

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2413598

超低温铯原子喷泉钟微波腔测试系统研制*

张泽^{1,2}, 王心亮², 聂帅², 郭文阁^{1,2}, 张首刚²

(1. 西安石油大学理学院 西安 710065; 2. 中国科学院国家授时中心 西安 710600)

摘要:铯原子喷泉钟是基于原子内部量子跃迁而实现的标准频率信号发生装置,广泛应用于守时系统和其它精密测量领域。超低温铯原子喷泉钟是铯原子工作在液氮(80 K)环境中的新型喷泉钟。当原子周围的温度由300 K降低到80 K时,铯原子喷泉钟的黑体辐射频移缩小187倍,黑体辐射频移的不确定度缩小79倍,微波腔相位频移和背景其他碰撞频移也会得到不同程度的改善。微波谐振腔是超低温铯原子喷泉钟的核心部件。为了使谐振腔的谐振频率和铯原子跃迁频率相近,必须对加工成型的微波谐振腔进行调谐和测试。超低温铯原子喷泉钟的微波谐振腔需要在大气、室温环境中调谐,在真空、超低温环境中使用,热胀冷缩效应引起的谐振腔的参数差别很大。为了检验谐振腔的调谐结果需要实验建立谐振腔的真实工作环境。研制了一套超低温谐振腔测试系统,依据微波谐振腔设计理论,计算了测试系统的工作参数,基于有限元方法建立了测试系统的模型,获取了超低温环境中谐振腔的温度分布。超低温谐振腔测试系统满足谐振腔对均匀温度、真空度和保温性能的所有要求。测试系统的真空度达到 10^{-2} Pa,温度调谐范围为78~86 K,控温精度为0.02 K。

关键词:铯原子喷泉钟;黑体辐射频移;频率不确定度;超低温作用区;微波谐振腔

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Development of the Ultra-low temperature cesium atomic fountain clock microwave cavity test system

Zhang Ze^{1,2}, Wang Xinliang², Nie Shuai², Guo Wenge^{1,2}, Zhang Shougang²

(1. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

Abstract: Cesium atomic fountain clocks are standard frequency signal generators based on quantum transitions in atoms, widely utilized in timekeeping systems and other precision measurement applications. The ultra-low-temperature cesium atomic fountain clock represents an advanced version of this technology, operating with cesium atoms in a liquid nitrogen (80 K) environment. Reducing the surrounding temperature from 300 to 80 K leads to a 187-fold decrease in the blackbody radiation frequency shift and a 79-fold reduction in the associated uncertainty. Additionally, improvements in microwave cavity phase frequency shifts and background collision frequency shifts are observed. The microwave resonant cavity, a critical component of the ultra-low-temperature cesium atomic fountain clock, requires tuning and testing to align its resonant frequency with the cesium atomic transition frequency. Although the cavity is tuned under atmospheric, room-temperature conditions, it functions in a vacuum and ultra-low-temperature environment, where thermal expansion and contraction cause significant parameter variations. To validate the tuning process, it is crucial to replicate the actual working conditions of the cavity experimentally. This paper describes the development of an ultra-low-temperature resonant cavity testing system. Using microwave resonant cavity design theory, the system's working parameters were calculated, and a finite element model was created to simulate the temperature distribution of the cavity in the ultra-low-temperature environment. The testing system meets all necessary requirements for uniform temperature, vacuum level, and insulation performance. Specifically, it achieves a vacuum level of 10^{-2} Pa, a

收稿日期:2024-12-16 Received Date: 2024-12-16

* 基金项目:陕西省重点研发计划(2023-YBGY-402,2024GX-YBXM-240)项目资助

temperature tuning range from 78 to 86 K, and a temperature control accuracy of 0.02 K.

Keywords: cesium atomic fountain clock; blackbody radiation shift; frequency uncertainty; ultra-low temperature action zone; microwave resonant cavity

0 引言

铯原子喷泉钟是复现“秒”定义的基准装置^[1-3]。它广泛应用于国际原子时(international atomic time, TAI)“秒长”的标校、基础物理研究、量子力学研究^[4-7]。目前,性能高的铯原子喷泉钟的准确度已进入小数 10^{-16} 量级。做为基准装置,铯原子喷泉钟需要通过自我评定的方式获得频率不确定度^[8]。在喷泉钟的诸多频移项^[9]中,由温度引起的黑体辐射频移^[10-11]和由部分残留的多普勒效应引起的腔相位频移是影响铯原子喷泉钟频率不确定度的重要频移项。低温铯原子喷泉钟是将喷泉钟的核心部件置于液氮温度(80 K),在此条件下,黑体辐射频移进入 10^{-17} 量级,几乎可以忽略;低温下谐振腔的 Q 值增大,微波腔相移的不确定度进一步降低。低温铯原子喷泉钟的核心部件是低温谐振腔^[12],为了使谐振腔的频率和铯原子共振频率相近,必须对低温谐振腔进行调谐。而低温谐振腔工作在低温和超真空的环境中,但它的调谐过程必须在大气环境中进行,因此,在对谐振腔调谐之前,必须精确的测量温度,真空度对谐振腔频率的影响。调谐完成之后也需要创造一个与超低温喷泉钟完全一致的环境对谐振腔进行测量验证。

研制了一套超低温谐振腔测试系统,该系统通过机械泵和分子泵可以在谐振腔中产生 10^{-2} Pa的真空。采用液氮浸泡降温,在2 h内谐振腔温度可以到达78 K附近。低温谐振腔温度在到达78 K后,温度每变化1 K,谐振腔频率变化80 KHz,设定谐振腔工作温度为82 K,可以通过控制温度实现对谐振腔频率的控制。系统配备了一套PID控制算法^[13-18]电路系统,采用锰铜丝双绞线制成的加热带缠绕谐振腔支撑座,通过加热实现了谐振腔温度在78~86 K可调,控温精度 <0.02 K。由控温误差引起的谐振腔频率变化与矢网自身的测量误差相当。

1 超低温谐振腔测试系统特性分析

铯原子喷泉钟的谐振腔通常设计为圆柱结构,超低温谐振腔的频率和 Q 值的改变,源自材料尺寸在热胀冷缩效应下的变化,以及材料电磁特性对温度改变的响应。利用超低温谐振腔测试系统,可以复现谐振腔在真实工作中的状态,为优化其设计和性能提供数据支持。为了减少腔内微波相位频移的影响,微波场和原子分布都设计为轴对称结构。谐振腔激发对称的TE011模式。 Q 值

是描述微波谐振腔能量储存与损耗关系的参数。 Q 值越高,能量损耗越小。TE011模的无载 Q 值如式(1)^[19]所示。

$$Q_0 = \frac{\lambda_0 \left[(p'_{01})^2 + \left(\frac{\pi R}{L} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{\delta_s \left[(p'_{01})^2 + \frac{2\pi^2 R^3}{L^3} \right]} \quad (1)$$

其中, R 、 L 分别为腔的半径和长度, p'_{01} 是第1类贝塞尔函数 $J_n(x)$ 导函数 $J'_n(x)$ 的第 m 个根,当 $n=0$, $m=1$ 时, $p'_{01}=3.832$, λ_0 为微波在真空中的波长, δ_s 为趋肤深度。

$$\delta_s = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu \sigma}} \quad (2)$$

其中, ν 为微波频率, μ 和 σ 分别为铜的磁导率和电导率。

通常谐振腔有载 Q_L 值可通过测量半功率带宽来确定。

$$Q_L = \frac{\nu_0}{BW} \quad (3)$$

谐振腔的谐振频率与腔的几何尺寸有关,对于TE011模,当腔长与腔直径相等时,可达到最大 Q 值点。TE011模的谐振频率如式(4)^[20]所示。

$$\nu_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{p'_{01}}{R} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2} \quad (4)$$

超低温铯原子喷泉钟的微波谐振腔的材料是无氧铜。依据式(4)当环境的温度发生变化时,由于铜的热胀冷缩效应,谐振腔的半径 R 和腔长 L 都会减小,从而使谐振频率和 Q 值发生变化。

铯原子的黑体辐射频移描述^[21]为:

$$\Delta\nu_{BRR} = \beta \left(\frac{T}{T_0} \right)^4 \left[1 + \varepsilon \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 \right] \quad (5)$$

其中, $T_0=300$ K, T 是以开尔文表示的环境辐射温度,系数 β 和 ε 取决于原子跃迁,可通过理论计算或实验测量获得^[22]。文中的计算,采用 $\beta = -(1.710 \pm 0.006) \times 10^{-14}$, $\varepsilon = 0.013 \pm 0.001$ 。

$$\Delta\nu'_{BRR} = \left[6\beta\varepsilon \left(\frac{T}{T_0} \right)^5 + 4\beta \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 \right] \frac{\Delta T}{T_0} \quad (6)$$

其中, ΔT 为温度的波动。

当温度在300 K时,黑体辐射相对频移为 1.7×10^{-14} ,不确定度为 $2.3 \times 10^{-16} \Delta T$ 。温度降低为80 K时,其黑体辐射相对频移为 9.1×10^{-17} ,不确定度 $2.9 \times 10^{-18} \Delta T$ 。温度由室温300 K降到80 K时,黑体辐射频移缩小了

187倍,不确定度缩小了79倍。80 K对应液氮的温度,可以较为方便的采用液氮进行温度调控。超低温铯原子喷泉钟的恒温器通过G-M制冷机系统冷却,可以提供均匀的超低温环境(环境温度78~86 K可调)。设定超低温谐振腔的工作温度为82 K附近,温度均匀性需保持在 ± 0.02 K以内。以方便后期通过温度调整来实现对谐振腔频率的精确调节。

谐振腔的真空实验表明^[23],随着系统压强的降低,谐振腔的谐振频率逐渐增大,当真空度 $<10^{-2}$ Pa以后,谐振频率趋于稳定且不再发生显著变化。

因此,为确保谐振腔调谐的准确性,谐振腔测试系统应具有超低温和高真空的性能,且通过温控系统可以实现谐振腔的温度可在78~86 K范围内调节。

2 系统概述

设计的超低温铯原子喷泉钟谐振腔测试系统如图1(a)所示,由真空腔体、分子泵机组、液氮存储罐和温控系统组成。真空腔体由真空腔和底部铜板通过钢丝密封形成,分子泵机组连接真空阀可以对真空腔进行真空抽制。液氮存储罐附带真空隔离层用于储存液氮。真空腔体底部浸入液氮对谐振腔进行降温。当温度达到平衡时(78 K),开启温控系统通过加热对谐振腔温度调节控制。测试系统内部结构如图1(b)所示,谐振腔固定在底座上,底座固定于铜板上。底座与铜板之间安装2 mm厚的陶瓷片用于控制两者间的热传导。温控系统通过加热带缠绕底座对谐振腔的温度进行加热和温度控制。

2.1 测试系统热传导设计

在谐振腔调谐过程中,需要实现谐振腔的温度接近液氮温度。因此,在系统设计过程中,必须计算热传导和热辐射后谐振腔的平衡温度。根据傅里叶热传导定律,传导热量 Q_{cu} 如式(7)^[24]所示。

$$Q_{cu} = K \cdot A \frac{\Delta T_1}{d} \quad (7)$$

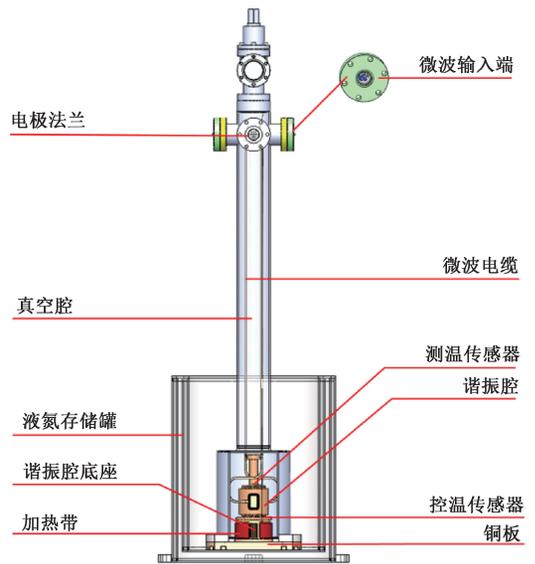
其中, Q_{cu} 表示热功率, K 表示铜的导热系数, A 表示导热的截面积, ΔT_1 表示为热端温度 T_h 和冷端温度 T_c 的差值, d 表示为传导路径长度。在超低温谐振腔测试系统中,热传导经过底部铜板、陶瓷片、谐振腔底座到达谐振腔。如图2所示为谐振腔底座高度和陶瓷片厚度对谐振腔温度的影响。

陶瓷片可以保证谐振腔绝缘性和保温性,如图2(a)所示,谐振腔能达到的最低温度随着氧化铝陶瓷片厚度的增加也在缓慢增加。且陶瓷片位于铜板与谐振腔底座之间,在液氮温度下,随着铜的热胀冷缩,对陶瓷片产生挤压,综合考虑陶瓷片硬度和谐振腔温度情况下,选择安装2 mm氧化铝陶瓷片作为隔热层,实现温度控制效果。



(a) 超低温谐振腔测试系统实物

(a) Physical diagram of the ultra-low temperature resonant cavity testing system

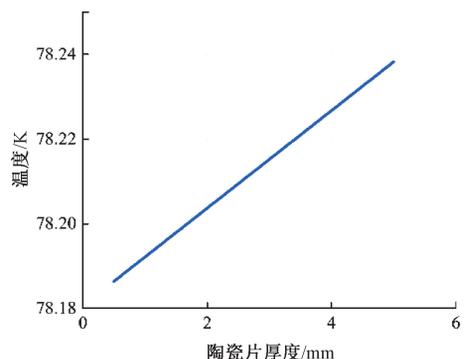


(b) 超低温测试系统结构

(b) Structural of the ultra-low temperature testing system

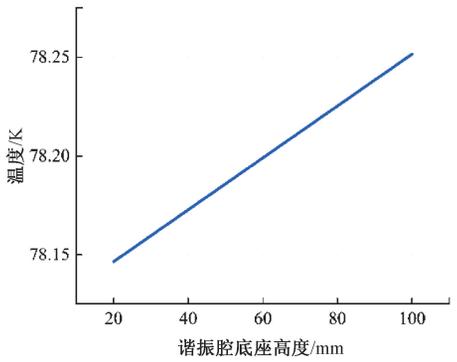
图1 超低温测试系统整体实物

Fig. 1 Overall physical representation of the ultra-low temperature testing system



(a) 陶瓷片厚度对平衡后温度的影响

(a) Effect of ceramic sheet thickness on the equilibrium temperature



(b) 底座高度对平衡后温度的影响

(b) Effect of base height on the equilibrium temperature

图2 谐振腔底座高度和陶瓷片厚度对谐振腔温度的影响

Fig. 2 Effect of resonant cavity base height and ceramic sheet thickness on resonant cavity temperature

thickness on resonant cavity temperature

其中,氧化铝的导热系数为 $170 \text{ W/m}\cdot\text{k}$ 。按照式(7)分别计算底部铜板、陶瓷片、谐振腔底座和谐振腔之间的温度,最后与真空腔产生的热辐射使温度达到平衡。底部铜板为圆形,半径为 100 mm ,热传导长度为 17 mm ,底部冷端温度为液氮温度 77 K ,铜的导热系数为 $398 \text{ W/m}\cdot\text{k}$ 。由式(7)可以得到底部铜板经由热传导后与陶瓷片的热量 Q_{Cu1} 。同样,可以计算热传导经过陶瓷片后到达谐振腔底座的热量 Q_{Cu2} 。

谐振腔底座设计为一个外半径为 40 mm 、内半径为 10 mm 的空心圆柱体,与谐振腔的下截止波导长度相匹配,热传导平衡后谐振腔的温度如图2(b)所示,随着谐振腔底座高度的增加,谐振腔能达到的最低温度也在增加。在保证谐振腔安全固定和良好导热的前提下底座选用最低高度 46 mm 。由式(7)可以得到温度经由热传导后到达谐振腔底部的热量 Q_{Cu3} 。

在谐振腔热传导计算中,将谐振腔简化为一个空心圆柱体进行热传导计算,该空心圆柱体模型较谐振腔原模型的导热截面积、热传导长度没有改变,可以满足我们的热传导计算的精度要求。该空心圆柱体谐振腔模型外半径为 31.5 mm ,内半径为 21.55 mm ,热传导长度为 70 mm ,由式(7)可以得到谐振腔底部温度经由热传导后到达谐振腔顶部的热量 Q_{Cu4} 。

在谐振腔测试系统中,与铜底座相连接的真空腔体存在向内的热辐射,谐振腔热平衡后温度高于 77 K ,公式如式(8)^[25]所示。

$$Q_T = \varepsilon_1 \cdot \sigma_1 A_1 (T_2^4 - T_e^4) \quad (8)$$

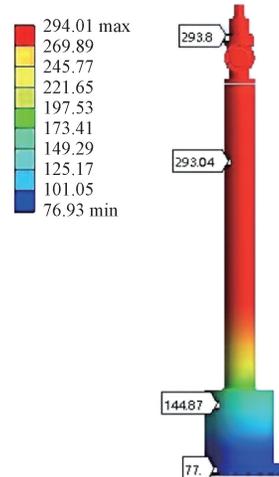
其中, ε_1 表示钛的发射率, σ_1 表示斯忒藩-玻耳兹曼常量, A_1 表示辐射表面积, T_e 表示环境温度。其中钛的发射率为 0.7 ,斯忒藩-玻耳兹曼常量为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{k}^2$,真空腔底部半径为 77 mm ,高为 1100 mm ,环境温度取真空罩的顶部温度与底部温度的平均为 150 K 。通过热辐射公式可以计算出真空腔的热辐射。最后真空腔和底部铜板、陶瓷片、谐振腔底座、谐振腔会达到热平衡,可以得到:

$$Q_{\text{Cu1}} = Q_{\text{Cu2}} = Q_{\text{Cu3}} = Q_{\text{Cu4}} = Q_T \quad (9)$$

经过理论计算可以得到谐振腔顶部的 78.2 K 。与液氮温度相差 1.2 K 。

用有限元方法对超低温谐振腔测试系统进行稳态传热分析。首先通过三维软件完成超低温谐振腔测试系统的结构建模,同时将模型导入有限元软件。其次进行材料属性设置,即对超低温谐振腔测试系统中所有模型的材料进行设置,其中底部铜板、谐振腔底座和和谐振腔的材料设置为纯铜,热导率属性设置为 $398 \text{ W/m}\cdot\text{k}$;真空腔体的材料设置为钛,热导率属性设置为 $22 \text{ W/m}\cdot\text{k}$;再进行模型的网格划分,将超低温谐振腔测试系统的网格划分为 0.005 m 。再进行对模型的接触面和摩擦进行设置,从而完成对模型的前处理。

后面对模型施加边界条件、载荷及求解设置。给该模型底部铜板设定初始温度 77 K ,真空罩内壁热辐射发射率设置为 0.7 ,温度设置随时间改变,外壁设置与环境热对流,环境温度为 295 K 。对求解时间和步长进行设置。同时对温度完成求解设置。在超低温谐振腔测试系统模型求解完成后对传热结果进行分析,如图3所示。



(a) 真空腔体温度分布

(a) Temperature distribution of the vacuum cavity



(b) 谐振腔和底座温度分布

(b) Temperature distribution of the resonant cavity

图3 超低温谐振腔调谐系统仿真分析

Fig. 3 Simulation and analysis of the ultra-low temperature resonant cavity tuning system

如图3(a)所示,为超低温谐振腔测试系统底部被液氮浸泡时对超低温谐振腔测试系统导热的温度场变化趋势分析。真空腔体顶部温度为293.8 K,真空腔体除底部浸泡液氮,其余部位均处于295 K的环境温度。底部由于与液氮接触,温度接近与液氮温度。

图3(b)为此设置条件下谐振腔温度场变化趋势,谐振腔最高温度为77.044 K,出现在谐振腔的顶部区域,最低温度为77 K,出现在底部铜板区域,谐振腔与液氮的最大温差为0.044 K。谐振腔温度满足低温谐振腔调谐要求。

因此,通过理论和仿真分析计算,所设计的超低温谐振腔测试系统完全满足谐振腔调谐的低温理论要求。

2.2 测试系统真空设计

超低温谐振腔测试系统有高真空的要求,早期测试结果表明,当系统内真空度低于 10^{-2} Pa后,微波腔的谐振频率和 Q 值趋于稳定^[24]。未来提升微波腔的测试效率,测试系统需要在短时间内达到高真空要求。

整个真空腔体整体为圆柱形,通过顶部真空法兰连接形成一个完整的真空腔体。系统的其余部分全部密封。测试系统顶部安装角阀连接分子泵机组。真空腔体顶部安装了2个电极法兰,电极法兰设置22个引脚用于温度传感器、温控系统和加热带的接线。测试系统接口采用了O型氟橡胶圈、无氧铜垫圈和钢密封圈3种密封方式,3种密封垫圈均满足高真空要求。真空系统采用了两级抽真空方案。腔体容积约为15 L。在粗抽阶段采用涡旋真空泵,抽速为8.7 L/s,从常压(1×10^5 Pa)抽至1 Pa,进入高真空阶段,采用抽速为600 L/s的涡轮分子泵,将真空进一步从1 Pa抽至 10^{-2} Pa以下。实验测量表明整个系统的高真空获得需要15 min。

2.3 测试系统温控设计

在超低温谐振腔测试实验中,谐振腔通过液氮冷却至最低工作温度后系统中的各个部件(如铜底座、陶瓷片等)仍处于不同的热平衡状态,温度分布不均匀,导致谐振腔频率不稳定,10 min之后谐振腔频率不再变化。调整谐振腔的温度,温度每变化1 K,谐振腔的频率发生80 kHz的变化。根据谐振频率的精度调谐要求,谐振腔的温度波动需要控制在 ± 0.02 K以内。

调谐系统配备了一套精确的温控系统,温控系统的原理框图如图4所示。

系统采用温控电桥作为温度控制器的核心部分,电桥由一系列特定阻值的电阻组成,通过调整电桥的阻值来设定目标温度。当温度设定时,电桥两端的电压与PT100铂电阻两端的电压形成电压差,作为反馈信号输入温控回路。

温控电桥输出电压公式 V_{out} 如式(10)所示。

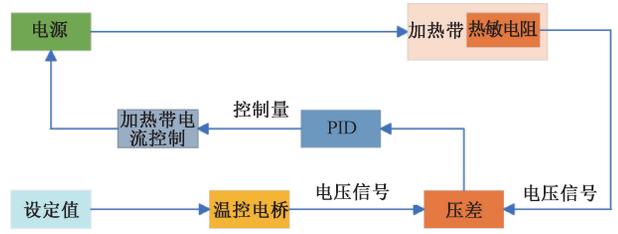


图4 温控系统原理

Fig. 4 Schematic diagram of the temperature control system

$$V_{out} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_{PT100}}{R_{ref} + R_{PT100}} \right) V_{in} \quad (10)$$

其中, R_1 和 R_2 为已知电阻, R_{PT100} 为PT100铂电阻, R_{ref} 为参考电阻, V_{in} 为输入电压。随着温度的变化, R_{PT100} 会变化,从而导致电桥输出电压变化,生成反馈信号,进而调整温度。

该反馈信号经处理和放大后,生成控制量,并输入到电流控制单元,最终产生动态变化的电流,驱动加热带进行制热调节。随着PT100铂电阻的阻值随温度变化,系统持续调节加热带的功率,直到谐振腔周围温度稳定在预设值。

加热带采用锰铜丝制成,电阻为32 Ω 。其电流由外部电流源提供,并通过电极法兰引脚与温控系统连接。系统设置的外部电流源电压为30 V,电流为0.85 A。加热带缠绕于谐振腔的底座上。温度测量部分采用PT100铂电阻,测温范围为20~500 K,为了准确监测加热带的温度,PT100传感器被置于加热带与谐振腔底座之间,确保系统在超低温环境下的温控精度。

3 超低温谐振腔测试结果与分析

将装配好的真空腔体放置于液氮存储罐中,将液氮倒入液氮存储罐内,使液氮液面没过真空腔底部真空法兰,后续不断维持液氮的深度,保证底部铜座一直处于液氮的浸泡中。

通过热敏电阻实时测量谐振腔的温度变化。如图5所示,显示了有陶瓷片和无陶瓷片时谐振腔温度变化曲线。其中无陶瓷片降温时间50 min,最低温度为78.68 K。而有陶瓷片的降温时间为90 min。其最低温度为78.72 K。两者降温时间差为40 min,其最低温度之间的温差为0.04 K。陶瓷片影响降温时间,几乎不影响降温效果。

应用温控系统对温度进行控制,分别设定温控温度为80.62、82.51和84.38 K,其控温曲线如图6所示。

对上述3个设定温度均控制13 min。当温度设定为80.62、82.51和84.38 K时,温度变化范围均在 ± 0.02 K

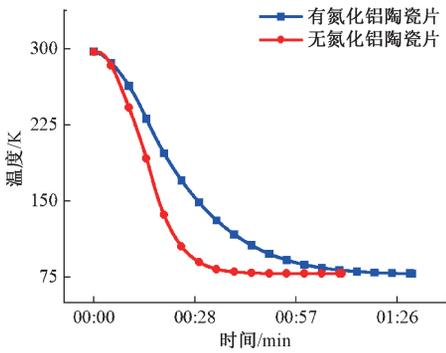


图5 谐振腔降温曲线

Fig. 5 Cooling curve of resonant cavity with and without the ceramic plate

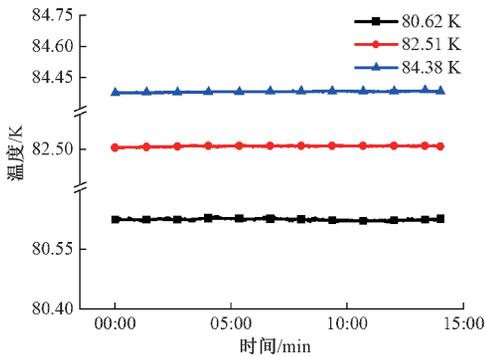
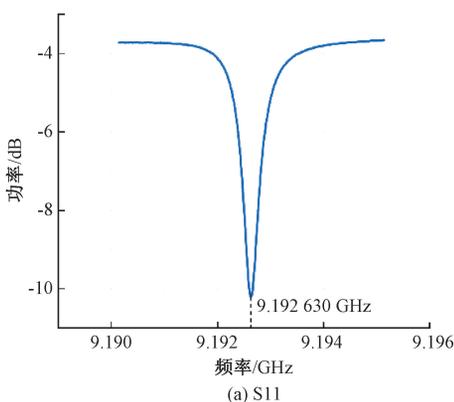


图6 谐振腔温度变化曲线

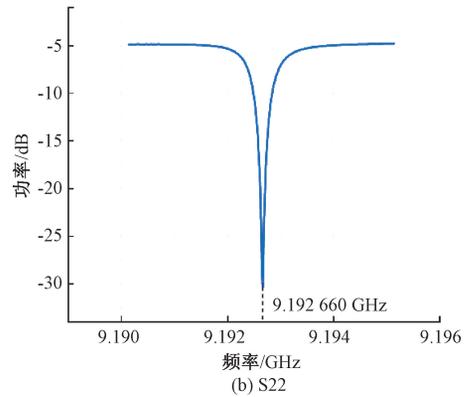
Fig. 6 Temperature variation curves of the temperature control system

内。由温度起伏引起的谐振频率测量偏差 <1.6 KHz, 完全满足超低温谐振腔的测试要求。

应用超低温谐振腔测试系统和矢量网络分析仪测量谐振腔的谐振频率, 结果如图7所示, 设置调谐系统温度为83K, S11微波吸收谱线的谐振频率为9.192 630 GHz, Q 值为23 000。S22微波吸收谱线的谐振频率为9.192 660 GHz, Q 值为17 000。



(a) S11



(b) S22

图7 超低温谐振腔测试谐振频率

Fig. 7 Resonant frequency tuning results of the ultra-low temperature resonator cavity testing system

4 结 论

超低温谐振腔的工作环境对测试系统提出了新的要求。以超低温谐振腔的调谐为目标, 通过理论分析、模拟仿真设计了超低温铯原子喷泉钟谐振腔调谐系统。并通过实验测量了谐振腔测试系统的温度、真空度和温控精度。在超低温谐振腔测试系统中, 谐振腔温度与液氮温差为1.72 K, 真空可以达到 10^{-2} Pa, 温控系统可以实现温度78~86 K可控, 精度为 ± 0.02 K。完全满足超低温铯原子喷泉钟谐振腔调谐系统的要求。超低温测试系统不仅用于谐振腔的调谐还可用于高温超导材料, 和超低温芯片等的测试研究。

参考文献

- [1] 李源昊, 陈思飞, 刘晨, 等. 高性能磁选态光检测铯原子钟的研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2): 112-119.
LI Y H, CHEN S F, LIU CH, et al. Research on high-performance compact cesium clock using magnetic state selection and optical detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 112-119.
- [2] WANG X L, RUAN J, LIU D D, et al. First evaluation of the primary frequency standard NTSC-CsF2[J]. Metrologia, 2023, 60(6): 065012.
- [3] 王倩, 魏荣, 王育竹. 原子喷泉频标: 原理与发展[J]. 物理学报, 2018, 67(16): 154-170.
WANG Q, WEI R, WANG Y ZH. Atomic fountain frequency standard: Principle and development[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(16): 154-170.
- [4] 张继海, 董绍武, 袁海波, 等. 北斗三号非差组合载波相位时间比对性能分析[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 45-53.

- ZHANG J H, DONG SH W, YUAN H B, et al. The performance analysis of BeiDou-3 undifferenced combined carrier phase time comparison [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 45-53.
- [5] 张宇,贾正森,龙波,等. 时间戳服务到 UTC(NIM)的溯源方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2): 176-183.
- ZHANG Y, JIA ZH S, LONG B, et al. Research on the traceability method of time stamp service to UTC (NIM)[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 176-183.
- [6] 阮军,王心亮,刘丹丹,等. 铯原子喷泉钟 NTSC-F1 研制进展[J]. 时间频率学报, 2016, 39(3): 138-149.
- RUAN J, WANG X L, LIU D D, et al. Progress of cesium fountain clock NTSC-F1[J]. Journal of Time and Frequency, 2016, 39(3): 138-149.
- [7] 王玉琢,徐倩,刘昆,等. NIM5 驾驭氢钟守时能力分析[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2): 129-136.
- WANG Y ZH, XU Q, LIU K, et al. Timekeeping capability analysis of steering hydrogen maser to NIM5[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 129-136.
- [8] 范思晨. 铯原子喷泉钟微波激励源研制及相关频移研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2023.
- FAN S CH. Development of microwave excitation source for cesium atomic fountain clock and the study of correlation frequency shifts [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center), 2023.
- [9] 魏荣,李耀,汪凌珂,等. 冷原子微波频标的原理与发展[J]. 中国激光, 2024, 51(11): 333-349.
- WEI R, LI Y, WANG L K, et al. Principle and development of cold atom microwave frequency standard [J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(11): 333-349.
- [10] WEYERS S, GERGINOV V, KAZDA M, et al. Advances in the accuracy, stability and reliability of the PTB primary fountain clocks [J]. Metrologia, 2018, 55(6): 789-805.
- [11] YANG F, WANG X L, RUAN J, et al. Experimental evaluation of the blackbody radiation shift in the cesium atomic fountain clock [J]. Applied Sciences, 2022, 12(1): 510.
- [12] YANG F, WANG X L, FAN S CH, et al. Development and tuning of the microwave resonant cavity of a cryogenic cesium atomic fountain clock [J]. Review of Scientific Instrument. 2022, 93(4): 044708.
- [13] 杜金清,谢艳新,赵子萱,等. 基于 PID 控制算法的恒温控制器设计与研究 [J]. 无线互联科技, 2024, 21(10): 43-49.
- DU J Q, XIE Y X, ZHAO Z X, et al. Design and research of thermostatic controller based on PID control algorithm [J]. Wireless Internet Science and Technology, 2024, 21(10): 43-49.
- [14] 夏百花,蒋龙云. 基于 Smith 预估模糊 PID 的控制温度系统的设计与仿真[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版), 2023, 37(4): 59-63.
- XIA B H, JIANG L Y. Design and simulation of temperature control system based on smith estimate Fuzzy PID [J]. Journal of Lanzhou University of Arts and Science (Natural Sciences), 2023, 37(4): 59-63.
- [15] 刘建英,郭华,郭子祺,等. 低温超导全张量磁梯度测量系统研制与应用[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(9): 165-174.
- LIU J Y, GUO H, GUO Z Q, et al. Development and application of a low temperature superconducting full tensor magnetic gradient detection system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(9): 165-174.
- [16] 李二伟,刘国宾. 高精度原子陀螺仪温控电路设计与实现[J]. 时间频率学报, 2023, 46(4): 270-278.
- LI ER W, LIU G B. Design and implementation of temperature control circuit for high precision atomic gyroscope [J]. Journal of Time and Frequency, 2023, 46(4): 270-278.
- [17] 郑本昌. 基于 PID 自动控制的高精度温控电路设计与实现[J]. 电子技术与软件工程, 2020(11): 88-90.
- ZHENG B CH. Design and implementation of high precision temperature control circuit based on PID automatic control [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2020(11): 88-90.
- [18] 马腾,张振国,李明山,等. 高精度半导体激光器温控电路的设计与实现 [J]. 激光杂志, 2024, 45(8): 19-25.
- MANG T, ZHANG ZH G, LI M SH, et al. Design and implementation of temperature control circuit for high precision semiconductor laser [J]. Laser Journal, 2024, 45(8): 19-25.
- [19] 王心亮. NTSC-F1 铯原子喷泉钟性能改进及二阶塞曼频移研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2017.
- WANG X L. Improvement of cesium fountain clock NTSC-F1 and the study of second-order Zeeman frequency shift [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center), 2017.
- [20] POZAR D M. Microwave engineering, fourth edition [M]. 2005.

- [21] MICALIZIO S, GODONE A, CALONICO D, et al. Blackbody radiation shift of the Cs-133 hyperfine transition frequency [J]. *Physical Review A*, 2004, 69(5):053408.
- [22] ANGSTMANN E J, DZUBA V A, FLAMBAUM V V. Frequency shift of hyperfine transitions due to blackbody radiation[J]. *Physical Review A*, 2006, 74(2):23405.
- [23] 杨帆. NTSC-F2 铯原子喷泉钟物理系统研制与黑体辐射频移研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2023.
- YANG F. Development of physical system of cesium atomic fountain clock NTSC-F2 and research on blackbody radiation frequency shift [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center), 2023.
- [24] 杨世铭,陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- YANG SH M, TAO W Q. Heat transfer (the fourth edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [25] 白峰. Taper 型超导腔低温恒温器的研制[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所), 2018.
- BAI F. R&D of Taper superconducting cavity cryomodule[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences (Institute of Modern Physics), 2018.

作者简介



张泽, 2020 年于西安文理学院获得学士学位, 现为西安石油大学在读硕士研究生, 主要研究方向为铯原子喷泉钟。

E-mail: 1119852568@qq.com.

Zhang Ze received his B. Sc. degree from Xi'an University of Arts and Sciences in 2020. He is currently a M. Sc. candidate at Xi'an Shiyou University. His main research interest includes cesium atomic fountain clock.



王心亮(通信作者), 2005 年于济南大学获得学士学位, 2008 年于西北大学获得硕士学位, 2017 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为中国科学院国家授时中心研究员, 主要研究方向为冷原子物理与量子频标。

E-mail: wangxl@ntsc.ac.cn.

Wang Xinliang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from the University of Jinan in 2005, M. Sc. degree from Northwest University in 2008, and Ph. D. degree from the University of Chinese Academy of Sciences in 2017. He is currently a researcher at the National Timing Center of the Chinese Academy of Sciences. His main research interests are cold atom physics and quantum frequency labeling.