

引用格式: 胡旺旺, 王瑞, 帅涛, 等. 基于 FPGA 的星载被动型氢钟数字温控技术研究[J]. 时间频率学报, 2024, 47(2): 90-96.

基于 FPGA 的星载被动型氢钟 数字温控技术研究

胡旺旺^{1,2}, 王瑞¹, 帅涛², 陈鹏飞², 赵阳², 潘晓燕², 徐昊天²

1. 上海大学, 上海 200444;
2. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030

摘要: 原子钟作为一种量子时间计量仪器, 温度变化对其长期性能有较大影响。微波谐振腔是被动型氢原子钟的核心, 分析了温度变化对谐振腔物理特性的影响, 为使被动型氢钟频率稳定度达到 $10^{-15}/d$ 量级的要求, 微波谐振腔部分的温度变化不能超过 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/d$ 。本文设计了一种低噪声的精密温度控制系统, 并对被动型氢原子钟进行温度控制。实验结果显示, 当外界环境温度变化不超过 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 44 h 内谐振腔中温度波动小于 $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$, 性能优异。该方案为被动型氢原子钟数字电路的后续改进提供了依据, 可应用于小型化星载氢钟设计。

关键词: 被动型氢原子钟; 频率稳定度; 微波谐振腔; 温度控制

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2024-02-0090-07

Research on digital temperature control technology of space passive hydrogen maser based on FPGA

HU Wang-wang^{1,2}, WANG Rui¹, SHUAI Tao², CHEN Peng-fei²,
ZHAO Yang², PAN Xiao-yan², XU Hao-tian²

1. Shanghai University, Shanghai 200444, China;
2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

Abstract: As a quantum time measuring instrument, the temperature change of atomic clock has a great impact on its long-term performance. Microwave cavity is the core of the passive hydrogen maser. This paper analyzes the influence of temperature change on the physical characteristics of the cavity. In order to make the frequency stability reach the level of $10^{-15}/d$, the temperature change of the microwave cavity should be no more than $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/d$. In this paper, a low-noise precision temperature control system is designed to control the temperature of the passive hydrogen maser. The experimental results show that when the external temperature does not change more than $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, the temperature fluctuation of the cavity is less than $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$ within 44 hours, and the performance is excellent. This scheme provides a basis for the subsequent

收稿日期: 2023-04-19; 接受日期: 2023-06-17

基金项目: 中国科学院青年创新促进会资助项目(2020264)

optimization of digital circuit of the passive hydrogen maser and can be applied to the design of a miniaturized space hydrogen maser.

Key words: passive hydrogen maser; frequency stability; microwave cavity; temperature control

被动型氢原子钟的体积和重量较小, 频率稳定度、频率漂移率和温度系数等性能优异, 作为高精度频率源被广泛应用于伽利略、北斗等卫星导航系统, 为导航卫星提供精密定位服务和长期星历预报提供了有力的技术支撑^[1-2]。

被动型氢原子钟的工作原理是: 氢原子在外部信号激励下, 从超精细能级 ($F=1, m_f=0$) 受激跃迁到超精细能级 ($F=0, m_f=0$), 产生 1 420.405 751 MHz 的感应辐射信号, 该跃迁信号在频域表现为极其稳定的频率, 利用此信号对 10 MHz 晶体振荡器的输出频率进行鉴频, 通过调整晶振端的控制电压使得晶振输出高稳定度、高准确度、低漂移率的 10 MHz 频率基准信号^[3-5], 经过时频生成与保持单元, 生成基准频率和卫星时间^[2]。

目前北斗三号卫星使用的星载氢原子钟重量为 23 kg, 输出频率的天稳定度指标在 10^{-15} 量级。氢原子钟的频率稳定度主要受到氢原子钟内部的热噪声及系统效应的影响。基本热力学通常决定 10 000 s 内的稳定度, 系统效应则作用于更长时间间隔的稳定度^[6]。在系统效应中, 腔牵引效应与二阶多普勒效应等因素都与氢原子钟谐振腔所处的温度有关。因此, 谐振腔的温度稳定性对氢原子钟的频率稳定度至关重要。被动型氢原子钟一个重要发展方向是小型化和数字化, 之前的被动型氢原子钟温度控制使用模拟电路控制, 模拟温控电路体积大, 抗干扰能力弱, 调试较为繁琐, 采用数字电路进行温度控制能够避免上述问题。

1 微波谐振腔温度变化的影响

微波谐振腔的作用是存储微波辐射能量, 提供辐射场与原子相互作用及受激辐射反馈的条件, 直接影响整机的性能指标。谐振腔温度变化对频率稳定性的影响主要表现在温度变化将产生腔牵引效应、二阶多普勒频移和泡壁频移^[7]。

1.1 腔牵引效应

当谐振腔的谐振频率与原子跃迁频率存在差异时, 氢钟的输出频率受到谐振腔频率的影响发生变化, 产生腔牵引效应。该效应的影响可通过式 (1) 表示:

$$\Delta f_0 = \Delta f_c \frac{Q_c}{Q_1} \quad (1)$$

式(1)中: Δf_0 是氢原子钟输出频率的变化; Δf_c 是谐振腔频率的变化; Q_c 是谐振腔的有载品质因数, 其含义是放入储存泡等负载后表征谐振腔储存辐射场能量效能的一个参量; Q_1 是氢原子的谱线品质因数, 其值为氢原子跃迁频率与原子谱线宽度的比值。谐振腔的谐振频率变化 Δf_c 容易受到物理因素的影响, 其中储存泡介电常数, 腔材料膨胀、腔涂银层热膨胀都与谐振腔的温度有关。原子储存泡的成分是石英, 当储存泡温度升高时, 其介电常数 ε 也会随之升高, 增加了谐振腔的负载, 使得谐振腔的谐振频率降低, 从而导致氢原子钟输出频率发生变化; 调谐频率由谐振腔的尺寸所决定, 温度变化会引起尺寸的变化, 从而导致谐振腔谐振频率发生变化; 微波谐振腔镀银提高了腔的 Q 值, 但涂层会随温度热胀冷缩, 涂层的内部张力发生变化, 并在一定程度上改变腔的形状, 对谐振腔谐振频率产生影响^[6-8]。

为了降低温度变化对氢原子钟输出频率的影响, 被动型氢原子钟内部有变容二极管, 通过改变其两端的电压来调整变容管电容量, 进而调整微波腔内的电容分布参数, 从而微调谐振腔的谐振频率, 抑制腔牵引效应。采用双频信号探测的方式进行腔自动调谐使腔频保持锁定, 文献[9]分析了双频方案的原理以及一种将腔频误差和晶振误差信号分离提取的方法。

1.2 二阶多普勒频移

二阶多普勒效应与原子运动方向无关, 由二阶多普勒效应引起氢原子钟的相对频移可通过式 (2) 表示:

$$\frac{\Delta f_D}{f_0} = -1.4 \times 10^{-13} T. \quad (2)$$

式(2)中: Δf_D 为氢原子钟因二阶多普勒效应引起的输出频率的变化, T 为谐振腔的温度, f_0 为氢原子钟输出的中心频率^[7]。由式(2)可知, 相对频移与温度成正比, 温度变化对频移影响很大, 因此储存泡保持恒温有助于得到较好的频率稳定度。为了使氢原子钟实现 $10^{-15}/d$ 量级的频率稳定度, 储存泡温度变化必须小于 $0.07 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.3 泡壁频移

氢原子在与储存泡壁的每次碰撞会导致相互作用着的原子和辐射场发生相位移动, 导致频移, 称为泡壁频移。壁移受温度影响, 原子的平均速度和单次碰撞的平均相移都和温度有关^[6]。在 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 壁移与温度的关系可通过式(3)表示:

$$\Delta f_w = \frac{KA_b}{6V_b} [1 + \alpha(t_1)(t - t_1)]. \quad (3)$$

式(3)中, Δf_w 为氢原子钟输出频率的变化, K 为壁移系数, A_b 为储存泡的表面积, V_b 为储存泡的体积, α 为壁移的温度系数, t 为谐振腔的温度, t_1 为参考温度^[10]。通过计算, $\frac{1}{f_0} \times \frac{\partial \Delta f_w}{\partial t} = 4.8 \times 10^{-13} /^\circ\text{C}$, 为了使氢原子钟实现 $10^{-15}/d$ 量级的频率稳定度, 储存泡温度变化必须小于 $0.02 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2 温度控制系统设计

在氢原子钟外层屏蔽上放置热敏电阻和加热丝, 用于探测和控制外炉温度; 在微波腔的中部和底部放置热敏电阻和加热丝, 用于探测和控制内炉温度。通过这种方式形成了对微波谐振腔的二级精密控温, 有利于提高微波谐振腔的控温精度。

被动型氢原子钟的温控系统主要由温度数据采集模块、控制器模块、驱动加热模块和电源模块组成, 温控系统框图如图1所示。温度采集模块包括惠斯通电桥回路、多路复用器电路和放大电路, 主要功能是将电阻差转换成电压差, 使用数字开关对不同桥路的电压差进行选取, 传入放大电路进行信号放大。控制器模块以现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)芯片为核心, 对温度采集模块输出的电压进行采样和数据处理, 产生脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)输出信号随后进行电阻电容(resistor capacitor, RC)滤波。驱动加热模块的主要器件是电压转换器, 将 $0 \sim 3.3 \text{ V}$ 电压转换为 $0 \sim 28 \text{ V}$ 功率驱动电压, 作为氢原子钟内部加热丝电压对物理部分进行加热控制。电源模块使用高精度直流电压源为系统供电。将加热电压和热敏电阻接入数据采集仪进行采集, 实时监测加热电压的状态和微波谐振腔的温度情况。

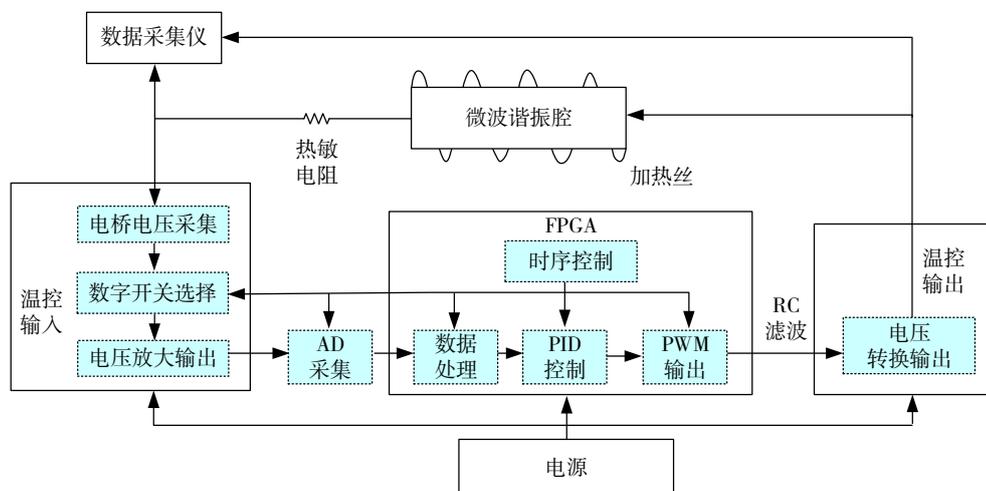


图1 温控系统结构

2.1 桥路电压差采集

在被动型氢原子钟微波谐振腔的腔底，腔中和外屏蔽 3 个位置分别放入两个同一型号的热敏电阻，一个构成电桥回路用于温度控制，另一个用于温度监测。电桥回路如图 2 所示，其中 R_1 ， R_2 ， R_3 ， R_5 是精密电阻， R_2 和 R_3 阻值相等， R_4 是热敏电阻， V_{cc} 是电桥的基准电压。通过选择 R_5 阻值，可设定微波谐振腔的温度。 C_1 ， C_2 ， C_3 ， C_4 为滤波电容，用于滤除电源中的低频和高频分量，减少电源纹波对温度控制的干扰。电桥回路的电压差如式 (4) 所示：

$$V_1 - V_2 = V_{cc} \times \frac{R_2(R_4 - R_5)}{(R_2 + R_4)(R_2 + R_5) + R_1(2R_2 + R_3 + R_5)} \quad (4)$$

从式 (4) 可看出，当氢钟热敏电阻阻值与设定电阻阻值不等时，会产生电压差，通过这种方式将电阻差转换成电压差。本实验对微波腔的腔中、腔底和外屏蔽进行了控温，存在多个电桥回路，需要使用多路复用器进行回路选择，根据地址线的输入选择相应的桥路电压差进行输出。电桥回路输出的电压差很小，需要精密仪表放大器 U_0 进行电压放大，放大之后输出电压如式 (5) 所示：

$$V_{out} = (V_1 - V_2) \times G + V_{ref} \quad (5)$$

式 (5) 中， G 为放大器增益， V_{ref} 为基准电压。

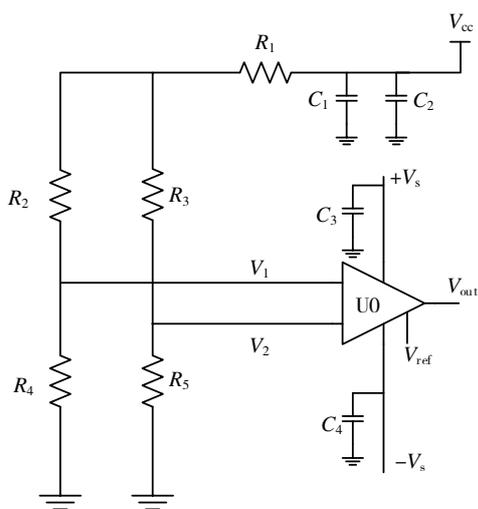


图 2 电桥电压采集

2.2 控制电路

温控系统使用的是 Xilinx 公司的 Virtex 系列

高性能芯片，以此为核心控制整个电路正常工作。热敏电阻 52 ℃ 时的阻值为 20 341 Ω，此时运放输出电压随热敏电阻变化如图 3 所示，基本呈线性，热敏电阻变化 1 Ω 引起输出电压变化为 0.001 6 V。由前文分析可知，谐振腔温度变化不能超过 0.02 ℃/d，在 52 ℃ 附近热敏电阻变化 1 Ω 反应温度变化 0.001 4 ℃，模拟到数字 (analog to digital, AD) 采样分辨出热敏电阻 1 Ω 的阻值变化便能满足电路识别出远小于 0.02 ℃ 温度变化的要求，则 ADC 芯片有效位数需要大于 $1b\left(\frac{5}{0.0016}\right) = 11.6$ ，因此使用 14 位高精度 ADC，完成对电压差的采集。

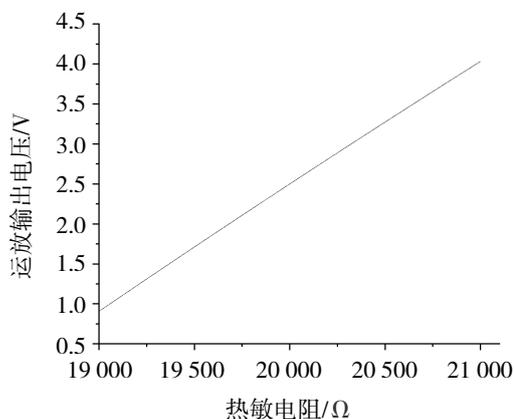


图 3 运放输出电压与热敏电阻关系

FPGA 中温控模块程序的功能是：根据时序产生复用选择器所需要的地址信号，实现对不同电桥回路的选取；对 AD 采样的数据进行滤波处理，减少温度数据采集过程中的干扰；使用 PID (proportional integral differential) 控制方法产生 PWM 控制信号。使用 Xilinx 自带的 Chipscope 软件对程序进行数据采集和调试。

PID 控制因其结构简单、稳定性好、工作可靠及使用方便等优点而被广泛应用于工业控制领域。PID 控制系统由比例项，积分项和微分项组成。当系统误差产生时，比例项使被控量朝着误差减小的方向前进，比例系数影响系统的响应速度和调节精度，其缺点是系统存在静态误差；积分项使误差不断累积，从而消除系统的静态误差，其缺点是存在积分饱和现象；微分项对误差变化趋势进行预测，从而改善系统的动态特性^[11-13]；

这 3 个参数的选择要在电路中不断尝试进行确定。数字温控电路的优势是很方便的在软件中调整比例项、积分项和微分项系数，模拟温控电路中由于存在多级放大电路，系数的改变需要更换电阻和电容，增益不易调整。而且数字温控电路元器件数量少更有利于集成，氢钟数字电路如图 4 所示。

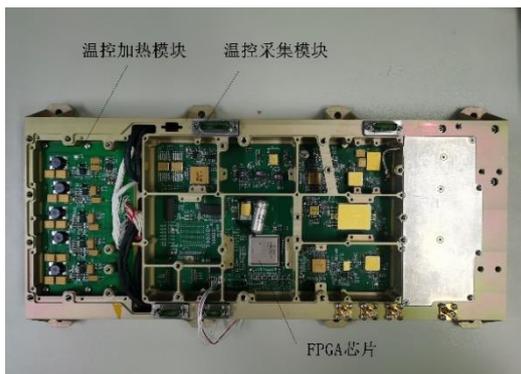


图 4 被动型氢钟数字电路

温度系统控制的流程是：初始状态时氢原子钟内部的温度接近室温，与设定温度相差最大，此时以最大功率进行加热；当温度接近设定温度时，使用 PID 控制算法对加热电压进行调整，使得温度逐渐稳定在设定温度值附近；当氢钟内部温度超过设定温度值一定范围时，停止加热。由于氢原子钟热容相对较大，温度变化缓慢，微分项的影响很小，实验中仅使用比例和积分项进行控制。软件实现 PID 算法时使用变速积分方式提高积分项的控制精度和积分项限幅方法避免系统震荡，通过这两种改进方式来保证系统可靠稳定工作。

脉冲宽度调制 (PWM) 是一种使用程序来控制波形占空比、周期、相位的技术，通过改变其占空比就能使得 FPGA 的输入输出 (input output, IO) 管脚输出不同的控制电压^[13-14]。基于脉冲宽度调制的温度控制系统具有很多优点，但是其缺点之一是容易引入高纹波对温控系统的控制电压稳定性产生影响。实验使用 RC 滤波电路将 PWM 信号转换成等效的直流控制信号。经过仿真分析与实验验证，二阶滤波器对 PWM 信号纹波的衰减是一阶滤波器的两倍以上。可见，二阶 RC 滤波器纹波更小，滤除高频效果更好。

2.3 加热电压输出

电压转换器根据不同的输入电压产生不同的加热电压，经过 RC 滤波后的直流电压驱动能力较小。因此使用直流-直流变换器 (direct current-direct current, DC-DC) 将输入电压 V_{in} 进行电压转换，产生合适的加热电压 V_{out} 和加热功率，恒温加热电路原理图如图 5 所示。

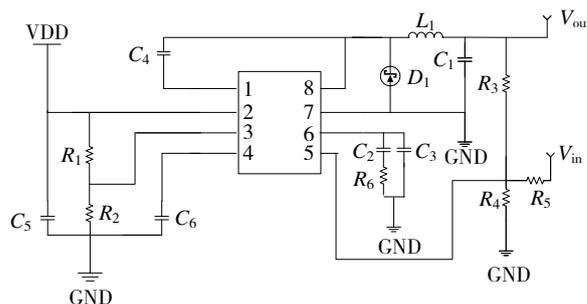


图 5 恒温加热电路

使用 FPGA 产生线性变化的电压 V_{in} ，对恒温加热电路的输入电压 V_{in} 和输出电压 V_{out} 进行采集，电压变化随时间关系如图 6 所示，加热电压 V_{out} 与输入电压 V_{in} 线性相关，有利于系统实现对原子钟温度的控制。

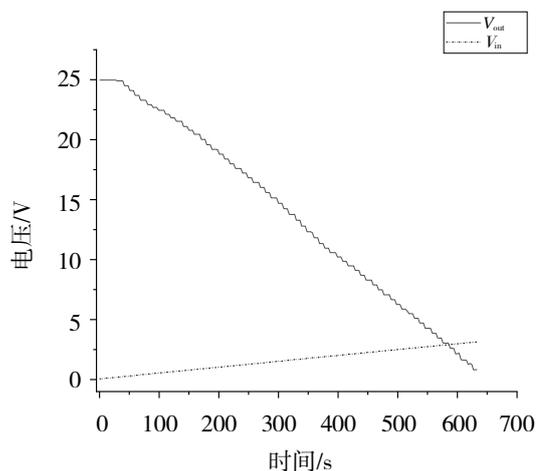


图 6 电压变化曲线

3 实验分析

本文使用一台质量为 23 kg 的被动型氢原子钟，将物理部分与电路部分连接进行闭环测试。星载被动型氢钟在轨运行过程中，卫星平台温度

变化不超过 1 °C。实验室环境温度通过中央空调控制，设定为 28 °C，实测每日温度变化不超过 1 °C。将谐振腔腔中，腔底和外屏蔽上的热敏电阻引出，使用高精度数据采集仪对 3 路电阻值进行采集，采样间隔为 10 s，温控测试环境如图 7 所示。

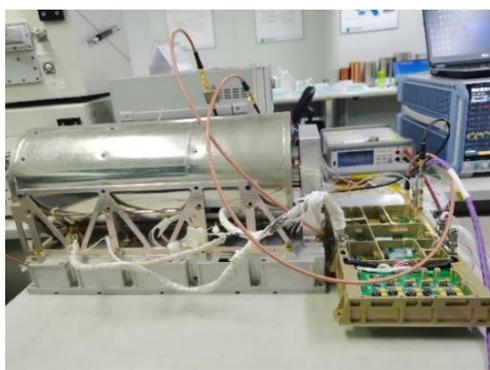
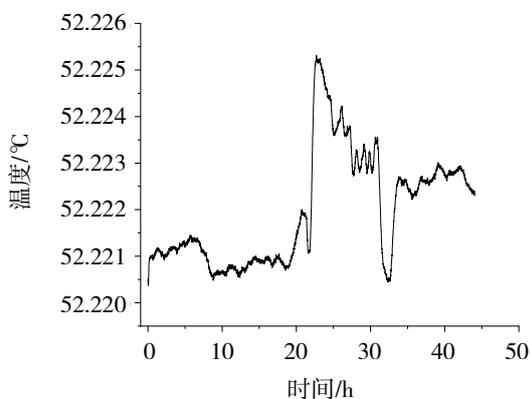
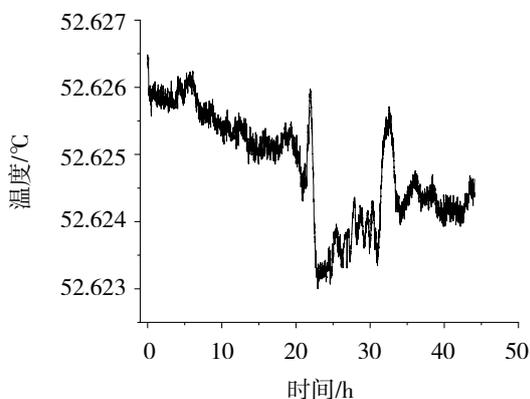


图 7 温控测试

按照热敏电阻与温度的转换公式将电阻值转换成温度，温度稳定后结果如图 8 所示。



(a) 腔中温度变化曲线



(b) 腔底温度变化曲线

图 8 谐振腔温度变化曲线

图 8 是氢原子钟谐振腔温度随时间变化关系，采集时间为 44 h。图 8 (a) 表示 44 h 内谐振腔腔中温度的变化，其最高温度为 52.225 3 °C，最低温度为 52.220 4 °C，温度变化 0.004 9 °C；图 8 (b) 表示 44 h 内谐振腔腔底温度的变化，其最高温度为 52.626 5 °C，最低温度为 52.623 0 °C，温度变化 0.003 5 °C。谐振腔温度变化大幅优于 0.02 °C，为实现 $10^{-15}/d$ 量级的频率稳定度提供了坚实基础。

图 9 是氢原子钟外屏蔽温度随时间变化关系，采集时间为 44 h，其最高温度为 40.497 8 °C，最低温度为 40.335 3 °C，温度变化 0.162 5 °C。外屏蔽处于外层与外界有更多的热交换，受环境影响温度变化较大，通过对外屏蔽进行温度控制有效降低了外部温度波动对微波谐振腔的影响，能更好地保持内炉温度稳定。

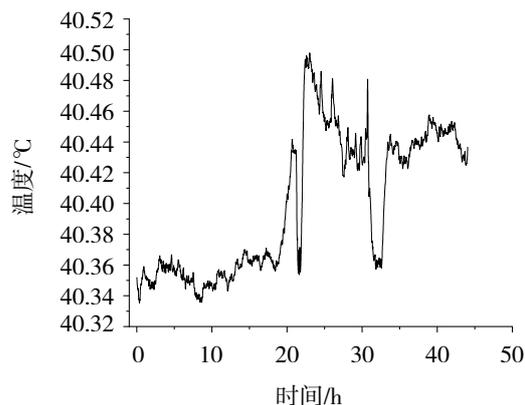


图 9 外屏蔽温度变化曲线

对稳定后的温度数据进行分析得到表 1，通过对微波谐振腔的二级精密控温，其在 44 h 内温度变化小于 0.005 °C，谐振腔温度控制达到预期目标。

表 1 温控数据分析 单位：°C

位置	平均值	均方差	温度变化
腔中	52.222 0	0.001 2	0.004 9
腔底	52.624 8	0.000 8	0.003 5
外屏蔽	40.399 7	0.045 7	0.162 5

4 结论

对于氢原子钟的长期频率稳定度受谐振腔温

度变化影响的问题,本文设计了数字控温电路并采用PID算法进行温度控制,经过实验验证,当外界环境温度变化不超过1℃时,谐振腔中温度稳定后变化小于0.005℃/d,设计的数字温度控制系统满足性能需求。此后将继续对温控程序进行参数调整优化,对数字电路进行长期稳定性测试,以更好适用于超小型星载被动型氢原子钟。

参考文献:

- [1] 潘志兵, 谢勇辉, 帅涛, 等. 小型化星载被动型氢原子钟研制[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 105-112.
- [2] 帅涛, 林宝军, 张军, 等. 北斗导航卫星氢原子钟性能分析评估[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2021, 51(1): 125-134.
- [3] 陈煜舒, 帅涛, 陈鹏飞. 被动型氢原子钟原子跃迁谱线测试与分析[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(4): 38-44.
- [4] 赵春勃, 张荣彦, 张强, 等. 被动型微波原子钟跃迁谱线测量技术研究[J]. 时间频率学报, 2022, 45(1): 34-43.
- [5] 李锡瑞, 蔡勇. 氢原子钟频率合成器设计[J]. 时间频率学报, 2022, 45(1): 44-51.
- [6] 翟造成, 杨佩红. 影响氢原子钟长期稳定度的系统效应分析[J]. 宇航计测技术, 2008(3): 9-14+30.
- [7] 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.
- [8] 翟造成. 氢脉泽谐振腔频率-温度效应分析[J]. 宇航计测技术, 2006(5): 7-11.
- [9] 赵广东, 陈鹏飞, 刘杰, 等. 一种基于星载氢钟误差信号提取的实现方法[J]. 计量学报, 2021, 42(2): 239-244.
- [10] 刘海峰, 尹学玉, 赵红. 陕西天文台守时用氢原子钟[J]. 时间频率学报, 1994(S1): 31-34.
- [11] RUSIA P, BHONGADE S. Design and implementation of digital PID controller using FPGA for precision temperature control[C] // 2014 6th IEEE Power India International Conference (PIICON), IEEE, 2014: 1-4.
- [12] GANI M M, ISLAM M S, ULLAH M A. Optimal PID tuning for controlling the temperature of electric furnace by genetic algorithm[J]. SN Applied Sciences, 2019(1): 1-8.
- [13] YUN X, DENG Z H, WANG X W, et al. Design of incremental PID controller based on FPGA[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 602: 830-833.
- [14] 邓宏彬. MSC121X 系统级单片机原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.