

引用格式：孙文龙, 史丰丰, 王骥, 等. 基于温度漂移补偿的原子钟性能优化技术研究[J]. 时间频率学报, 2025, 48(4): 308-316.

基于温度漂移补偿的原子钟性能优化技术研究

孙文龙¹, 史丰丰¹, 王骥², 苏牡丹³, 徐金锋¹,

李国俊¹, 付桂涛¹, 赵润¹, 王丽亚¹

1. 北京卫星导航中心, 北京 100094;
2. 兰州空间技术物理研究所, 兰州 730000;
3. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

摘要: 针对铯原子钟与氢原子钟在宽温域环境下频率稳定性不足的问题, 首次提出基于多物理场耦合建模的温度漂移补偿方法。通过理论分析热膨胀、多普勒效应及磁场温变耦合机制, 建立线性回归补偿模型, 并设计实时反馈控制系统。实验表明: 国产铯原子钟温度系数由 $3.28 \times 10^{-14}/^{\circ}\text{C}$ 优化至 $4.9 \times 10^{-15}/^{\circ}\text{C}$, 补偿效率达 85.1%; 国产氢原子钟温度系数由 $3.24 \times 10^{-14}/^{\circ}\text{C}$ 降低至 $9.3 \times 10^{-15}/^{\circ}\text{C}$, 补偿效率达 71.3%。本方法突破了传统恒温控温技术限制, 为高精度原子频标的环境适应性优化提供了新范式。

关键词: 铯原子钟; 氢原子钟; 频率漂移; 温度系数; 性能提升; 时间频率

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2025-04-0308-09

Research on the performance optimization technology of atomic clocks based on temperature drift compensation

SUN Wen-long¹, SHI Feng-feng¹, WANG Ji², SU Mu-dan³, XU Jin-feng¹,

LI Guo-jun¹, FU Gui-tao¹, ZHAO Run¹, WANG Li-ya¹

1. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China;
2. Lanzhou Institute of Physics, China Academy of Space Technology, Lanzhou 730000, China;
3. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

Abstract: To address the insufficient frequency stability of cesium and hydrogen atomic clocks under wide temperature ranges, this study proposes for the first time a temperature drift compensation method based on multi-physics coupled modeling. By theoretically analyzing the coupling mechanisms of thermal expansion, Doppler effect, and magnetic field temperature variations, a linear regression compensation model was established and integrated with a real-time feedback control system. Experimental results demonstrate that the temperature coefficient of domestic-made cesium atomic clocks was optimized from $3.28 \times 10^{-14}/^{\circ}\text{C}$ to $4.9 \times 10^{-15}/^{\circ}\text{C}$, achieving a compensation efficiency of 85.1%, while that of domestic-made hydrogen atomic

clocks decreased from $3.24 \times 10^{-14}/^\circ\text{C}$ to $9.3 \times 10^{-15}/^\circ\text{C}$, with a compensation efficiency of 71.3%. This method breaks through the limitations of conventional constant temperature control techniques and establishes a new paradigm for enhancing environmental adaptability in high-precision atomic frequency standards.

Keywords: cesium atomic clocks; hydrogen atomic clocks; frequency drift; temperature coefficient; performance improvement; time and frequency

时间频率广泛用于科学技术研究、国家经济和国防建设,尤其是在卫星导航、通信互联网、深空探测、载人航天、金融电力、目标探测和拦截、联合作战和精确打击等领域,都离不开高精度时间频率提供支持^[1-3]。原子钟作为一种高精度的时间频率标准,在这些领域中发挥着至关重要的作用^[4-5]。除原子喷泉基准钟外,全球各守时实验室的守时型原子钟主要是氢原子钟和铯原子钟,这些原子钟要求长期运转,要具有很高的可靠性和环境稳定性^[6-7]。

然而,原子钟在实际应用中面临着一个重要的问题,即温度变化对其性能有着显著影响^[8-12]。温度波动会导致原子钟中的原子跃迁频率发生漂移,从而降低原子钟的稳定性和准确性。此外,晶振作为原子钟的重要组成部分,其振荡频率会随着温度的变化而发生偏移,当温度发生变化时,晶振内部的物理性质会发生微小的变化,从而导致频率的偏移。这种频率偏移会影响到晶振的稳定性和精度,进而影响到整个电子设备的性能。这种温度漂移现象在不同类型的原子钟中普遍存在,严重制约了原子钟的性能提升和广泛应用。

目前,配置原子钟的实验室都是重点关注场所,常年温度维持在 $\pm 1^\circ\text{C}$,甚至达到 $\pm 0.2^\circ\text{C}$,或者配套原子钟专用恒温箱,这些都给长期运行带来较大的维护保障压力。当前,温度漂移补偿设计主要集中在铷原子钟上^[13-15],而大部分国内外氢原子钟和铯原子钟均未考虑温度漂移补偿设计。随着氢原子钟和铯原子钟的大量应用,改善其环境适应性特别是温度特性需求迫切,在已有提出原子钟房控温要求、配套原子钟专用恒温箱的工程解决方案之外,研究温度漂移补偿方法,通过温度漂移补偿实现原子钟性能优化^[16-17],进而在原子钟后续优化设计中推广普及,对于从根本上改善原子钟温度特性具有重要意义。

1 理论分析

1.1 温度对原子钟影响的机制分析

在原子钟中,温度变化对原子跃迁频率有着重要的影响,以下是对其影响机理的分析。

1.1.1 热膨胀效应

温度变化会引起原子钟中物理结构的热膨胀^[18-19]。这可能导致原子腔的尺寸发生微小变化,从而改变原子所处的电磁场环境。例如,原子钟中的微波腔尺寸变化会影响微波场的频率和强度分布,进而影响原子与微波场的相互作用。热膨胀还可能影响原子的束缚势场,改变原子的能级结构。这种能级结构的变化会直接影响原子的跃迁频率。

设原子腔的初始尺寸为 L_0 ,温度变化量为 ΔT ,热膨胀系数为 α ,则尺寸变化量为 $\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$ ^[20]。这会改变原子所处的电磁场环境,进而影响原子跃迁频率。

1.1.2 多普勒效应

温度变化会导致原子的热运动加剧或减弱。根据多普勒效应,原子的热运动速度会影响观测到的原子跃迁频率。当原子向观测者运动时,跃迁频率会升高;当原子远离观测者运动时,跃迁频率会降低。温度升高时,原子的平均热运动速度增加,多普勒效应更加显著,从而使原子跃迁频率发生偏移。

设温度变化会影响原子的热运动速度 v ,由多普勒频移公式得 $\Delta f_D = f_0 \sqrt{\frac{1-v/c}{1+v/c}}$,其中 c 是光速, f_0 是原子在静止状态下的跃迁频率。原子的平均热运动速度与温度有关,可通过麦克斯韦-玻尔兹曼分布^[21]来计算。

1.1.3 碰撞频移

温度升高会增加原子与周围气体分子或其他

原子的碰撞频率。这些碰撞会导致原子的能级发生微小变化,从而引起原子跃迁频率的偏移,即碰撞频移。碰撞频移的大小与温度、气体压力、原子种类等因素有关。在高真空环境下,碰撞频移可以减小,但无法完全消除。

设碰撞频移量为 Δf_c ,它与温度 T 、气体压力 P 、原子种类等因素有关。一般可以通过实验测量得到在不同温度和压力下的碰撞频移数据,然后建立经验公式来描述。

1.1.4 磁场变化

温度变化可能会引起原子钟中磁场的变化^[22]。例如,温度变化会导致磁性材料的磁化强度发生改变,从而影响磁场的强度和分布。原子的跃迁频率对磁场非常敏感,即使是微小的磁场变化也可能导致跃迁频率的显著偏移。因此,温度引起的磁场变化是影响原子跃迁频率的一个重要因素。

设温度变化会引起磁场的变化量 ΔB ,原子跃迁频率对磁场的敏感度为 β ,则磁场变化引起的频率偏移^[18]为 $\Delta f_B = \beta \Delta B$ 。

综上所述,温度变化对原子频标中原子跃迁频率的影响机理是复杂的,涉及到热膨胀效应、多普勒效应、碰撞频移、磁场变化等多个因素。

1.2 温度漂移补偿模型

基于对原子钟温度影响机制的分析,采用数学建模的方法,建立温度与原子钟频率漂移之间的定量关系,为温度漂移补偿提供理论依据。本文建立了以下 3 种温度漂移的数学模型。

1.2.1 模型一

由上述温度对原子能级的影响,可建立总频率漂移表达式,如公式(1)所示:

$$\Delta f = \Delta f_{\text{ther}} + \Delta f_D + \Delta f_c + \Delta f_B \quad (1)$$

式(1)中, Δf_{ther} 是热膨胀引起的频率偏移, Δf_D 是多普勒频率, Δf_c 是碰撞频移, Δf_B 是磁场变化引起的频移。

1) 热膨胀引起的频率偏移

热膨胀导致的原子腔尺寸变化会改变微波场的频率和强度分布,从而影响原子跃迁频率。设微波场的频率与原子尺寸的关系为 $f = \frac{c}{2L}$ (其中 c

是光速, L 是原子腔尺寸),则热膨胀引起的频率偏移为^[22]:

$$\Delta f_{\text{ther}} = -\frac{c}{2L_0^2} \Delta L = -\frac{c \alpha L_0 \Delta T}{2L_0^2} = -\frac{c \alpha \Delta T}{2L_0} \quad (2)$$

2) 多普勒频移

根据麦克斯韦—玻尔兹曼分布,原子的平均热运动速度 $v = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}$,其中 k_B 是玻尔兹曼常数, m 是原子质量,将其代入多普勒频移公式可得:

$$\Delta f_D = f_0 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}/c}{1 + \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}/c}} \quad (3)$$

3) 碰撞频移

碰撞频移是原子或分子因与环境粒子碰撞引起的跃迁频率偏移现象^[23],其与温度(T)、压力(P)等参数的依赖关系可通过实验数据拟合为经验公式:

$$\Delta f_c = \gamma P^\delta T^\varepsilon \quad (4)$$

式(4)中, γ 、 δ 、 ε 是通过实验确定的系数。

4) 磁场变化引起的频率偏移

磁场变化引起的频率偏移为 $\Delta f_B = \beta \Delta B$,其中 β 表示原子跃迁频率对磁场的敏感度,其数值通过塞曼效应实验测定, ΔB 可以通过温度变化与磁场的关系来确定^[24], $\Delta B = \eta \Delta T$,其中 η 是温度变化对磁场的影响程度,由磁屏蔽材料温度系数决定,则:

$$\Delta f_B = \beta \eta \Delta T \quad (5)$$

可以看出,热膨胀引起的频率偏移和磁场变化引起的频率偏移与温度变化呈线性关系,多普勒频移和碰撞频移与温度变化呈非线性关系。铯原子钟采用磁选态技术,原子速度分布由选态磁铁决定,一阶多普勒频移可忽略,二阶多普勒频移受温度影响在 1×10^{-14} 量级,同时由于采用热原子束技术,原子间碰撞及频移也已经降低到可忽略程度。主动型氢原子钟的多普勒频移、碰撞频移与温度呈正相关,温度高频移大,温度低频移小,具体关系较为

复杂,受原子热运动速度、缓冲气体压力以及钟腔材料特性等因素影响,在设计确定后主要依靠严格控制钟腔温度并在钟伺服控制电路中补偿。考虑到多普勒频移和碰撞频移随温度变化是钟设计的主要研究内容,假定在设计阶段已经得到很好补偿,这里仅考虑热膨胀引起的频率偏移和磁场变化引起的频率偏移,与温度变化呈线性变化。

1.2.2 模型二

令原子钟的标称输出频率为 f_0 , 取样时刻的实际输出频率为 f , 那么相对频率偏差的定义为

$$y(\tau) = \frac{f - f_0}{f_0} = \frac{\Delta f}{f_0} \quad (6)$$

通常情况下,不考虑外界环境因素变化的影响,一个频率源输出的系统模型为

$$y(\tau) = y_0 t + at + y_r(\tau) \quad (7)$$

式(7)中, y_0 表示初始时刻的相对频率偏差, a 表示频率漂移系数或老化率, y_r 表示随机项,主要由频率源内的噪声决定。

温度对原子钟输出频率的影响在工程上一般用温度系数衡量,定义为原子钟输出频率的相对频差变化量除以原子钟温度的变化量。设原子钟在温度为 T_0 时对应的输出频率为 f_0 , 其他条件不变情况下参考温度变为 T' 时输出频率对应为 f' , 那么温度系数可表示为

$$S_T = \frac{f' - f}{f_0 \cdot (T' - T_0)} = \frac{y'(\tau) - y(\tau)}{\Delta T} \quad (8)$$

式(8)中, $\Delta T = T' - T$ 为温度差。

由于原子钟的相对频差在一定范围内是随机变化的(由随机游走噪声、白噪声等决定),因此温度系数 S_T 测试通常在不同温度测试点上保持一个固定的较长测量时间段进行。根据该定义可以获得受温度影响后的原子钟相对频差,即:

$$y'(\tau) = y(\tau) + S_T \cdot \Delta T = y_0 + a\tau + y_r(\tau) + S_T \cdot \Delta T \quad (9)$$

式(9)中, $y(\tau)$ 表示未受温度影响的原子钟相对频差,根据温度系数和温度变化可以预测出受影响后的原子钟相对频差 y' 。在上述的线性模型中,隐含了一个参考温度 T_0 , 即假定温度为 T_0 时的原子钟相对频差数据已经修正到无温度影响水平。

考虑温度特性的一般性,用函数 $y_a(\tau)$ 代替频率漂移模型,用函数 $y_T(T)$ 代替温度系数模型,那么受温度影响后的原子钟相对频差为

$$y'(\tau) = y(\tau) + S_T \cdot \Delta T = y_0 + y_a(\tau) + y_r(\tau) + y_T(T) \quad (10)$$

1.2.3 模型三

在线性模型的温度系数定义上进一步变换:

$$y'(\tau) = S_T(T' - T_0) + y(\tau) = S_T T' + y(\tau) - S_T T_0 = S_T T' + y_c(\tau) \quad (11)$$

式(11)中, $y_c(\tau) = y(\tau) - S_T T_0 = y_0 + a\tau + y_r(\tau) - S_T T_0$, 忽略随机项的起伏变化,这个项基本为常数。因此,直接对环境温度—相对频率偏差的序列进行线性回归,即可以获得温度系数 S_T 。

总的来说,模型一从物理机制建立完整理论框架,模型二揭示温度系数时域特性,模型三是前两者的工程简化。受限于实时测量原子运动速度、局部压力等参数的可行性,本文重点验证模型三,后续可通过模型一物理机制分析进一步指导补偿算法的改进。

1.3 温度漂移补偿算法设计

根据建立的温度漂移数学模型,设计相应的补偿算法。补偿算法的目标是通过实时监测和分析,预测频率漂移的大小,并采取相应的补偿措施,使原子钟的输出频率保持稳定。本文设计了如下温度漂移补偿模型。

原子钟的温度漂移抑制补偿后相对频差为

$$y(\tau) = y'(\tau) - S_T \cdot \Delta T \quad (12)$$

式(12)中,温度漂移补偿量为

$$\Delta y(T') = -S_T \cdot (T' - T_0) = -S_T \cdot \Delta T \quad (13)$$

根据式(13),实时测试原子钟的温度 T' , 然后计算相对于参考温度 T_0 的温度差,与温度系数 S_T 之积的负数作为当前输出相对频率偏差的温度漂移补偿量,输出到频率调整单元,即可输出温度漂移补偿后的频率信号。

原子钟温度漂移抑制补偿的具体过程如下。

1) 首先,在温度系数测试阶段获得环境温度

—相对频率偏差数据, 根据式 (12) 采用线性回归方法获得温度系数 S_T ;

2) 然后, 根据获得的温度测量值 T' 计算出温

度差 ΔT , 根据式 (13) 计算出补偿调整值 Δy ;

3) 最后, 将补偿调整值 Δy 反馈到频率调整单元, 根据温度变化进行补偿。

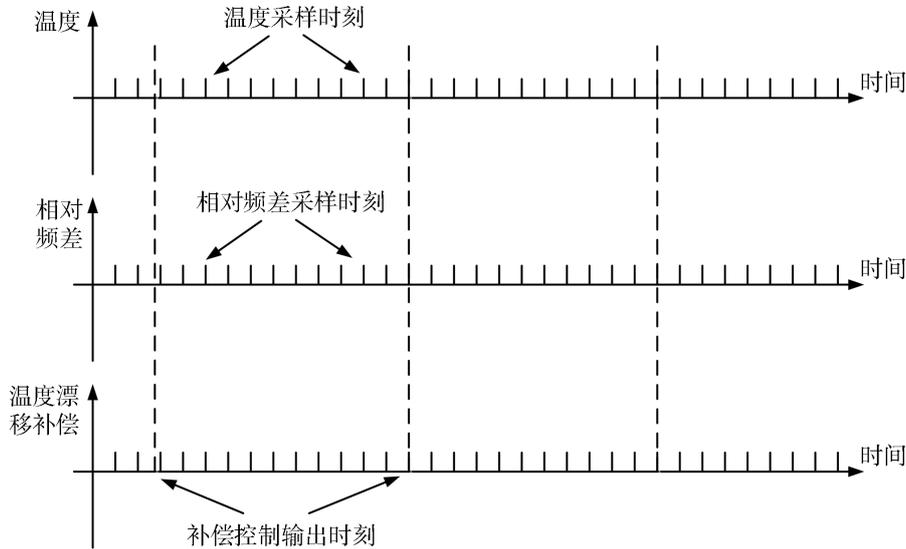


图 1 原子钟温度漂移补偿过程

温度漂移补偿的调频量和调频时间与原子钟的温度特性有关。温度是缓变量, 环境温度传递到原子钟的钟腔并影响原子运动和缓冲气体压力需要更长的时间, 响应时间通常在数分钟至数小时, 而且温度系数的量级在 $5 \times 10^{-13}/^{\circ}\text{C}$ 及以下, 通常影响 10 s 以上采样间隔的稳定度。因此, 调频时间选择在 10 s 以内就能保证温度漂移补偿系统的响应速度, 调频量根据测得的温度变化量和温度系数实时计算, 若温度系数为 $1 \times 10^{-13}/^{\circ}\text{C}$, 10 s 采样时的温度变化一般不超过 0.2°C , 那么最大调频量为 2×10^{-14} , 几乎不会对守时原子钟 1 s 和 10 s 稳定度产生影响, 更长采样间隔时间的稳定度会随着温度漂移被补偿变好。

总之, 调频量的选取应综合考虑原子钟的频率稳定性要求和温度变化的速率。当温度变化较快时, 需要较大的调频量来及时补偿频率漂移; 而当温度变化较缓慢时, 较小的调频量即可满足补偿需求。具体的调频量可以根据温度变化量和温度系数进行调整, 同时还可以引入一个调整因子 k , 以平衡补偿效果和系统稳定性。在调频时间方面, 应根据原子钟的响应时间和温度变化的周期来确定。如果原子钟响应速度较快, 且温度变化周期较短, 可

以实时进行调频补偿; 若原子钟响应速度较慢, 或者温度变化周期较长, 则可以设置适当的调频间隔时间。在每次调频补偿后, 需要监测原子钟的频率稳定性, 若频率波动较大, 则需要调整调频量和调频时间, 直到原子钟达到稳定的输出频率。通过这样的方式, 可以更详细地设计温度漂移补偿算法, 提高原子钟在不同温度环境下的频率稳定性。

2 实验验证

2.1 软硬件环境搭建

本文搭建了 1 套硬件测量平台, 设计了 1 套测量控制软件, 集成后形成 1 套温度漂移抑制补偿系统, 如图 2 所示, 包括了 1 台温度测量单元、1 台频率测量单元和 1 台频率调整单元。

温度补偿系统工作流程如下。

1) 计算机定时从测温测量单元和频率测量单元获得被测原子钟的环境温度—相对频率偏差数据。

2) 利用环境温度—相对频率偏差数据序列, 计算机根据温度系数定义计算出温度系数。

3) 计算机根据获得的当前环境温度和温度

系数，计算出温度漂移补偿量，发送到频率调整单元，频率调整单元根据该补偿量输出补偿后的频率信号。

特别地，根据温度变化一般不超过 1℃/min 或

0.2℃/10 s 的要求和温度系数优于 $1 \times 10^{-13}/\text{℃}$ 的实际情况，单次补偿量不超过 2×10^{-14} ，取频率调整间隔时间为 10 s，这样不会影响到原子钟频率稳定率。

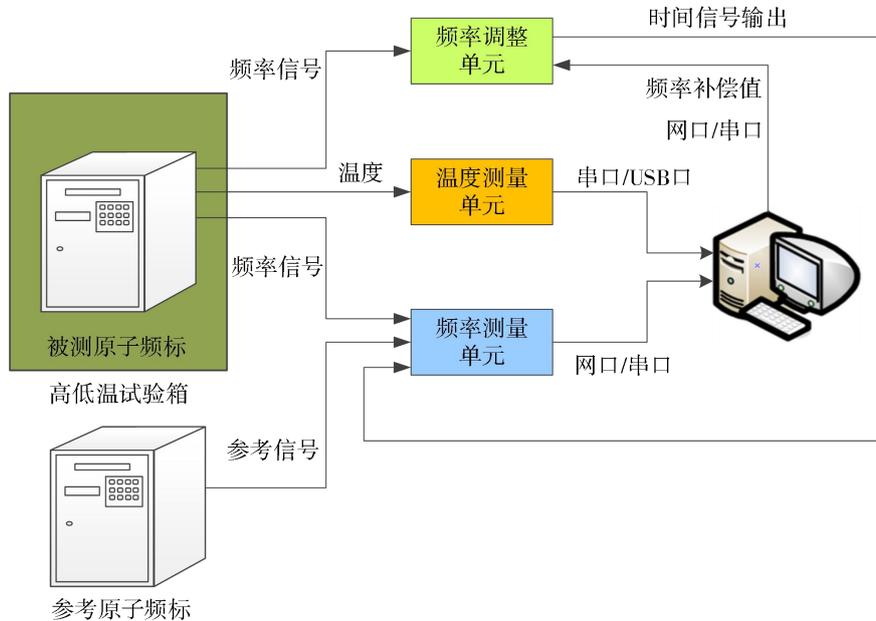


图 2 温度补偿系统结构框图

2.2 性能测试

2.2.1 补偿前后铯原子钟温度系数测试

按照《GB/T 39724-2020 铯原子钟技术要求及测试方法》，铯原子钟温度系数的测试步骤如下。

- 1) 调节高低温试验箱的温度，设定初始温度值为 18℃。
- 2) 使原子钟充分预热。
- 3) 设置高低温试验箱的温度，使其温度按图 3 时序变化，温度变化速率 $\leq 1\text{℃/min}$ ，每个固定温度点持续时间 $\Delta t \geq 12\text{ h}$ 。

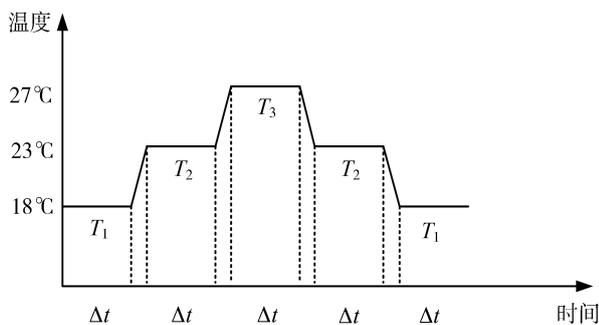


图 3 铯原子钟温度系数测试时序图

- 4) 连续测量一个温度周期内相对频率偏差，

去除每个温度点下前 4 h 数据，计算 $(\Delta t - 4\text{ h})$ 的铯原子钟相对频率偏差平均值 $\bar{y}_i(\tau)$ ， i 为不同温度点序号，按照式 (14) 计算温度系数 S_i ，其中温度间隔为 ΔT ：

$$S_i = \left| \frac{\bar{y}_{i+1}(\tau) - \bar{y}_i(\tau)}{\Delta T} \right| \quad (14)$$

- 5) 取 S_i 最大值作为铯原子钟温度系数，即：

$$S_T = \max S_i \quad (15)$$

温度系数描述输出特性随温度变化的程度，以单位温度变化（每变化 1℃）引起设备信号输出特性（相对频率偏差）变化量来表示。GB/T39724-2020 根据铯原子钟产品测试实际情况，在宽温度范围内每个温度点的温度系数不完全是线性变化的，即不同温度区间温度系数不一样，为使温度系数覆盖 18℃ ~ 27℃ 整体范围，测试方法中给出了最大值计算方法，即规定了允许误差范围，这符合铯原子钟一般在宽温条件下工作的使用环境需求。具体地，我们选取了 18℃、23℃ 和 27℃ 共 3 个温度点开展了测试，补偿前后测试结果分别示于表 1 和表 2。

表 1 补偿前铯钟测试结果

温度变化	变化量	变化率	最大值
18℃~23℃	$-7.567 9 \times 10^{-12} \sim -7.597 4 \times 10^{-12}$	$-5.912 0 \times 10^{-15}/\text{℃}$	
23℃~27℃	$-7.597 4 \times 10^{-12} \sim -7.466 3 \times 10^{-12}$	$3.278 4 \times 10^{-14}/\text{℃}$	$3.28 \times 10^{-14}/\text{℃}$
27℃~23℃	$-7.466 3 \times 10^{-12} \sim -7.535 9 \times 10^{-12}$	$1.739 9 \times 10^{-14}/\text{℃}$	
23℃~18℃	$-7.535 9 \times 10^{-12} \sim -7.528 6 \times 10^{-12}$	$-1.456 9 \times 10^{-15}/\text{℃}$	

表 2 补偿后铯钟测试结果

温度变化	变化量	变化率	最大值
18℃~23℃	$-7.548 9 \times 10^{-12} \sim -7.536 4 \times 10^{-12}$	$2.507 7 \times 10^{-15}/\text{℃}$	
23℃~27℃	$-7.536 4 \times 10^{-12} \sim -7.516 8 \times 10^{-12}$	$4.896 1 \times 10^{-15}/\text{℃}$	$4.9 \times 10^{-15}/\text{℃}$
27℃~23℃	$-7.516 8 \times 10^{-12} \sim -7.518 7 \times 10^{-12}$	$4.808 0 \times 10^{-16}/\text{℃}$	
23℃~18℃	$-7.518 7 \times 10^{-12} \sim -7.513 3 \times 10^{-12}$	$1.088 9 \times 10^{-15}/\text{℃}$	

2.2.2 补偿前后氢原子钟温度系数测试

一般主动型氢原子钟的温度系数测试方法如下。

1) 将待测氢钟置于恒温室或恒温箱中, 测量被测氢钟信号与参考氢钟信号之间的频差。

2) 温度设置为 23℃, 保持该温度, 用计算机采集 10 h 频差测量数据。

3) 温度设置为 18℃, 保持该温度, 用计算机采集 10 h 频差测量数据。

4) 温度设置为 27℃, 保持该温度, 用计算机采集 10 h 频差测量数据。

5) 温度设置为 23℃, 保持该温度, 用计算机采集 10 h 频差测量数据。

6) 通过测量参考氢钟与被测氢钟的相对频率偏差, 计算各温度段的相对准确度随温度的变化, 取最大值为被测氢钟的温度系数。

按照上述测试方法, 对氢原子钟的温度系数开展了测试, 补偿前后测试结果分别如表 3 和表 4。

表 3 补偿前氢钟测试结果

温度变化	变化量	变化率	最大值
23℃~18℃	$-9.531 \times 10^{-13} \sim -1.115 \times 10^{-12}$	$3.243 \times 10^{-14}/\text{℃}$	
18℃~27℃	$-1.115 \times 10^{-12} \sim -1.095 \times 10^{-12}$	$6.298 \times 10^{-15}/\text{℃}$	$3.24 \times 10^{-14}/\text{℃}$
27℃~23℃	$-1.095 \times 10^{-12} \sim -1.076 \times 10^{-12}$	$4.400 \times 10^{-15}/\text{℃}$	

表 4 补偿后氢钟测试结果

温度变化	变化量	变化率	最大值
23℃~18℃	$-8.237 \times 10^{-13} \sim -8.386 \times 10^{-13}$	$2.975 \times 10^{-15}/\text{℃}$	
18℃~27℃	$-8.386 \times 10^{-13} \sim -7.548 \times 10^{-13}$	$9.307 \times 10^{-15}/\text{℃}$	$9.3 \times 10^{-15}/\text{℃}$
27℃~23℃	$-7.548 \times 10^{-13} \sim -7.579 \times 10^{-13}$	$7.570 \times 10^{-16}/\text{℃}$	

2.3 小结

上述实验结果表明: 国产铯原子钟温度系数可由 $3.28 \times 10^{-14}/^{\circ}\text{C}$ 优化至 $4.9 \times 10^{-15}/^{\circ}\text{C}$, 补偿效率达 85.1%; 国产氢原子钟温度系数可由 $3.24 \times 10^{-14}/^{\circ}\text{C}$ 降低至 $9.3 \times 10^{-15}/^{\circ}\text{C}$, 补偿效率达 71.3%。

在模型验证完整性方面, 铯原子钟温度系数 S_T 的测试和计算按照如 2.2.1 节所述《GB/T 39724-2020 铯原子钟技术要求及测试方法》规定的方法开展, 氢原子钟温度系数 S_T 的测试和计算按照 2.2.2 节开展, 在温度漂移补偿前完成, 然后以 10 s 为间隔实时测量当前温度 T' 和设定温度 T_0 , 计算出温度漂移补偿量输出到频率调整单元, 即可输出温度漂移补偿后的频率信号, 补偿量为 $\Delta y(T') = -S_T \cdot (T' - T_0)$ 。模型中的温度系数测试、补偿量计算和输出技术方法在文中进行了验证, 但受限于实验条件仅对两种类型原子钟进行了测试, 后续可以利用上述搭建的实验平台对更多类型或数量的原子钟开展验证。

3 结论

本文对铯原子钟和氢原子钟的温度漂移补偿技术开展了研究, 从原子能级角度分析了温度对原子钟频移变化的影响, 建立了一种既适合铯原子钟又适合氢原子钟的基于线性回归的温度系数补偿模型。实验结果表明该温度漂移补偿模型能够有效降低国产铯原子钟和氢原子钟的温度系数(至少降低 1 倍以上)。通过对该方法的进一步推广, 特别是开展小型化和集成化研究, 可以在国产原子钟产品的优化设计中普及, 从根本上改善国产原子钟温度特性, 为我国原子钟设计能力和产品水平提高奠定基础。不过也需注意, 本文提出的原子钟温度漂移抑制补偿方法采用了线性模型补偿, 即对应于温度引起热膨胀引起的频率偏移和磁场变化引起的频移, 适用于主要是这 2 类温度漂移的抑制补偿的原子钟, 对多普勒频移和碰撞频移的补偿可能效果不明显甚至恶化, 因此, 需要对该模型进一步完善和验证。

参考文献:

- [1] 刘博, 徐博, 虞万荣, 等. 美国量子网络技术研究进展及军事应用展望[J]. 国防科技, 2024, 45(1): 62-71.
- [2] 许龙霞, 刘娅, 李孝辉. GNSS 授时与时间同步在基础设施行业的应用[J]. 航空学报, 2024, 45(S1): 730567.
- [3] 陈雨锋, 王波. 光纤时间频率同步技术及应用[J]. 仪器仪表学报, 2024, 44(2): 47-62.
- [4] 刘昆, 房芳. 基准微波原子钟[J]. 物理, 2023, 52(7): 441-448.
- [5] PETIT G, ARIAS F, PANFILO G. International atomic time: status and future challenges[J]. Comptes Rendus Physique, 2015, 16(5): 480-488.
- [6] LI S, LI C, WU J, et al. Test and analysis of timekeeping performance of atomic clock[J]. Sensors, 2022, 22: 9886.
- [7] 安卫, 张虹. 守时钟房温湿度监测系统[J]. 时间频率学报, 2018, 41(4): 347-353.
- [8] LIU S, WU X, HU H, et al. Frequency-temperature effect of hydrogen maser: theoretical analysis and temperature control optimization[J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(7): 073201.
- [9] GUO Y G, ZHANG J, WANG S, et al. Study on the effect of excitation circuit of spectral lamp on the temperature coefficient of physics package of rubidium atomic clock[C]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Navigation:[s.n], 2019, 685: 172-178.
- [10] PARKER T E. Environmental factors and hydrogen maser frequency stability[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 1999, 46(3): 745-751.
- [11] OLGA K, STEPHANEAND G, EMERIC C D. Temperature and pressure shift of the Cs clock transition in the presence of buffer gases: Ne, N₂, Ar[J]. Physical Review A, 2011, 83(6): 062714(1-9).
- [12] 薛文祥, 陈江, 杜志静, 等. 温度对 POP Rb 原子钟性能影响的研究[J]. 时间频率学报, 2012, 35(3): 129-136.
- [13] 任良, 崔敬忠, 陆昉, 等. 铷原子钟温度补偿技术研究[J]. 宇航计测技术, 2012, 32(4): 21-24.
- [14] GUO Y G, ZHANG J, WANG S W, et al. Temperature coefficient optimization of the physics package of rubidium atomic clock[J]. Applied Magnetic Resonance, 2021, 52(9): 1187-1200.

- [15] 张文玺, 崔敬忠, 廉吉庆, 等. 铷原子频标温度系数补偿技术研究[J]. 真空与低温, 2021, 27(2): 199-204.
- [16] DOWD A V. Improved temperature compensation of atomic clocks and INS instruments using multivariate model-based design optimized for real-world operating conditions[C] // Proceedings of the 49th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Reston: Virginia, 2018: 111-124.
- [17] VICARINI R, MOUSTAFA A H, VINCENT M, et al. Mitigation of temperature-induced light-shift effects in miniaturized atomic clocks[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2019, 66(12): 1962-1967.
- [18] BOYD M M, YE J. Optical atomic clocks[J]. Reviews of Modern Physics, 2015, 87(2): 637-701.
- [19] CLAUDE A, BERNARD G. The measurement of time: time, frequency and the atomic clock[J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13(2): 230..
- [20] 胡安, 章维益. 固体物理学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [21] PATHRIA R K, BEALE P D. Statistical Mechanics[M]. 3rd ed. British: Elsevier Academic Press, 2011.
- [22] 杨福家. 原子物理学[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [23] MAXWELL J C. Illustrations of the dynamical theory of gases[J]. The Nature of Gases and of Heat, 1965: 148-171.
- [24] 戴道生. 物质磁性基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2016.