) $S_{\text{Non-uniformity}}$ 来衡量，表现为在感兴趣区域(Region of Interest, ROI)内，磁感应强度最大值与最小值之差与最大值的百分比。近似计算公式为

$$S_{\text{Non-uniformity}} = \frac{B_{\text{max}} - B_{\text{min}}}{B_{\text{max}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中： B_{max} 和 B_{min} 分别为ROI内磁感应强度的最大值和最小值。 $S_{\text{Non-uniformity}}$ 越小，表明此范围内的磁场均匀性越佳。

式(2)和式(3)均是对C场中心轴线上磁场的近似求解，并非精确的解析解，且未计算中心轴线外整体区域的磁场。计算类似线圈结构的中心轴线外的磁场有很多方法^[17-22]。整个C场线圈范围的空间磁场分布对原子精密能级跃迁的工程实现都至关重要。通过有限元软件仿真可以对整体空间区域进行磁场分布的求解。本文在COMSOL Multiphysics中建立二维轴对称模型(r - z 平面)进行静磁场(mf模块)仿真，模型核心尺寸基于铷原子光钟磁屏蔽结构，主要参数包括：轴向空间长度 L 为200 mm，径向空间宽度 D 为200 mm，线圈平均半径 R_1 为55 mm，导线半径 r_1 为0.2 mm。线圈材料设为铜，定义其电导率，周围空气域设为空气磁导率。为简化模型，重点研究线圈自身产生的磁场，暂不对磁屏蔽结构进行整体仿真模拟。使用软件“磁场，无电流”(mfnc)接口计算由线圈电流产生的磁场，对线圈区域及中心轴线附近进行精细化网格剖分，以确保计算精度。执行“稳态”研究，所有线圈通以相同方向和大小的电流，设置电流 I 为50 mA。

研究对比2种多段式线圈。五段式线圈：总长度固定，中间3段线圈长度 $d_{03} = 25$ mm、固定中间段线圈匝数 N 为15匝；两端线圈段长度 $d_1 = 25$ mm，通过改变两端线圈绕制匝数(15 ~ 40匝)来优

化均匀性。七段式线圈：总长度固定，中间5段线圈长度 $d_{05}=20\text{ mm}$ 、固定中间段线圈匝数 N 为15；两端线圈段长度 $d_1=20\text{ mm}$ ，通过改变两端线圈绕制匝数(15~40匝)来优化均匀性。首先，选取 $[60, 140]\text{ mm}$ 区域对磁场非均匀度展开计算，通过比较在相同长度区间内直螺线管和多段式C场线圈的磁场非均匀度，确定多段式线圈结构相较直螺线管能够极大程度提升磁场均匀性，在此基础上，最终优化目标是在中心轴线上的ROI内，即 $[80, 120]\text{ mm}$ 区域，最小化磁场非均匀度。

2 结果与讨论

作为对比基准，首先对直螺线管展开COMSOL仿真建模和MATLAB理论计算，设置半径为55 mm，长度为140 mm，通电电流 I 为50 mA，绕制匝数为120匝，得到中心轴线上磁感应强度分布结果如图2所示。

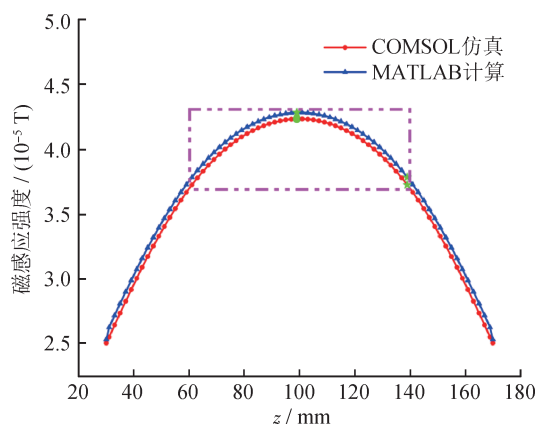
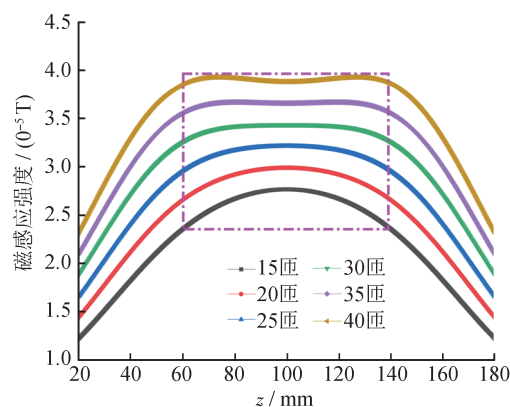


图2 直螺线管中心轴线磁感应强度COMSOL仿真结果与MATLAB计算结果

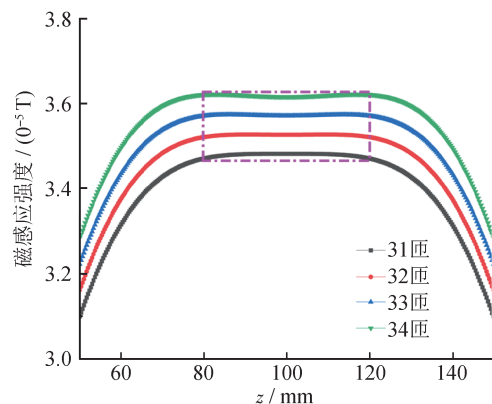
Fig.2 COMSOL simulation results and MATLAB calculation results of magnetic induction strength on the central axis of a solenoid

图2中的虚线方框区域代表感兴趣的目标范围，方框中的绿色标记为目标区域内的磁感应强度的最值。其中，COMSOL仿真得到的目标区域内的磁感应强度最大值为 $4.2333 \times 10^{-5}\text{ T}$ ，最小值为 $3.6959 \times 10^{-5}\text{ T}$ ，磁场非均匀度为12.69%；MATLAB计算得到的目标区域内磁感应强度最大值为 $4.283 \times 10^{-5}\text{ T}$ ，最小值为 $3.741 \times 10^{-5}\text{ T}$ ，磁场非均匀度为12.65%，体现了有限长直螺线管在均匀性方面的局限性。

为了研究多段式线圈对磁场均匀性的影响，利用COMSOL Multiphysics展开二维轴对称建模仿真，分析五段式线圈和七段式线圈的磁场均匀性。五段式线圈中心轴线上的磁感应强度分布如图3所示。两端匝数为15~40匝时五段式线圈 $[60, 140]\text{ mm}$ 区域的磁场均匀性如表1所示。



(a) 两端匝数为15~40匝时， $[60, 140]\text{ mm}$ 区域的磁感应强度
(a) Magnetic induction strength in the $[60, 140]\text{ mm}$ area when the number of turns at both ends is 15~40



(b) 两端匝数为31~34匝时， $[80, 120]\text{ mm}$ 区域的磁感应强度
(b) Magnetic induction strength in the $[80, 120]\text{ mm}$ area when the number of turns at both ends is 31~34

图3 五段式线圈中心轴线上的磁感应强度分布

Fig.3 Magnetic induction strength distribution on the central axis of the five-segment coil

随着两端匝数的增加，磁场非均匀度显著下降，但匝数过密会导致“过补偿”的情况，即当补偿线圈匝数超过某个阈值后，其产生的反向磁场不仅抵消了中心场的不均匀性，更在局部区域“矫枉过正”，导致磁场分布曲线出现了更多的极值点，如图3(a)所示。两端匝数为31~34匝时五段式线圈 $[60, 140]\text{ mm}$ 区域的磁场情况如表2所示，两端匝数为31~34匝时五段式线圈 $[80, 120]$

mm 区域的磁场情况如表 3 所示。当两端匝数由 31 匝增加至 34 匝时, [60, 140] mm 区域的磁场非均匀度由 4.761% 降至 3.470%。在距离轴线中心更近的[80, 120] mm 区域, 当两端匝数为 33 匝时, 磁场非均匀度达到最优值 0.078%, 均匀度达到 99.92%。两端匝数为 33 匝时五段式线圈的三维磁感应强度分布如图 4 所示。

表 1 两端匝数为 15 ~ 40 匝时五段式线圈 [60, 140] mm 区域的磁场情况
Tab.1 The magnetic field in the [60, 140] mm area of the five-segment coil when the number of turns at both ends is 15 ~ 40

两端匝数 / 匝	最大值 / (10^{-5} T)	最小值 / (10^{-5} T)	磁场非均匀度 / %
15	2.767 0	2.355 4	14.875
20	2.990 5	2.655 7	11.195
25	3.214 0	2.956 0	8.027
30	3.437 5	3.256 3	5.271
35	3.671 6	3.556 7	3.129
40	3.931 0	3.857 0	1.882

表 2 两端匝数为 31 ~ 34 匝时五段式线圈 [60, 140] mm 区域的磁场情况
Tab.2 The magnetic field in the [60, 140] mm area of the five-segment coil when the number of turns at both ends is 31 ~ 34

两端匝数 / 匝	最大值 / (10^{-5} T)	最小值 / (10^{-5} T)	磁场非均匀度 / %
31	3.482 2	3.316 4	4.761
32	3.527 4	3.376 5	4.278
33	3.574 2	3.436 5	3.853
34	3.622 3	3.496 6	3.470

对七段式线圈的磁场均匀度进行分析。设定七段式线圈每段长度为 20 mm, 中间 5 段绕制匝数为 15 匝, 改变两端线圈绕制匝数, 分析七段式线圈[60, 140] mm 区域中心轴线上的磁感应强度分布, 结果如图 5 所示。两端匝数为 15 ~ 40 匝时七段式线圈[60, 140] mm 区域的磁场情况如表 4 所示, 两端匝数为 31 ~ 34 匝时七段式线圈[60, 140] mm 区域的磁场情况如表 5 所示, 两端匝数为 32 ~ 35

表 3 两端匝数为 31 ~ 34 匝时五段式线圈 [80, 120] mm 区域的磁场情况
Tab.3 The magnetic field in the [80, 120] mm area of the five-segment coil when the number of turns at both ends is 31 ~ 34

两端匝数 / 匝	最大值 / (10^{-5} T)	最小值 / (10^{-5} T)	磁场非均匀度 / %
31	3.482 2	3.471 1	0.319
32	3.527 4	3.521 3	0.173
33	3.574 2	3.571 4	0.078
34	3.622 3	3.616 3	0.166

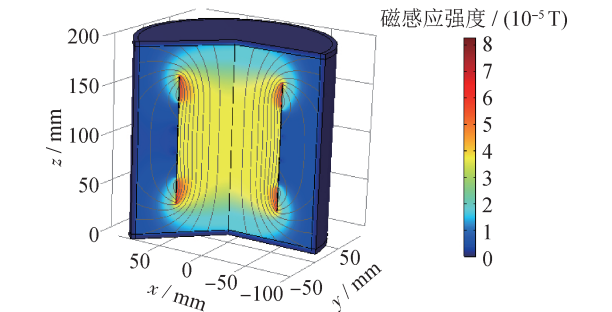
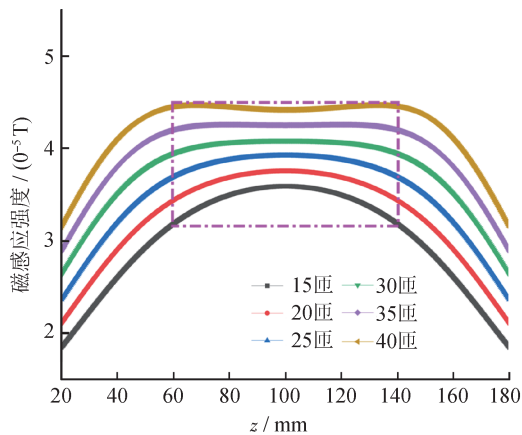


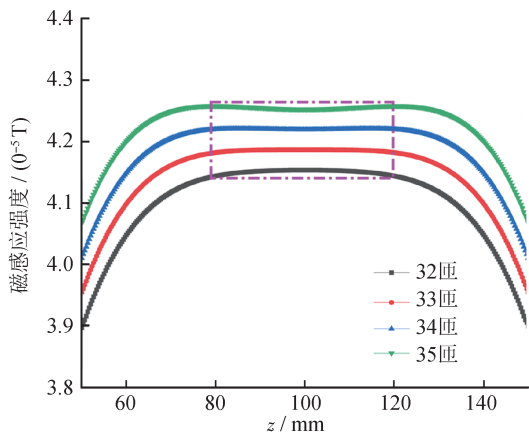
图 4 两端匝数为 33 匝时五段式线圈的三维磁感应强度分布图
Fig.4 Three-dimensional magnetic induction strength distribution of the five-segment coil with 33 turns at both ends

匝时七段式线圈[80, 120] mm 区域的磁场情况如表 6 所示。七段式线圈在更短的单段长度下, 展现了更优的均匀性调控能力, 在[80, 120] mm 区域, 当中间 5 段匝数为 15 匝, 两端匝数为 34 匝时, 磁场非均匀度为 0.033%, 均匀度达 99.967%, 性能优于五段式线圈。两端匝数为 34 匝时七段式线圈的三维磁感应强度分布如图 6 所示。

仿真结果表明: 在总长度相当时, 增加线圈段数可以有效地提升磁场均匀性。本研究中, 七段式线圈的最优性能(磁场均匀度 99.967%)优于五段式线圈(磁场均匀度 99.92%), 这是因为在有限物理空间内合适的多段式线圈段数能够提升对磁场空间分布形态的精细调控能力, 以补偿边缘效应的衰减, 使整体磁场分布更接近于理想的均匀状态。两端线圈的匝数密度是影响均匀性的关键参数, 匝数密度过低, 补偿效果不足; 匝数密度过高, 则会产生过补偿, 导致磁场在两端区域



(a) 两端匝数为15~40匝时的磁感应强度
(a) Magnetic induction strength when the number of turns at both ends is 15~40



(b) 两端匝数为32~35匝时的磁感应强度
(b) Magnetic induction strength when the number of turns at both ends is 32~35

图5 七段式线圈[60, 140] mm区域中心轴上的磁感应强度分布

Fig.5 Magnetic induction strength distribution on the central axis of the seven-segment coil within the range of [60, 140] mm

表4 两端匝数为15~40匝时七段式线圈[60, 140] mm区域的磁场情况

Tab.4 The magnetic field in the [60, 140] mm area of the seven-segment coil when the number of turns at both ends is 15~40

两端匝数 / 匝	最大值 / (10^{-5} T)	最小值 / (10^{-5} T)	磁场非均匀度 / %
15	3.592 9	3.186 2	11.32
20	3.757 8	3.439 7	8.47
25	3.922 7	3.693 1	5.85
30	4.087 6	3.946 6	3.45
35	4.257 8	4.200 1	1.36
40	4.469 3	4.417 3	1.16

表5 两端匝数为31~34匝时七段式线圈[60, 140] mm区域的磁场情况

Tab.5 The magnetic field in the [60, 140] mm area of the seven-segment coil when the number of turns at both ends is 31~34

两端匝数 / 匝	最大值 / (10^{-5} T)	最小值 / (10^{-5} T)	磁场非均匀度 / %
31	4.120 6	3.997 3	2.99
32	4.153 5	4.048 0	2.54
33	4.186 5	4.098 7	2.10
34	4.220 9	4.149 4	1.69

表6 两端匝数为32~35匝时七段式线圈[80, 120] mm区域的磁场情况

Tab.6 The magnetic field in the [80, 120] mm area of the seven-segment coil when the number of turns at both ends is 32~35

两端匝数 / 匝	最大值 / (10^{-5} T)	最小值 / (10^{-5} T)	磁场非均匀度 / %
32	4.153 5	4.143 9	0.231
33	4.186 5	4.181 9	0.110
34	4.220 9	4.219 5	0.033
35	4.257 8	4.252 5	0.124

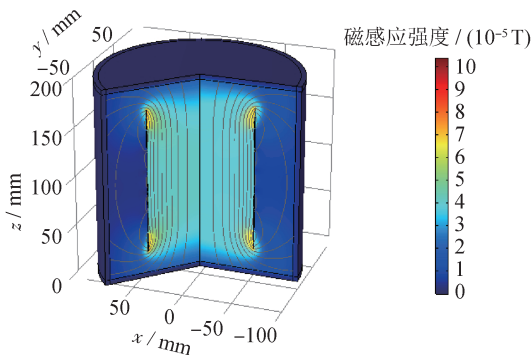


图6 两端匝数为34匝时七段式线圈的三维磁感应强度分布图

Fig.6 Three-dimensional magnetic induction strength distribution of a seven-segment coil with 34 turns at both ends

隆起, 反而影响均匀性。本研究中, 五段式线圈的最优匝数密度为33匝/25 mm, 七段式线圈的最优匝数密度为34匝/20 mm。多段式线圈结构不仅在性能上优越, 其“分段绕制”的理念也更易于工程实现。这避免了紧密绕制可能带来的匝间短

路风险,各段间的间隙也为工艺制造提供了容差空间^[20]。本研究提供的参数优化方法(固定中间段,优化两端)具有普适性,可根据具体的磁屏蔽结构尺寸、原子气室尺寸和导线规格进行应用。

3 总结与展望

本文基于COMSOL Multiphysics仿真平台,系统分析了多段式C场线圈结构对铷原子光钟内部磁场均匀性的优化效果,得到了重要的研究成果。首先,研究证实了有限长直螺线管在受限空间内存在明显的磁场均匀性缺陷,其[60, 140] mm区域的磁场非均匀度超过了12%,无法满足高精度铷原子光钟的严格要求。相比之下,采用多段式线圈结构可有效提升磁场均匀性,通过优化两端线圈段的绕制匝数,能够显著补偿轴线磁场的边缘衰减效应。本文的优化策略将五段式线圈[80, 120] mm区域的磁场非均匀度降低至0.078%,将七段式线圈[80, 120] mm区域的磁场非均匀度降低至0.033%。

本文详细探讨了不同线圈结构和匝数密度对磁场均匀性的影响,形成了一套系统的设计优化方法,不仅为铷原子光钟的C场线圈设计提供了重要依据,也为其他原子频标器件的磁场系统设计提供了参考。未来的研究工作可以从以下方面展开:考虑磁屏蔽材料的非线性特性,建立更精确的耦合仿真模型;深入研究分段间距、不对称结构等参数对磁场均匀性的影响规律,通过实验验证优化设计方案的效果,推动研究成果的实际应用。

参考文献

- [1] 蔺玉亭,韩春好,王晓芳. 利用原子钟实现地球时的相关研究[J]. 天文研究与技术, 2007(4): 330-336.
LIN Y T, HAN C H, WANG X F. The conception definition and realization of TT [J]. Astronomical Research & Technology, 2007(4): 330-336. (in Chinese)
- [2] 张佳,史田田,缪健翔,等. 主动光钟研究进展[J]. 计测技术, 2023, 43(3): 1-16.
ZHANG J, SHI T T, MIAO J X, et al. Research progress of active optical clock [J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(3): 1-16. (in Chinese)
- [3] GODUN R M, NISBET-JONES P B R, JONES J M, et al. Frequency ratio of two optical clock transitions in $^{171}\text{Yb}^+$ and constraints on the time variation of fundamental constants[J]. Physical Review Letters, 2014, 113(21): 210801.
- [4] 王义遒. 原子的激光冷却与陷俘[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
WANG Y Q. Laser cooling and trapping of atoms [M]. Beijing: Peking University Press, 2007. (in Chinese)
- [5] 施俊如,王心亮,阮军,等. 铯原子喷泉钟空间均匀C场的研究[J]. 时间频率学报, 2018, 41(3): 145-150.
SHI J R, WANG X L, RUAN J, et al. Study on C field's spatial uniformity for cesium fountain clock [J]. Journal of Time and Frequency, 2018, 41(3): 145-150. (in Chinese)
- [6] 王义遒. 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. (in Chinese)
- [7] 马文蔚,周雨青. 物理学教程——上册[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 243-249.
MA W W, ZHOU Y Q. Physics course — the first volume [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 243-249. (in Chinese)
- [8] 潘志兵,谢勇辉,帅涛,等. 星载氢原子钟用多段线圈式C场的仿真及应用[J]. 天文研究与技术, 2020, 17(3): 341-348.
PAN Z B, XIE Y H, SHUAI T, et al. Simulation and application of multi-section coil for C field used in space passive hydrogen maser [J]. Astronomical Research & Technology, 2020, 17(3): 341-348. (in Chinese)
- [9] 王勇,邱实,李建清. 被动型氢钟超均匀C场的计算与优化[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(6): 783-788.
WANG Y, QIU S, LI J Q. Calculation and optimization of ultra-uniform C-field for a passive hydrogen clock [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(6): 783-788. (in Chinese)
- [10] 王文明. 一种应用于空间氢钟的C场组件设计[J]. 导航定位与授时, 2016, 3(1): 60-63.
WANG W M. A design of C-field for space hydrogen maser [J]. Navigation Positioning and Timing, 2016, 3(1): 60-63. (in Chinese)
- [11] 曹进,蔡勇,李锡瑞,等. 空间主动型氢脉泽多段式C场设计与仿真分析[J]. 天文研究与技术, 2023, 20

- (1): 65–72.
- CAO J, CAI Y, LI X R, et al. Design and simulation analysis of space active hydrogen maser multi-segment C-field[J]. Astronomical Research & Technology, 2023, 20(1): 65–72. (in Chinese)
- [12] LUDLOW A D, BOYD M M, YE J, et al. Optical atomic clocks[J]. Reviews of Modern Physics, 2015, 87(2): 637–701.
- [13] LUDLOW A D, ZELEVINSKY T, CAMPBELL G K, et al. Sr lattice clock at 1×10^{-16} fractional uncertainty by remote optical evaluation with a Ca clock[J]. Science, 2008, 319(5871): 1805–1808.
- [14] LEMKE N D, LUDLOW A D, BARBER Z W, et al. Spin-1/2 optical lattice clock[J]. Physical Review Letters, 2009, 103(6): 063001.
- [15] 叶邦角. 电磁学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2014.
- YE B J. Electromagnetism[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2014. (in Chinese)
- [16] 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.
- GAO J, SUN X, LIU J W. Research on the spatial distribution of Helmholtz coil magnetic field[J]. Bulletin of Science and Technology, 2018, 34(7): 34–37. (in Chinese)
- [17] 张立根, 王惠安. 计算轴对称场的一种方法[J]. 河北化工学院学报, 1988, 9(1): 129–131.
- ZHANG L G, WANG H A. A method for calculating axisymmetric field[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 1988, 9(1): 129–131. (in Chinese)
- [18] DAVID H, ROBERT R, JEARL W. Fundamentals of physics[M]. 9th ed. Hoboken: Wiley, 2010: 937–978.
- [19] WANG J, SHE S X, ZHANG S J. An improved Helmholtz coil and analysis of its magnetic field homogeneity[J]. Review of Scientific Instruments, 2002, 73(5): 2175–2179.
- [20] VRBANCICH J. Magnetic field distribution within uniform current density coils of non-zero cross-section and the design of Helmholtz coils[M]. DSTO Materials Research Laboratory, 1991.
- [21] ABBOTT J J. Parametric design of tri-axial nested Helmholtz coils[J]. The Review of Scientific Instruments, 2015, 86(5): 054701.
- [22] CACAK R K, CRAIG J R. Magnetic field uniformity around near-Helmholtz coil configurations[J]. Review of Scientific Instruments, 1969, 40(11): 1468–1470.

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一作者: 刘诗佳(1999—), 女, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为光学原子钟。



通信作者: 马明(1989—), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为卫星导航与时间频率技术等。