

引用格式: 郑宁, 张亮, 郝莉娜, 等. 国产磁选态铯束频率标准环境特性研究[J]. 时间频率学报, 2024, 47(1): 1-7.

## 国产磁选态铯束频率标准环境特性研究

郑宁<sup>1</sup>, 张亮<sup>2</sup>, 郝莉娜<sup>2</sup>, 王骥<sup>1</sup>, 杨军<sup>1</sup>, 刘志栋<sup>1</sup>, 陈江<sup>1</sup>, 高望远<sup>1</sup>

- 兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000;
- 战略支援部队航天系统部装备部装备保障队, 北京 100000

**摘要:** 铯原子频率标准具有长期稳定性好、可靠性高的优点, 在导航定位、守时授时、通信电力、时频计量等领域有着广泛的应用。近年来由于军事领域对高精度时间频率源的需求, 铯原子频标的使用环境从实验室走向了战车、舰船等机动平台。本文针对铯原子频标在战车、舰船、高原等复杂环境下的环境适应性, 研究环境因素对整机指标的影响机理。通过仿真与试验对整钟设计进行优化, 以提高整机在力学、热、磁场、低气压等复杂环境下的适应性。经过优化设计后的国产铯束频率标准样机通过了相关环境试验项目的考核, 各项指标均满足要求。研究结果表明, 铯原子钟电性能样机的稳定度优于  $8.73 \times 10^{-15}/5$  d, 磁敏感度  $3.15 \times 10^{-14}/\text{Gauss}$ , 工作温度特性  $-8.18 \times 10^{-14}$ , 这项作为国产化铯钟的进一步应用提供了基础。

**关键词:** 国产铯束频率标准; 环境适应性; 振动; 低气压; 稳定度

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2024-01-0001-07

## Environmental adaptability of home-made cesium atomic clock

ZHENG Ning<sup>1</sup>, ZHANG Liang<sup>2</sup>, HAO Li-na<sup>2</sup>, WANG Ji<sup>1</sup>, YANG Jun<sup>1</sup>,

LIU Zhi-dong<sup>1</sup>, CHEN Jiang<sup>1</sup>, GAO Wang-yuan<sup>1</sup>

- Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory,  
Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China;

- Equipment support team of Equipment Department Aerospace Systems Division Strategic Support Force,  
Beijing 100000, China

**Abstract:** Based on long-term instability and high reliability, cesium frequency standard is widely used to create high-precision and high-stability time-frequency system, which has a wide range of applications, such as navigation, positioning, broadcasting, communication, electricity and time-frequency metrology area. In recent years, due to the demand for high-precision time and frequency system in the military field, the atomic clock has been transferred from laboratory to the mobile platform such as chariots and ships. In this paper, the environmental adaptability of cesium atomic frequency standard in complex environment such as chariot, ship

收稿日期: 2022-09-17; 接受日期: 2022-11-03

基金项目: 国家自然科学基金“叶企孙”科学基金重点项目(U2341247); 五院杰出青年人才基金(2022-YH2611)

and plateau is studied, and the influence mechanism of environmental factors on the whole machine index is studied. Through simulation and test, the design of the clock is optimized to improve the adaptability of the machine in complex environments such as mechanics, heat, magnetic field and low pressure. After optimization design, the home-made cesium atomic frequency standard prototype has passed the assessment of relevant environmental test items, and all the indicators meet the requirements. The frequency instability of the electrical prototype is better than  $8.73 \times 10^{-15}/5$  d, the magnetic sensitivity is  $3.15 \times 10^{-14}/\text{Gauss}$ , and the temperature coefficient is  $-8.18 \times 10^{-14}$ . This work will hopefully contribute to the foundation of further applications.

**Key words:** home-made atomic clock frequency standard; environment adaptability; vibration; low pressure; stability

磁选态铯束频率标准工作原理是利用微波场与铯原子相互作用产生鉴频信号, 利用鉴频信号将微波频率锁定在铯原子基态的超精细能级上, 从而实现基准频率信号的输出<sup>[1]</sup>。铯原子频率标准具有准确度高、长期稳定度好、漂移率小及可靠性高等特点, 属于一级频率标准<sup>[2]</sup>, 是建立和保持高精度、高稳定度守时系统的核心设备, 能够为战场时空统一、武器系统精确控制、作战行动密切协同提供关键支撑, 在导航定位、守时授时、通信电力、时频计量等领域有着广泛的应用<sup>[3]</sup>。

小型化磁选态铯原子频标性能高、应用广, 产品严重依赖进口, 兰州空间技术物理研究所成功研制的 LIP Cs-3000 型小型磁选态铯原子频标, 为实现高性能铯原子频标的国产化替代奠定了基础<sup>[4]</sup>, 目前正在开展元器件国产化替代和可靠性提升研究工作。不同于实验室环境, 在战车、舰船等移动平台上, 铯原子频标会经历振动、冲击、跌落、高低温、低气压、磁场等复杂环境。通过分析环境因素对铯束频标的影响机理, 评估各环境因素引起的频移量并提出相应的改进措施, 对整机结构进行减震设计, 提高结构强度与刚度, 改善铯原子频标抗力学性能; 通过整钟导热布局优化设计, 改善铯原子频标抗热学环境性能等<sup>[5]</sup>, 从而提高国产化铯钟的可靠性。国产铯束频率标准外形如图 1 所示, 整机尺寸为标准 3U 机箱, 重量 29 kg, 稳态功耗 60 W, 频率准确度优于  $\pm 5.0 \times 10^{-13}$ 。

## 1 环境因素对频率偏移的影响机理分析

引起磁选态铯束频标频移的因素主要有磁场

引起的频移、多普勒效应引起的频移、伺服电路不完善引起的频移、频率牵引效应引起的频移、与辐射场相关的频移等<sup>[1]</sup>。其中, 与环境因素有关的频移主要有磁场频移、二级多普勒频移、温度变化引起的频率牵引频移以及腔失谐频移等, 造成频移的原因是由于铯原子加热后形成热原子束, 原子与原子之间, 原子与外界磁场、微波辐射场等发生了相互作用, 铯原子频标输出频率是经过磁选态、微波谐振腔相互作用、C 场作用、辐射跃迁、检测、伺服放大等多个物理和技术处理后的原子跃迁频率。



图 1 国产铯束频率标准

铯原子频标寿命周期内遇到的主要环境因素有温度、振动、磁场、低气压、湿度等, 大部分环境因素的影响是相互关联的, 比如低气压会影响整机散热, 进而影响机箱内部温度; 湿度会影响电路散热, 还会造成微波链路中电容容量的变化, 进而影响微波功率; 温度变化会造成 C 场电路电流波动, 进而影响 C 场稳定性, 引起磁场频移; 振动环境下, 加速度会导致原子束流轨迹及原子速率分布发生变化等<sup>[6]</sup>。

振动、冲击、跌落等力学环境会导致铯原子频标及其内部结构的动态位移, 这些位移和相应的

速度、加速度可能引起或加剧结构疲劳及机械磨损,还会导致电子元器件的功能损坏<sup>[7]</sup>。力学对铯原子频标的影响主要表现为以下几方面:①冲击会引起微波腔变形,导致微波腔两臂不对称,从而引起频移,频移为  $1.81 \times 10^{-15}$ ;②振动导致组成束光学功能部件位移,从而导致铯原子束流量减小,信噪比降低,稳定度指标下降;③振动会导致频标电路模块功能损坏。

温度变化会导致铯原子速率分布产生变化,会引起二级多普勒频移,提高铯炉的控温精度以及减小机箱内部温度波动可以将此项频移降低到  $10^{-15}$  量级<sup>[2]</sup>。温度变化引起微波腔形变,造成腔体失谐,另外铯原子频标微波链路放大器件存在温度系数,造成微波功率波动,是造成铯原子频标存在温度系数的主要原因<sup>[8]</sup>。当外界温度变化引起微波腔膨胀或者缩小,造成微波腔失谐,相对频移与温度变化的关系为

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} = -\Delta c \frac{T_c^2}{T_i^2} \alpha \Delta T。 \quad (1)$$

式(1)中:  $\frac{\Delta\nu}{\nu_0}$  为频率的相对变化;  $\nu_0$  为原子跃迁中心频率;  $\alpha$  为微波腔材料的线性膨胀系数;  $T_c$  为微波腔响应时间;  $T_i$  为原子在两个振荡场之间的飞行时间特征参数;  $\Delta c$  是与微波功率和频率调制深度有关的参数;  $\Delta T$  为温度变化,在室温下,当温度变化  $1^\circ\text{C}$  时,频率牵引可能达到  $1.6 \times 10^{-13}$ <sup>[6]</sup>。

当微波腔谐振频率未准确调谐到原子中心跃迁频率  $\nu_0$  上,激励跃迁微波场强与共振线不对称,使表观中心频率偏离  $\nu_0$ ,会对中心跃迁频率产生牵引,其相对值为<sup>[6]</sup>

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} = \frac{T_c^2}{T_i^2} \Delta c \frac{\Delta\nu_c}{\nu_0}。 \quad (2)$$

式(2)中,  $\Delta\nu_c$  为微波腔失谐频率,当微波腔失谐  $0.1 \text{ MHz}$  时,腔体频率牵引可能达到  $10^{-13}$  量级,如果微波功率变化  $1 \text{ dB}$  时,频率牵引可达到  $2.3 \times 10^{-13}$ 。

磁屏蔽的剩磁不均匀以及温度变化引起 C 场电流的变化会导致 C 场的不均匀和不稳定,进而造成 Zeeman 频率或  $\sigma$  跃迁高频频差测量不准从

而带来 C 场频移误差<sup>[1]</sup>,其计算公式为

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} = 3.46 \times 10^{-10} \frac{\Delta H}{H_0}。 \quad (3)$$

式(3)中,  $\Delta H$  为磁场变化量,  $H_0$  为 C 场强度,目前由于磁屏蔽性能及工艺的不断改进和完善,磁场频移已小于  $3 \times 10^{-14}$ 。

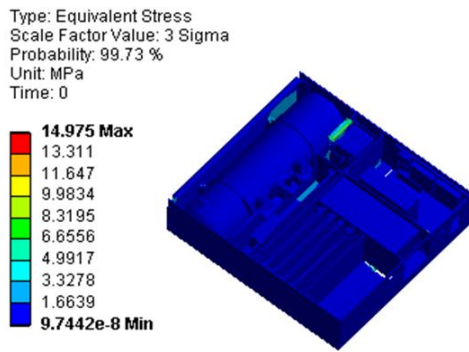
磁选态铯原子频标在测试中也发现其频率准确度及稳定度对环境温度变化较为敏感,影响了整机在温度变化环境下的性能指标,同时磁选态铯束管束光学对力学环境敏感, C 场易受到选态磁铁、检测器、溅射离子泵的强磁场影响,因此,本文通过仿真与试验分别开展了力学、温度、磁场环境适应性研究,以提高铯束频标的环境适应能力。

## 2 国产铯束频率标准抗力学设计

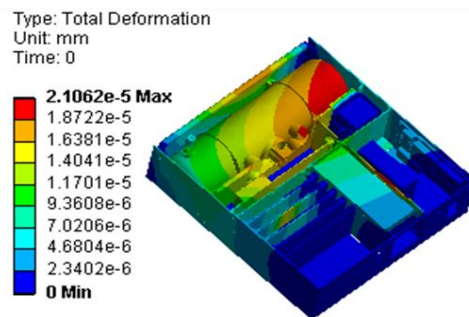
### 2.1 力学环境适应性仿真设计

为了增加铯原子频率标准的力学环境适应性,对整机结构的防振抗冲击能力进行有限元仿真分析,通过动力学特性仿真来预示结构的振动响应。进行抗力学环境设计的目的主要是提高铯原子频率标准的抗力学性能,避免铯原子频率标准发生与力学环境有关的质量问题。铯原子频标主要由铯束管和频标电路组成,通过有限元仿真,完成了模态分析、随机振动分析、正弦振动分析、冲击响应谱分析等,获得了铯原子频标在振动条件下的响应情况。铯原子频率标准产品结构基频为  $500.45 \text{ Hz}$ ,不易受低频振动影响。随机振动时铯原子频标产生的应力及变形量最大,从图 2(a)可以看出,应力主要集中在机箱底板,因此在底板采取了加强筋设计以提高结构强度,从图 2(b)可以看出整机主体结构变形最大值  $55.1 \mu\text{m}$ ,主要由铯束管管壳及高压供电电路板变形所致,但该值远小于板与板之间的安全间距。根据仿真结果对结构设计进行了分析评价,并完成了改进设计,改进措施包括铯钟各模块布局优化、工艺优化、对力学环境敏感的铯束管及束光学部件采用结构加固设计<sup>[9]</sup>,对晶振、微波模块等增加了隔振措施,抗力学设计措施可保证铯束管束光学精度,降低

晶振、微波模块等对力学环境的敏感性。



(a) 应力分布图



(b) 位移分布图

图 2 随机振动仿真应力及位移分布图

## 2.2 力学环境试验

开展了国产铯束频率标准力学环境试验，试验项目包括正弦振动、随机振动、功能冲击、倾斜跌落试验等。正弦振动及随机振动试验条件分别

见表 1 及表 2。功能冲击试验为半正弦冲击脉冲，脉冲周期 (D) 11 ms，峰值冲击值 (A) 30 g，试验期间设备工作，在每个方向及每个轴上做 3 次共 18 次冲击；倾斜跌落试验高度为 100 mm。

表 1 正弦振动试验条件

频率/Hz	共振峰 峰值 /mm	共振 搜索 时间/min	每轴 循环 时间/min	每轴共振 保持 时间/min
5 ~ 55	0.33	15	15	10

表 2 随机振动试验条件

频率 /Hz	斜率/ (dB/oct)	功率谱密度/ (g <sup>2</sup> /Hz)	持续时间
5 ~ 100	0	0.015 0	10 min/轴向
100 ~ 137	-6	-	
137 ~ 350	0	0.007 5	
350 ~ 500	-6	-	
500	-	0.003 9	

试验过程中，铯原子频标保持锁定状态，试验前后对铯原子频标的稳定度 (1 000 s) 指标进行了对比，对比结果见表 3，从表中可以看出，试验前后稳定度指标未见明显变化。说明结构改进后的铯原子频标在力学环境下性能及功能保持完好，具有很好的力学环境适应性。

表 3 力学试验前后频率稳定度指标对比

时间间隔/s	技术指标	试验前	试验后
1	$\leq 9.0 \times 10^{-13}$	$7.33 \times 10^{-13}$	$7.24 \times 10^{-13}$
10	$\leq 2.5 \times 10^{-12}$	$1.94 \times 10^{-12}$	$2.12 \times 10^{-12}$
100	$\leq 7.0 \times 10^{-13}$	$6.73 \times 10^{-13}$	$6.78 \times 10^{-13}$
1 000	$\leq 2.5 \times 10^{-13}$	$2.23 \times 10^{-13}$	$2.21 \times 10^{-13}$

## 3 国产铯束频率标准温度环境适应性设计

### 3.1 热环境仿真设计

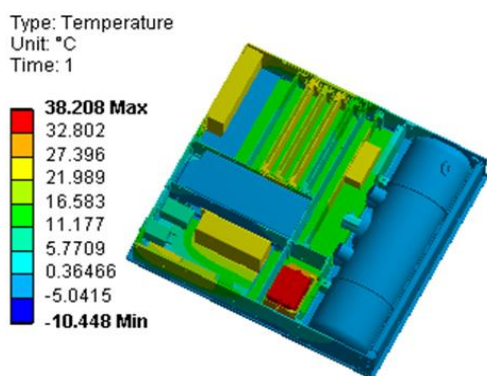
温度对铯原子频率标准性能的影响主要表现

为：① C 场频移、微波功率频移、石英晶体振荡器频移；② 温度剧烈变化，会导致铯炉控温精度降低，影响稳定度指标；③ 高温会降低铯原子频标使用寿命等。通过热设计，使热接口符合整机设计要求，保证整机电源、晶振、微波等对温度敏感模块工作温度在合理区间，同时保证铯原子频率

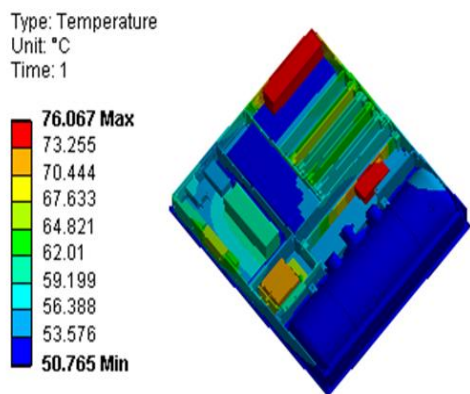
标准在高低温变化的野外环境下，都能满足稳定性及准确度指标要求。

通过建立热学模型进行热分析，并布置热传感器精确测量铯钟整机工作时，各功能模块的温度，与仿真分析结果进行比对验证，提高准确性。铯原子频标热学仿真结果见图 3，从图中可以看出在 50 °C 时，电源模块及标频模块温度最高，达到了 76 °C，通过优化功能模块的布局，将电源及标频模块安装在机箱外壳上，增加散热面积，同时采用分仓设计，减少对其他模块的影响，从而提高整机抗热学环境能力。

其他改进措施包括：① 在频标电路中增加环境温度监测电路，在铯钟伺服软件中采用频率-温度自动补偿算法实时调节频率准确度；② 对铯束管炉温监测传感器及控制算法进行改进，将炉温控制精度由  $\pm 0.5$  °C 提高到了  $\pm 0.1$  °C，减小了炉温波动对稳定度的影响。



(a) -10 °C



(b) 50 °C

图 3 铯钟热学仿真温度分布图

### 3.2 温度试验

开展了国产铯束频率标准温度环境试验，试验项目包括贮存温度试验、工作温度特性试验，其中贮存温度在 -40 °C ~ 70 °C，工作温度在 -10 °C ~ 55 °C。工作温度特性是指温度在工作温度范围内变化时，铯钟输出信号的相对频率偏差变化量，按照公式 (4) 计算，其中  $\Delta\nu$  为实测频率与标称频率差值， $T_1$ 、 $T_2$  为温度值。

$$T_c = \left( \frac{\Delta\nu_1}{\nu_0} \right)_{T_1} - \left( \frac{\Delta\nu_2}{\nu_0} \right)_{T_2} \quad (4)$$

测试了铯原子频标在不同温度下的相对频率偏差，温度-相对频率偏差曲线见图 4，由图可以看出在 10 °C ~ 30 °C 之间相对频率偏差变化平缓，温度在 40 °C 以上时，温度-相对频率偏差曲线斜率变大。在 -10 °C ~ 55 °C 温度区间内，铯原子频标工作温度特性为  $-8.18 \times 10^{-14}$ ，优于设计值  $\leq \pm 1.0 \times 10^{-13}$ 。说明铯原子频标现有结构在温度环境下性能及功能保持完好，具有很好的温度环境适应性。

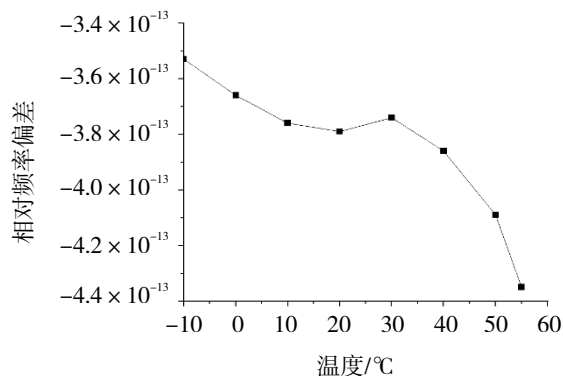


图 4 铯原子频率标准温度-相对频率偏差曲线

## 4 磁场敏感度仿真设计

磁场频移是影响铯原子频标准度的主要因素，其中铯束管内部 C 场受到磁场干扰使得 Ramsey 线型变化，从而导致铯钟准确度和稳定度的下降<sup>[10]</sup>。因此，磁选态铯原子频标采用多层磁屏蔽来屏蔽外界磁场干扰以及铯束管内部选态磁铁、溅射离子泵等强磁场的干扰。磁屏蔽选用高磁导率软磁材料，由于软磁材料的磁阻比空气



或真空的磁阻小很多,绝大部分磁力线将集中到屏蔽筒的壁中,只有非常小部分将从筒中的空间穿过,于是筒包围的空间中的磁场强度将显著降低,这就是所谓的磁屏蔽作用<sup>[11]</sup>。通过对磁屏蔽材料、安装位置等参数的迭代优化,以及补偿线圈的补偿作用,使得 C 场内部剩磁远小于 C 场场强 60 mGauss<sup>[12]</sup>。图 5 为 C 场内部剩磁仿真计算结果,由图可以看出,C 场剩磁最大值为 0.19 mGauss,C 场中心区域剩磁最大是由于微波输入窗口的漏磁导致的。

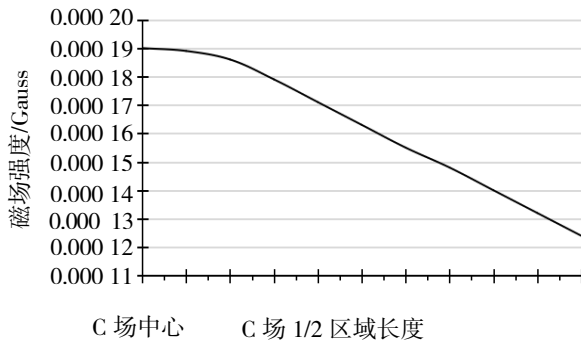


图 5 C 场内部剩磁仿真结果

铯原子频标磁场敏感度测试原理见图 6,将铯原子频标置于亥姆霍兹线圈内,在磁场强度为  $\pm 2.0$  Gauss 静磁场环境下测试铯原子频标的相对频率偏差,测试结果表明,整机磁敏感度为  $3.15 \times 10^{-14}/\text{Gauss}$ ,优于设计值  $\leq 1.0 \times 10^{-13}/\text{Gauss}$ 。

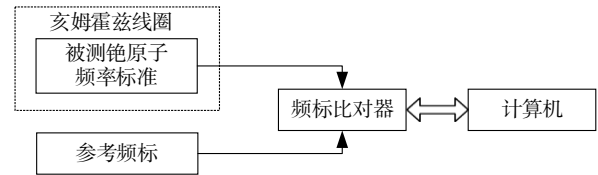


图 6 磁场敏感度测试原理框图

## 5 综合环境试验

铯原子频标在战车等机动平台工作时,经受的环境复杂多变,会受到振动、温度、湿度、低气压等环境的综合作用,从而引发故障。因此国产铯束频率标准还开展了综合环境试验,试验项目及试验条件见表 4,试验前后频率稳定度变化见表 5,试验前后指标未见明显变化。

表 4 综合环境试验项目及试验条件

序号	试验项目	试验条件
1	公路运输试验	总运输里程 1 600 km
2	湿热试验	温度 30 °C ~ 50 °C, 湿度 45% ~ 95%RH, 每个周期 24 h, 共持续 5 个周期
3	低气压试验	气压 18.8 kPa, 模拟高度 12 192 m
4	霉菌试验	黑曲霉、黄曲霉、杂色曲霉、绳状青霉、球毛壳霉作为试验菌种, 试验周期共 28 d
5	电磁兼容试验	RE102、CE102, RS103, CS101, CS114, CS115, CS116、静电放电试验

表 5 试验前后频率稳定度指标对比

时间间隔/s	技术指标	试验前	试验后
1	$\leq 9.0 \times 10^{-13}$	$7.24 \times 10^{-13}$	$7.11 \times 10^{-13}$
10	$\leq 2.5 \times 10^{-12}$	$1.93 \times 10^{-12}$	$2.02 \times 10^{-12}$
100	$\leq 7.0 \times 10^{-13}$	$6.77 \times 10^{-13}$	$6.75 \times 10^{-13}$
1 000	$\leq 2.5 \times 10^{-13}$	$2.19 \times 10^{-13}$	$2.21 \times 10^{-13}$

## 6 结论

基于国产化铯束频率标准在力学、热、低气压、磁场等环境下的适应性需求，完成了环境因素对磁选态铯束频标性能的影响机理分析，各环境因素的物理效应及引起的频移量见表 6，由表 6 可以看出，环境温度变化对铯原子频标的影响最大。

表 6 环境因素引起的频移汇总表

环境因素	物理效应	频率偏移量
力学	微波腔变形	$1.81 \times 10^{-15}$
	二级多普勒效应	$10^{-15}$ 量级
温度	腔调谐误差	$1.6 \times 10^{-13}$
	腔牵引效应	$2.3 \times 10^{-13}$
磁场	C 场不均匀和不稳定	$3.0 \times 10^{-14}$

通过仿真与试验，对整钟结构、电路等进行了优化设计，通过结构及工艺优化改进，铯束管束光学在振动环境下结构完好，整机性能指标未见明显变化；铯原子频标机箱内部采用分仓式设计，设计有相互独立的电源模块和电池舱室，减小了热效应相互影响以及电磁干扰；通过磁屏蔽优化设计，提高了磁场均匀性。铯原子频标在  $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间工作时，工作温度特性为  $-8.18 \times 10^{-14}$ ，磁场灵敏度为  $3.15 \times 10^{-14}/\text{Gauss}$ 。国产铯束频率标准在低气压、湿热、复杂电磁等环境下同样有很好的环境适应性，可满足复杂环境下的应用需求。

可能进一步改善国产铯束频标环境适应能力的措施有：① 优化铯束管束光学参数，选择慢速原子可以减小二级多普勒频移、腔牵引效应引起的频移、腔相位差频移等；② 通过软件算法结合硬件电路控制微波功率可降低温度变化引起的腔牵引效应频移<sup>[8]</sup>；③ 提高微波腔两臂的对称性，可以减小温度变化环境下，微波腔长度变化引起的腔调谐频移；④ 采用数字化电路减小温

度敏感度以及补偿算法对环境因素引起的频移进行修正。

## 参考文献：

- [1] 王义遒, 王庆吉, 傅济时, 等. 量子频标原理[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [2] VANIER J, AUDOIN C. The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards[M]. Bristol: Adam Hilger, 1989.
- [3] 翟造成, 王庆华. 发展我国的空间用高精度原子钟[J]. 宇航计测技术, 2000, 20(5): 47-20.
- [4] 陈江, 王骥, 马沛, 等. LIP Cs3000C 磁选态铯原子钟的测试[J]. 时间频率学报, 2018, 41(3): 190-193.
- [5] 杨军, 成大鹏, 郑宁, 等. 基于力-结构-磁耦合方法的铯原子钟微波腔适应性设计[C]// 第十三届中国卫星导航年会, 北京: 中国卫星导航年会组委会, 2022, 87-92.
- [6] AUDOIN C, DIMARCQ N, GIORDANO V, et al. Physical origin of the frequency shifts in cesium beam frequency standards-related environmental sensitivity[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control, 1992, 39(3): 412-421.
- [7] GJB 150.16A-2009. 军用装备实验室环境试验方法[S].
- [8] 马沛, 陈江, 董鹏玲, 等. 铯原子钟优化算法中微波幅度控制方法的研究[J]. 真空与低温, 2018, 24(6): 415-418.
- [9] 郑宁, 张涤新, 王骥, 等. 小型磁选态铯束管的抗振动性能研究[J]. 真空与低温, 2011, 17(1): 28-31.
- [10] 杨军, 陈江, 郑宁, 等. 星载铯原子钟的环境适应性研究[C]// 第十届中国卫星导航年会, 北京: 中国卫星导航年会组委会, 2019.
- [11] 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): 54-60.
- [12] 袁博, 裴小强, 陈江, 等. 星载铯钟 C 场设计及磁场分析[J]. 宇航学报, 2010, 12(31): 2813-2817.