

引用格式: 史丰丰, 程梦飞, 李国俊, 等. 国产守时型原子钟长期性能分析[J]. 时间频率学报, 2023, 46(4): 279-288.

国产守时型原子钟长期性能分析

史丰丰¹, 程梦飞¹, 李国俊¹, 付桂涛¹, 马红皎²

1. 北京卫星导航中心, 北京 100094;
2. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600

摘要: 利用近两年半的原子钟与 UTC 测试数据, 从时差数据、频差数据、频率漂移率和频率稳定度等方面, 分别对国产和国外守时型氢原子钟、铯原子钟的长期性能(频率漂移、月频率稳定度)进行了评估和对比分析。结果表明: 国产氢原子钟和铯原子钟已经具备长期稳定运行的能力, 可以基本满足国内工业部门在时间频率领域对原子钟的需求。国产铯原子钟的性能与国外铯原子钟基本相当, 但在长期性能方面还有一定差距, 国产氢原子钟与国外最好的氢原子钟相比, 性能上还略有差距。

关键词: 国产原子钟; 守时型; 氢钟; 铯钟; 长期性能; 频率漂移; 月频率稳定度

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2023-04-0279-10

The long-term performances analysis of the domestic timekeeping atomic clocks

SHI Feng-feng¹, CHENG Meng-fei¹, LI Guo-jun¹, FU Gui-tao¹, MA Hong-jiao²

1. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China;
2. National Time Service Center, Chinese Academic of Sciences, Xi'an 710600, China

Abstract: With the observed data over about 2.5 year between the clocks and UTC, the performances of the domestic and the foreign active hydrogen and cesium atomic clocks are compared in aspects of data quality, frequency accuracy, frequency drift rate and frequency stability. The results show that the domestic hydrogen and cesium atomic clocks can operate continuously and steadily in a long time, and the performances of the domestic clocks can meet the needs of the industrial departments in the field of time and frequency application for atomic clocks. The performances of the domestic cesium atomic clocks are nearly the same with the foreign, but there are still gaps in the long term performance. Meanwhile, the performances of the domestic hydrogen atomic clocks is slightly lower than that of the foreign.

Key words: domestic atomic clocks; timekeeping clocks; active hydrogen atomic clocks; cesium atomic clocks; the long-term performance; frequency drift; frequency stability at a month

0 引言

时间频率系统是国家的關鍵基础设施，通信、电力、卫星导航、测绘等各行各业都需要统一精确的时间基准。原子钟是时间频率系统的核心设备，目前只有中、美、俄、瑞士等少数国家具有独立研发能力，原子钟按用途分为星载原子钟和地面时间保持原子钟，其中星载原子钟主要应用于卫星导航系统，分为氢原子钟、铯原子钟和铷原子钟^[1]，国内外守时实验室主要采用氢原子钟和铯原子钟进行时间保持，最典型的就是参与国际原子时 TAI，目前参与国际计量局 BIPM 保持的协调世界时 UTC 计算的是全世界的 593 台原子钟（截至 2022 年 9 月）^[2]，其中，商品铯原子钟有 366 台，占 62%，氢原子钟有 220 台，占 37%，其他的包括实验室铯喷泉钟和实验室铷喷泉钟等共计 7 台，占 1%，如图 1 所示。以上所述原子钟只有 6 台是国产原子钟，来自中国科学院国家授时中心（NTSC），采用的成都天奥电子公司生产的 TA-1000 型铯原子钟^[3]。可见，我国时间频率领域核心设备的自给率有待提高。

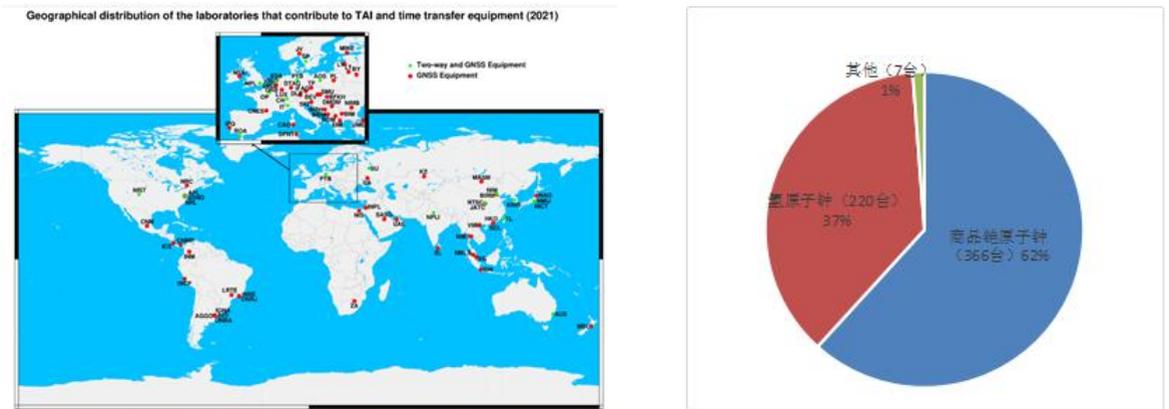


图 1 国际计量局中原子钟数量、类型和分布

国外研制守时型氢原子钟有三个国家，分别是美国、俄罗斯和瑞士^[4-6]。我国自 20 世纪 60 年代开始氢原子钟的研制，目前只有两家单位可以生产守时型氢原子钟，分别是中国科学院上海天文台和北京无线电计量测试研究所，实现了国产主动型氢原子钟商品化^[7]，目前已经应用于国内各个守时系统。表 1 为国内外主动型氢原子钟型号及生产厂家。

表 1 国内外主动型氢原子钟

型号	生产厂家
MHM2020	美国高美森公司
VCH-1003M	俄罗斯 VCH 公司
iMaser3000	瑞士 T4S 公司
SOHM-4A	中国科学院上海天文台
BM2101-03	北京无线电计量测试研究所

商品型小铯钟凭借其小巧的外观、优异的性能以及使用的方便被国内外广大用户使用，其中，美国生产的 5071A 铯原子钟是一款经典的铯钟产品，性能优越。自 1992 年研制出以来，分布在全球的数量已经超过 3 000 台，占据全球 90% 以上的市场，目前由美国高美森公司（Microsemi）生产^[8-9]。我国自 20 世纪 60 年代开始铯钟的研究，2000 年前后在国家政策的推动下，加快了研制。经过多年技术攻

关，国产地面小型铯钟技术取得了长足进步，商品化小铯钟已经问世^[1-10]，表2为国内外守时型铯原子钟型号和生产厂家。

近年来，国内外学者对原子钟性能进行过大量研究，但存在以下特点和不足：① 大部分都集中在对全球各个卫星导航系统星载原子钟性能的研究，包括短中长期性能评估，研究比较全面和深入^[11-12]；② 由于国内主动型氢钟的发展时间相对较短，对外主动型氢原子钟的研究较多，对国产主动型氢钟性能评估尤其是长期评估相对较少，其中文献[13]对上海天文台生产的 SOHM-4 型氢原子钟的长期性能进行了评估；③ 国内外对 5071A 铯原子钟的测试评估很多，针对国产地面小型铯原子钟的评估较少，其中文献[14]用 2 个月左右的数据对 4 种国产铯钟进行了评估，文献[15]仅对 Cs-3000C 型铯原子钟的短期稳定度进行了评估。

表2 国内外守时型铯原子钟

型号	生产厂家
5071A	美国高美森公司 (Microsemi)
Cs-3000	兰州空间技术物理研究所 (510 所)
TA-1000	成都天奥电子公司
BM2103-6	北京无线电计量测试研究所 (203 所)
BD-1024A	北京大学

综上所述，国产原子钟在技术研究、性能分析、应用推广等方面还有差距。基于上述问题，本文利用 2020 年 1 月 1 日至 2022 年 6 月 17 日近 900 d 的测试数据，从时差数据、频差数据、频率漂移率和频率稳定度等方面，分别对国产和国外守时型氢原子钟、铯原子钟的长期性能进行了评估和对比分析。

1 原子钟模型及性能评估方法

1.1 原子钟时间模型

原子钟时间模型是根据原子钟的输出特性，描述原子钟的钟面读数与理想钟的钟面读数之间的时差值，包含确定性部分和随机性部分。其表达式为

$$x(t) = x_0 + y_0 t + \frac{1}{2} D_1 t^2 + \dots + \frac{1}{n!} D_{n-1} t^n + \varepsilon_x(t) \quad (1)$$

式(1)中： $x(t)$ 为 t 时刻原子钟与基准钟的时差值； x_0 为初始时间偏差； y_0 为初始频率偏差，即原子钟实际频率与参考标准时间的标称频率的初始偏差； D_i 为 i 次幂频率漂移系数； $\varepsilon_x(t)$ 为时差的残差，为随机性部分，即原子钟噪声。

氢原子钟相对于 UTC 具有频率偏差和较为明显的一次频率漂移，二次及以上频率漂移很小，可以忽略不计。铯原子钟相对于 UTC 具有频率偏差，其频率漂移较小^[11]。因此，直接用原子钟二次时间模型描述氢原子钟和铯原子钟：

$$x(t) = x_0 + y_0 t + \frac{1}{2} D_1 t^2 + \varepsilon_x(t) \quad (2)$$

1.2 频率偏差

频率偏差是用来描述两台频标输出频率的相对偏差值。频率偏差的定义式为

$$Y = \frac{f_A - f_B}{f_0} \quad (3)$$

式(3)中, Y 是频率偏差, f_0 是两台频标的标称频率, f_A 和 f_B 是分别是频标A和频标B的输出频率。如果参考频标是理想钟, 实际计算的是频率准确度。

原子钟的频差可以由式(4)来表示^[1]:

$$y(t) = \frac{dx(t)}{dt} = y_0 + D_1 t + \dots + D_{n-1} t^{n-1} + \varepsilon_y(t) \quad (4)$$

式(4)中, $\varepsilon_y(t)$ 为频差的随机性分量。

在实际工程应用中, 频率偏差相对于频率准确度有更加广泛的应用, 在进行卫星导航数据处理时, 通常提及的原子钟频率数据均被默认为是瞬时相对频率偏差数据, 用式(5)表示:

$$y_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{\tau_0} \quad (5)$$

式(5)中, x_i 和 x_{i+1} 分别是指第 i 和 $i+1$ 个历元的时差值, τ_0 是历元间的采样间隔。

1.3 频率漂移率

原子钟在连续运行的过程中, 由于硬件设备的老化和周围环境变化等因素的影响, 导致其输出的频率值会随着运行时间呈现出线性递增或者递减的现象, 将原子钟频率随着时间单调变化的速率称为频率漂移率, 也叫频率老化率, 它是表征原子钟频率变化特性的重要指标之一。原子钟的频率漂移率可以由式(6)来表示:

$$D(t) = D_1 + 2D_2 t + \dots + (n-1) \cdot D_{n-1} t^{n-1} + \varepsilon_D(t) \quad (6)$$

式(6)中, $\varepsilon_D(t)$ 为对应频率漂移率的随机性分量。频率漂移率可采用对频率偏差数据线性拟合的方法得到。

1.4 频率稳定度

评估频率稳定度一般采用 Allan 方差 (Allan Variance) 和 Hadamard 方差 (Hadamard Variance), 其中 Allan 方差容易受到线性频漂的影响, 适用于分析频漂不明显的铯原子钟, Hadamard 方差通过时差数据的三阶差分计算去除线性频漂影响, 适用于频漂比较明显的氢原子钟。因此, 分别采用 Hadamard 方差和 Allan 方差来分析氢钟和铯钟的频率稳定度^[1]。

对于时差数据, Hadamard 方差定义如下:

$$H\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{6(N-3)\tau^2} \cdot \sum_{i=1}^{N-3} [x_{i+3} - 3x_{i+2} + 3x_{i+1} - x_i]^2 \quad (7)$$

对于时差数据, Allan 方差定义如下:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2)\tau^2} \sum_{j=1}^{N-2} [x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_i]^2 \quad (8)$$

式(8)中, N 是时差的个数; $\tau = m\tau_0$ 为平滑时间。

2 氢原子钟指标分析

图2所示为原子钟指标分析示意图。利用时间间隔计数器可以直接测量出被测原子钟 Clock 与测

量参考 Ref 的时差 $[T_{\text{Ref}} - T_{\text{Clock}}]$ ，测量参考与 UTC 的时差 $[\text{UTC} - T_{\text{Ref}}]$ 采用共视比对的方法可以得到，因此可以计算出被测原子钟与 UTC 的时差：

$$[\text{UTC} - T_{\text{Clock}}] = [\text{UTC} - T_{\text{Ref}}] + [T_{\text{Ref}} - T_{\text{Clock}}] \quad (9)$$

利用得到的时差数据，对其频率偏差、频率漂移率、频率稳定度等指标进行分析^[11]。

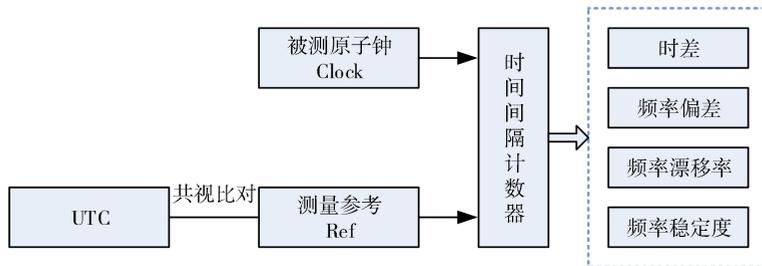
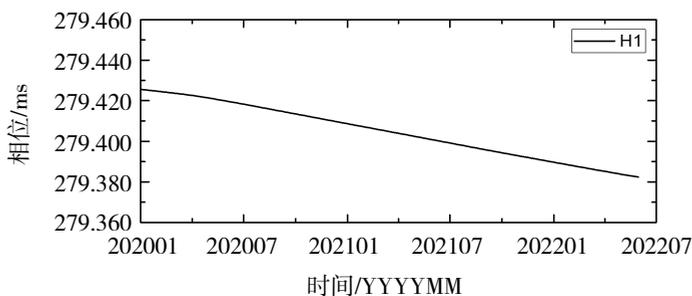


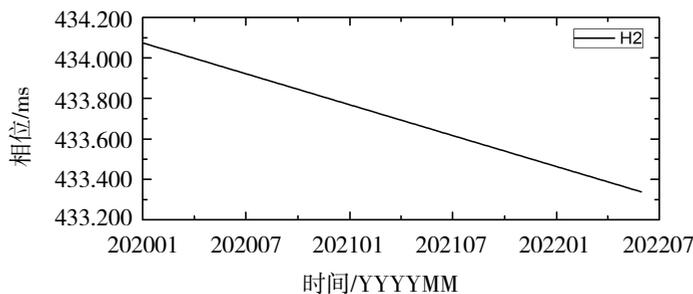
图 2 原子钟指标分析示意图

2.1 时差分析

图 3 所示为 20200101/20220617 共 899 d 国产氢钟 H1 和国外氢钟 H2 分别与 UTC 的时差测量结果，时间间隔为 5 d，其中国外氢钟型号为 VCH1003M。可以看到，两台氢钟的时差数据非常光滑，没有粗差、相位跳变等异常点，表明两台原子钟的长期运行连续性好，MTBF 均超过 20 000 h，可靠性高。



(a) 国产氢钟 H1 与 UTC 的时差测量结果

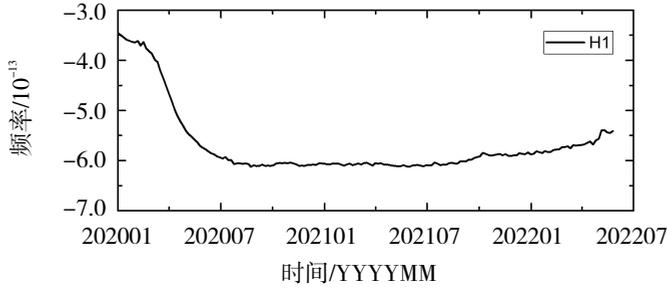


(b) 国外氢钟 H2 与 UTC 的时差测量结果

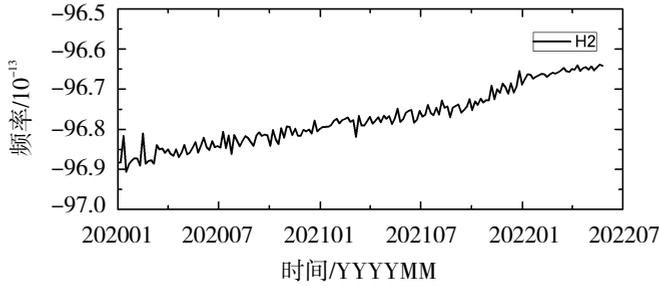
图 3 氢钟时差

2.2 频率偏差分析

根据公式 (5)，对时差数据进行一次差分，得到频率偏差值。图 4 所示为 20200101/20220617 氢钟的频率偏差曲线。氢钟 H1 在 20200101/20200701 处于状态稳定阶段，频率由 -3.5×10^{-13} 减小至 -6.0×10^{-13} ，变化幅度较大。待运行稳定后，经过两年时间频率由 -6.0×10^{-13} 增大至 -5.3×10^{-13} ，频率变化量为 7×10^{-14} ，变化较为平缓。氢钟 H2 在两年半时间内，频率由 -9.69×10^{-12} 增大至 -9.66×10^{-12} ，频率变化量为 3×10^{-14} ，频率变化（漂移）十分稳定。



(a) 国产氢钟 H1 频率偏差



(b) 国外氢钟 H2 频率偏差

图 4 氢钟频率偏差

2.3 漂移率分析

首先对原始时差数据进行一次差分得到频率数据, 时间间隔为 5 d。然后每隔 30 d 计算一次频率漂移率, t 时刻的频率漂移率采用 $[t-60 \text{ d}, t+60 \text{ d}]$ 的频率数据进行线性拟合, 其斜率即为频率漂移率。图 5 所示为 20200101/20220501 氢钟频率漂移率曲线, 其中国产氢钟 H1 的频率漂移率待运行稳定后开始计算。

可以看出, 进口氢钟 H2 的频率漂移率很小, 均小于 0.01 ns/d^2 (即天漂移率 1×10^{-16} 以内), 且十分稳定, 均值为 0.0019 ns/d^2 (即天漂移率 2×10^{-17}), 标准差为 0.0027 ns/d^2 (即天漂移率 3×10^{-17})。国产氢钟 H1 运行稳定后的两年内频率漂移率均小于 0.05 ns/d^2 (即天漂移率 5×10^{-16} 以内), 均值为 0.0046 ns/d^2 (即天漂移率 5×10^{-17}), 标准差为 0.0186 ns/d^2 (即天漂移率 2×10^{-16}), 但随时间发生随机变化。

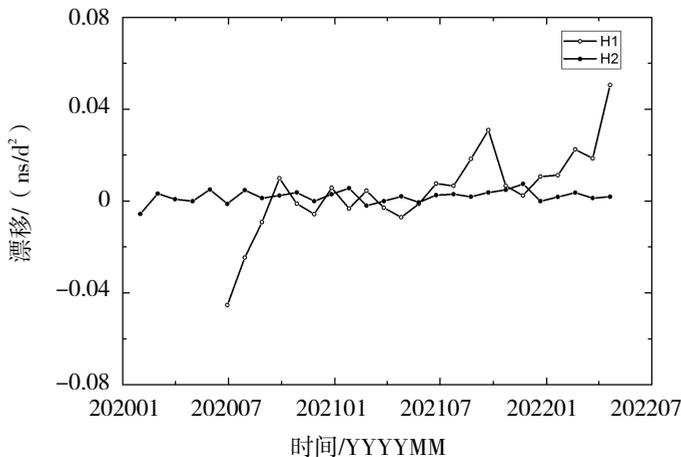


图 5 氢钟频率漂移率

2.4 稳定度分析

对于氢原子钟, 频率漂移率是影响长期频率稳定度的重要因素。图 6 所示为 20200701/20220617 (稳

定运行期)以上两种情形的原子钟频率稳定度曲线。国产氢钟 H1 的 Allan 方差和 Hadamard 方差分别为 $3.7 \times 10^{-15}/30 \text{ d}$ 和 $1.9 \times 10^{-15}/30 \text{ d}$ 。国外氢钟 H2 的 Allan 方差和 Hadamard 方差分别为 $8.9 \times 10^{-16}/30 \text{ d}$ 和 $5.8 \times 10^{-16}/30 \text{ d}$ 。可见, 国产氢钟与国外最好的氢钟在长期稳定度方面还存在约半个数量级差距, 但基本可以满足守时系统的应用需求。

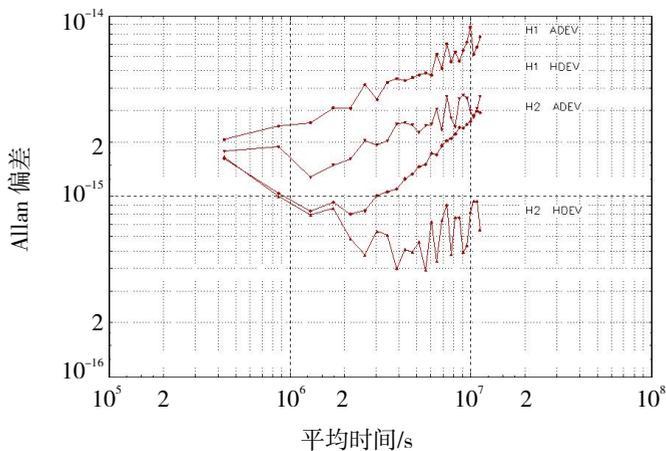
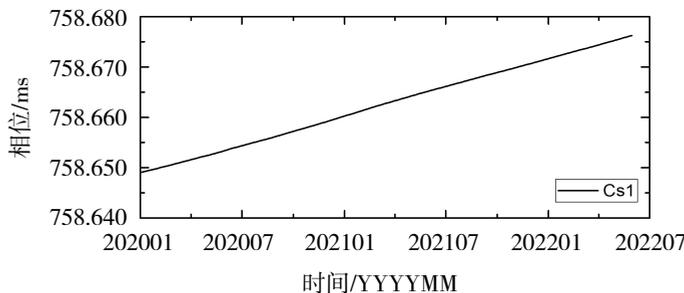


图 6 氢钟稳定度

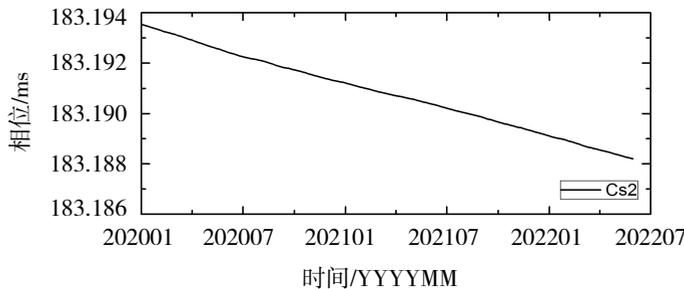
3 铯原子钟指标分析

3.1 时差分析

图 7 所示为 20200101/20220617 国产铯钟 Cs1 和国外铯钟 Cs2 分别与 UTC 的时差测量结果, 时间间隔为 5 d, 其中国外铯钟型号为 5071A。可以看到, 两台铯钟的时差数据非常光滑, 没有粗差、相位跳变等异常点, 表明两台原子钟的长期运行连续性好, 可靠性高, MTBF 均能达到 20 000 h 以上。



(a) 国产铯钟 Cs1 与 UTC 的时差测量结果

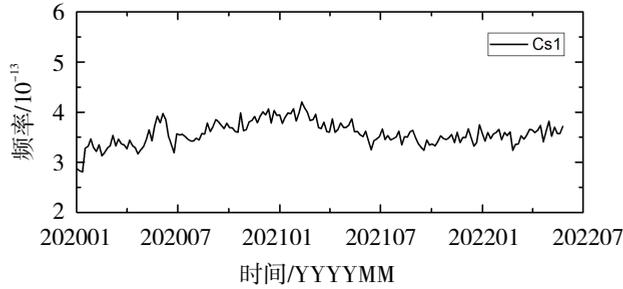


(b) 国外铯钟 Cs2 与 UTC 的时差测量结果

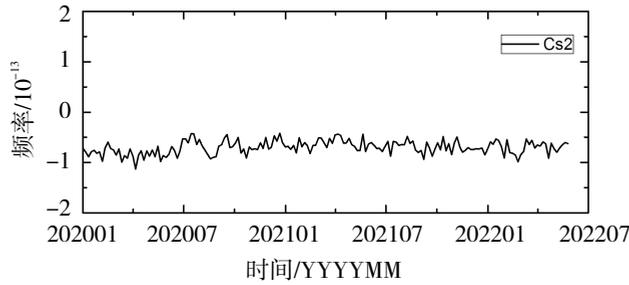
图 7 铯钟时差

3.2 频率偏差分析

图 8 所示为 20200101/20220617 铯钟的频率偏差曲线。国产铯钟 Cs1 的频率偏差约 $3 \times 10^{-13} \sim 4 \times 10^{-13}$ ，均值为 3.57×10^{-13} ，变化范围为 1.40×10^{-13} 。国外铯钟 Cs2 的频率偏差约为 $-1.13 \times 10^{-13} \sim -4.21 \times 10^{-14}$ ，均值为 -7.02×10^{-14} ，变化范围为 7.09×10^{-14} 。可见，国产铯钟的频率偏差变化范围是国外钟的 2 倍左右。



(a) 国产铯钟 Cs1 频率偏差



(b) 国外铯钟 Cs2 频率偏差

图 8 铯钟频率偏差

3.3 漂移率分析

图 9 所示为 20200101/20220617 铯钟的频率漂移率。国产铯钟和国外铯钟的频率漂移曲线特性非常近似，具有变化范围较大，随机性强，没有固定频率漂移特性。结合图 8 铯钟频率偏差曲线，表明国产铯钟和国外铯钟均无显著的频率漂移率。

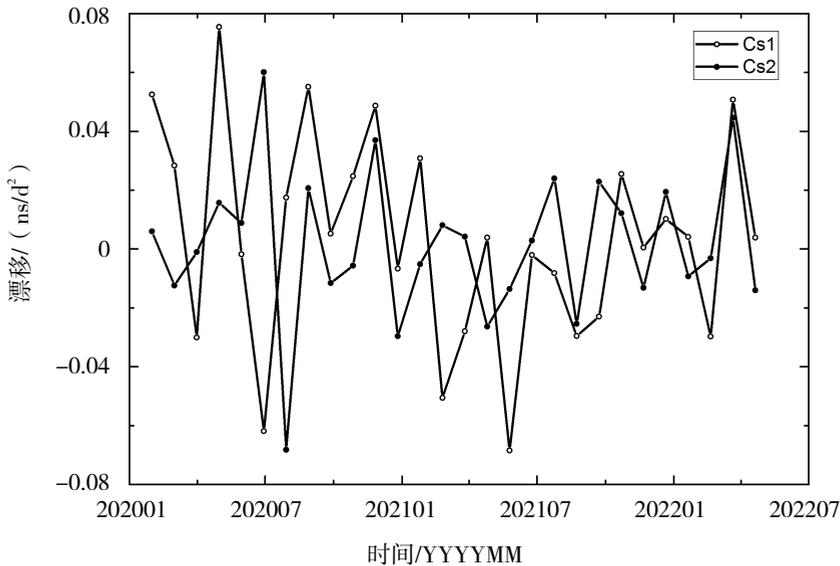


图 9 铯钟频率漂移率

3.4 稳定度分析

图 10 所示为国产铯钟和国外铯钟的频率稳定度曲线。采用 Allan 方差计算，国产铯钟 Cs1 的月频率稳定度约为 8.9×10^{-15} ，国外铯钟 Cs2 的月频率稳定度约为 7.4×10^{-15} ，两者十分接近，基本相当。随着时间间隔的增大，国产铯钟和国外铯钟的稳定度差距逐渐增大，两者相差近半个数量级。

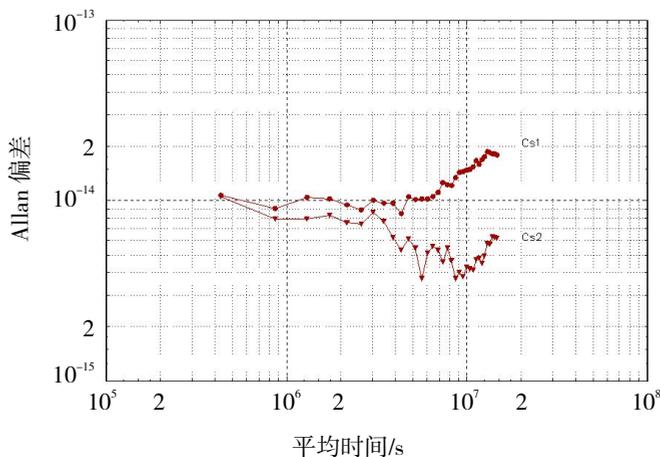


图 10 铯钟频率稳定度

4 分析与结论

本文利用两年半的实测数据，对 1 台国产守时型氢原子钟、1 台国产守时型铯原子钟的长期性能，包括相位时差数据、频率偏差、日频率漂移率、频率稳定度等，分别与国外同类型守时型原子钟进行了评估和对比分析，如表 3 所示。

表 3 国内外原子钟性能综合分析结果

原子钟类型	钟编号	钟类型	频率偏差		频率漂移率/d		月稳定度 (Hadamard 方差)	月稳定度 (Allan 方差)	
			均值	变化量 (稳定后)	范围	均值			标准差
氢钟	H1	国内	-5.96×10^{-13}	7×10^{-14}	$\pm 5 \times 10^{-16}$	5×10^{-17}	2×10^{-16}	1.9×10^{-15}	3.7×10^{-15}
	H2	国外	-9.67×10^{-12}	3×10^{-14}	$\pm 1 \times 10^{-16}$	2×10^{-17}	3×10^{-17}	5.8×10^{-16}	8.9×10^{-16}
铯钟	Cs1	国内	3.57×10^{-13}	1.4×10^{-13}	-	-	-	-	8.9×10^{-15}
	Cs2	国外	-7.02×10^{-14}	7.09×10^{-14}	-	-	-	-	7.4×10^{-15}

根据所选的原子钟评估结果表明：

① 所选的国产守时型氢原子钟、铯原子钟均具备长期连续稳定运行能力，具备满足现在国内工程需求的能力。

② 所选的国产守时型氢原子钟的初始稳定期较长，运行稳定后国内氢钟的频率漂移率是国外的 2.5 倍左右，频率漂移率在 0.05 ns/d^2 ($5 \times 10^{-16}/\text{d}$) 以内，但随时间发生随机变化，方差比国外的高一个数量级；而国外氢钟的频率漂移率在 0.01 ns/d^2 ($1 \times 10^{-16}/\text{d}$) 以内，且稳定性更强。国产守时型氢原子钟月频率稳定度约 1.9×10^{-15} ，与国外最好的氢钟相差约半个数量级。

③ 所选的国产铯钟的日频率漂移率、月频率稳定度（约为 8.19×10^{-15} ）与国外铯钟基本相当，但

随着时间间隔的增大,国产铯钟和国外铯钟的稳定度差距逐渐增大,两者相差近半个数量级。现已初步具备替代国外铯钟的技术条件,但长期使用寿命需进一步验证。

5 结语

总体来看,经过几十年的投入和研究,我国在守时型频率标准技术方面已经取得了引人瞩目的成绩,相关产品已经应用于实际工程建设当中,未来有广阔的发展前景。原子频标技术是国家时间频率核心竞争力之一,要进一步加强相关物理基础研究和关键技术攻关,提高我国核心时频装备的可靠性,并推进其国产化水平,促进国产原子钟在国内的应用推广,进而增强国家时频设备自主可控水平,促进我国时间频率技术与应用的发展。

参考文献:

- [1] 杨军,毛新凯,卢心竹. 国内外频率标准发展现状[J]. 宇航计测技术, 2020, 40(5): 1-10.
- [2] BIPM. BIPM Time Department Data Base[EB/OL]. (2020-03-20) [2023-06-14]. <https://webtai.bipm.org/database/clock1>.
- [3] BIPM. BIPM Time Department Data Base[EB/OL]. (2021-05-11) [2022-06-19]. <https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/otherproducts/weights>.
- [4] Microsemi. MHM-2020 Active Hydrogen Maser[EB/OL]. (2022-04-12) [2022-06-14]. <https://www.microsemi.com/documentportal/docdownload/1244235-microchip-mhm-2020-maser-data-sheet>.
- [5] VREMYA-CH. Active Hydrogen Maser VCH-1003M Operations Manual 411141.032 UG[EB/OL]. (2022-05-17) [2022-07-14]. http://www.vremya-ch.com/english/support/supp_docs/files/VCH-1003M_UG.pdf.
- [6] T4science. iMaser 3000 Specifications[EB/OL]. (2022-03-20) [2022-05-11]. https://www.t4science.com/wp-content/uploads/2020/06/iMaser_Clock_Spec.pdf.
- [7] 王文明. 国内外氢钟最新发展及我国氢钟未来发展趋势[J]. 导航定位与授时, 2015, 2(6): 48-54.
- [8] 陈江,李得天,王骥,等. 导航铯原子钟的发展现状及趋势[J]. 国际太空, 2016, 448(4): 20-24.
- [9] Microsemi. 5071A Cesium Clock Primary Frequency Standard[EB/OL]. (2022-02-26) [2022-06-14]. <https://www.microsemi.com/product-directory/cesium-frequency-references/4115-5071a-cesium-primary-frequency-standard>.
- [10] 天奥电子. 天奥电子产品手册[EB/OL]. (2022-03-21) [2022-06-14]. <http://www.elecspn.com/productdetail-1395.html>.
- [11] 赵琳琳. BDS/GPS/Galileo 星载原子钟长期在轨性能评估分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [12] GRIGGS E, KURSINSKI E R, AKOS D. Short-term GNSS satellite clock stability[J]. Radio Science, 2015, 50(8): 813-826.
- [13] 刘峰宇,王宇谱,李锡瑞. 国产 SOHM-4 型氢钟长期性能分析[J]. 导航定位学报, 2020, 8(5): 102-106.
- [14] 张军,王向磊,王路生,等. 国产小铯钟比测结果分析[J]. 时间频率学报, 2018, 41(3): 162-170.
- [15] 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.