

钟组守时性能分析



曾德灵^{1,2}, 陈静^{1,3}, 郭芮君^{1,4}, 王玉琢^{1*}

1. 中国计量科学研究院, 北京 100029
2. 上海市计量测试技术研究院, 上海 201203
3. 福建省计量科学研究院, 福州 350003
4. 甘肃省计量研究院, 兰州 730070

【摘要】 针对原子钟的技术指标, 对比分析了不同钟组配置的时标性能。根据典型原子钟的技术指标和实际运行情况对氢钟和铯钟钟差数据进行仿真, 应用 ALGOS 算法计算了铯钟组、氢钟组、氢铯联合钟组的原子时标, 从时间偏差、时间稳定度、频率偏差、频率稳定度四个方面考察了钟组时标性能。结果表明, 180 台仿真铯钟的守时天频率稳定度相当于 1 台氢钟的守时天频率稳定度; 由于铯钟频率稳定度与氢钟相差较大, 原子时计算过程中, 铯钟权重远低于氢钟, 对原子时的贡献有限; 氢钟占比高的钟组, 时标稳定性较好, 溯源状态下时间偏差和频率偏差也较小。时标稳定性好的钟组在守时状态下的时间保持能力也更好。

【关键词】 钟组配置; 频率稳定度; 时间稳定度; 守时能力; 原子钟

DOI: 10.12338/j.issn.2096-9015.2021.0659

【引用本文】 曾德灵, 陈静, 郭芮君, 等. 钟组守时性能分析 [J]. 计量科学与技术, 2022, 66(4): 114-119, 62.

Atomic Clock Ensemble Configuration and Performance Analysis

ZENG Deling^{1,2}, CHEN Jing^{1,3}, GUO Ruijun^{1,4}, WANG Yuzhuo¹

1. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China
2. Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China
3. Fujian Metrology Institute, Fuzhou 350003, China
4. Gansu Institute of Metrology, Lanzhou 730070, China

Corresponding author: WANG Yuzhuo, Email: wangyz@nim.ac.cn

【Abstract】 The time scale performance of different clock ensemble configurations is compared and analyzed concerning the technical specifications of atomic clocks. Simulations of hydrogen maser and cesium clock differential data were performed based on the technical specifications and actual operation of typical atomic clocks. The atomic time scales of the cesium clock ensemble, hydrogen clock ensemble, and combined hydrogen-cesium clock ensemble were calculated by applying the ALGOS algorithm, and the clock ensemble time scale performance was examined in four aspects: time deviation, time stability, frequency deviation, and frequency stability. The results showed that the frequency stability of the clock ensemble of 180 cesium clocks is equivalent to the frequency stability of 1 hydrogen maser. Due to the large difference between the frequency stability of cesium clocks and hydrogen masers, the weight of cesium clocks is much lower than that of hydrogen masers in the atomic time calculation process, and the contribution to the atomic time is limited. The clock ensembles with a high proportion of hydrogen maser have better time scale stability, and the time deviation and frequency deviation in the traceability state are also smaller. The clock ensembles with good time scale stability also have better timekeeping ability in the timekeeping state.

【Key words】 clock ensemble, frequency stability, time stability, timekeeping ability, atomic clock

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3900701)。

作者简介: 曾德灵(1985-), 上海市计量测试技术研究院工程师, 研究方向: 时间频率计量, 邮箱: zengdl@simt.com.cn; 通讯作者: 王玉琢(1984-), 中国计量科学研究院副研究员, 研究方向: 时间频率计量, 邮箱: wangyz@nim.ac.cn。

0 引言

时间频率在国防安全、科技发展和社会生活等方面都起着至关重要的作用。守时钟组是守时系统的重要组成部分^[1-3],保障标准时间频率信号的连续性和可靠性。国内外守时系统中氢钟和铯钟是最常用的商品守时钟,其中氢钟具有良好的短期稳定度,但存在频率漂移特性;铯钟短期稳定度比氢钟差一个数量级以上,但几乎没有频率漂移。

本文根据典型原子钟技术指标和实际运行情况,对多台氢钟和铯钟的钟差数据进行仿真,组成不同配置的守时钟组。应用 ALGOS 算法计算了不同钟组配置情况下的钟组时标,从时间偏差、时间稳定度、频率偏差、频率稳定度四个方面分析钟组时标性能。

1 时标算法

通过多台守时钟加权平均获得稳定、准确的钟组时标,文献[4]~[9]详细介绍了原子时算法,本文仅对核心计算过程简单说明。

假设 N 台原子钟,钟组时标 TA 表示为式(1)。

$$TA(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i [h_i(t) + h'_i(t)]}{\sum_{i=1}^N \omega_i} \quad (1)$$

式中, $h_i(t)$ 为第 i 台原子钟 t 时刻的读数; $h'_i(t)$ 为第 i 台原子钟 t 时刻读数的预测值; ω_i 为第 i 台原子钟的权重,如式(2)所示。

$$\omega_i = \frac{1/\sigma_i^2(t)}{\sum_{i=1}^N 1/\sigma_i^2(t)} \quad (2)$$

为避免钟组时标性能过度依赖部分原子钟,通常要求 $\omega_i \leq \omega_{\max}$, 即 ω_{\max} 为守时钟最大权重,且所有守时钟权重之和满足式(3)。

$$\sum_{i=1}^N \omega_i = 1 \quad (3)$$

式(1)变换得到:

$$\sum_{i=1}^N \omega_i [TA(t) - h_i(t)] = \sum_{i=1}^N \omega_i h'_i(t) \quad (4)$$

设 $x_i(t) = TA(t) - h_i(t)$, 则式(4)表示为:

$$\sum_{i=1}^N \omega_i x_i(t) = \sum_{i=1}^N \omega_i h'_i(t) \quad (5)$$

$$h'_i(t) = x_i(t_0) + y_{ip}(t) \cdot (t - t_0) \quad (6)$$

式(6)中, $x_i(t_0)$ 、 $y_{ip}(t)$ 分别为 t_0 和 t 时刻,第 i 台守时钟相对 TA 的时间偏差和频率偏差预测值,一

般采用最小二乘法外推历史数据得到。

守时钟组内任意两台钟之间的钟差为式(7)。

$$x_{i,j} = h_j(t) - h_i(t) = x_j(t) - x_i(t) \quad (7)$$

式(5)、(6)、(7)联立方程为式(8)。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \omega_i x_i(t) = \sum_{i=1}^N \omega_i [x_i(t_0) + y_{ip}(t) \cdot (t - t_0)] \\ x_j(t) - x_i(t) = x_{i,j} \end{cases} \quad (8)$$

求解式(8)得到钟组时标各守时钟相对钟组时标 TA 的时间偏差。

2 原子钟仿真模型

目前,典型氢钟包括美国 Microsemi 公司生产的 MHM-2010、俄罗斯 Vremya-ch 公司的 VCH1003A 和 VCH1003M 等;铯钟大多为美国 Microsemi 公司的 5071A。这些钟的频率稳定度技术指标见表 1 和图 1。从表 1 可看出,氢钟在天稳以内的短期稳定度比铯钟好一个数量级以上。

表 1 典型原子钟技术指标

Tab.1 Technical indicators of typical atomic clock manufacturers

τ	MHM-2010	VCH1003A	VCH1003M	5071A
1 s	$\leq 8.0E-14$	$\leq 2.0E-13$	$\leq 8.0E-14$	$\leq 5.0E-12$
10 s	$\leq 1.5E-14$	$\leq 2.0E-14$	$\leq 1.4E-14$	$\leq 3.5E-12$
100 s	$\leq 4.0E-15$	$\leq 7.0E-15$	$\leq 4.0E-15$	$\leq 8.5E-13$
1 000 s	$\leq 2.0E-15$	$\leq 3.0E-15$	$\leq 1.5E-15$	$\leq 2.7E-13$
3 600 s	—	$\leq 1.5E-15$	$\leq 1.3E-15$	—
10 000 s	$\leq 1.5E-15$	—	—	$\leq 8.5E-14$
86 400 s	$\leq 2.0E-15$	$\leq 2.0E-15$	$\leq 5.0E-16$	—
100 000 s	—	—	—	$\leq 2.7E-14$
5 d	—	—	—	$\leq 1.0E-14$
30 d	—	—	—	$\leq 1.0E-14$

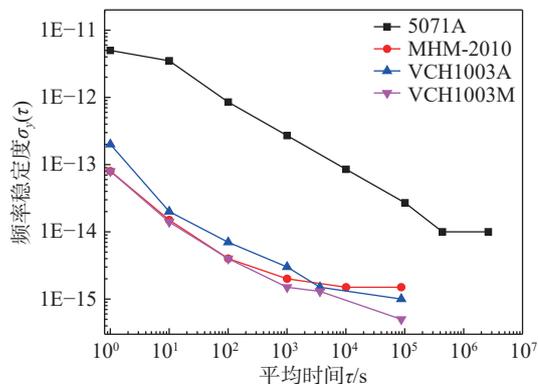


图 1 典型原子钟稳定度指标

Fig.1 Technical indicators of typical atomic clock

原子钟的噪声类型通过分析频率稳定度得出。

5071A 铯钟在平均时间 $\tau=5$ d 以内, 稳定度随 $1/\sqrt{\tau}$ 变化, 即 $\sigma_y(\tau) \sim \tau^{-1/2}$, 主要噪声类型是白噪声调频 (W-FM)。 $\tau > 5$ d, 闪变白噪声 (F-FM) 和无规则行走噪声 (RW-FM) 开始占主导。 氢钟 τ 小于 1000 s 时, W-FM 占主要成分; $1000 \text{ s} \leq \tau \leq 1 \text{ d}$, 主要为 F-FM; $\tau > 1 \text{ d}$, 氢钟漂移占主要影响。

实际铯钟运行情况与 5071A 技术指标对比如图 2 中(A)所示, 数据采样间隔为 5 天, 数据长度为 2 年。 基于图 2 中(A)的数据, 对铯钟进行仿真模拟, 仿真的铯钟稳定度与 5071A 技术指标对比情况如图 2 中(B)所示。 仿真参数见表 2, 表中噪声参数为其在 $\tau=1$ s 处对阿伦偏差 ADEV 的影响。

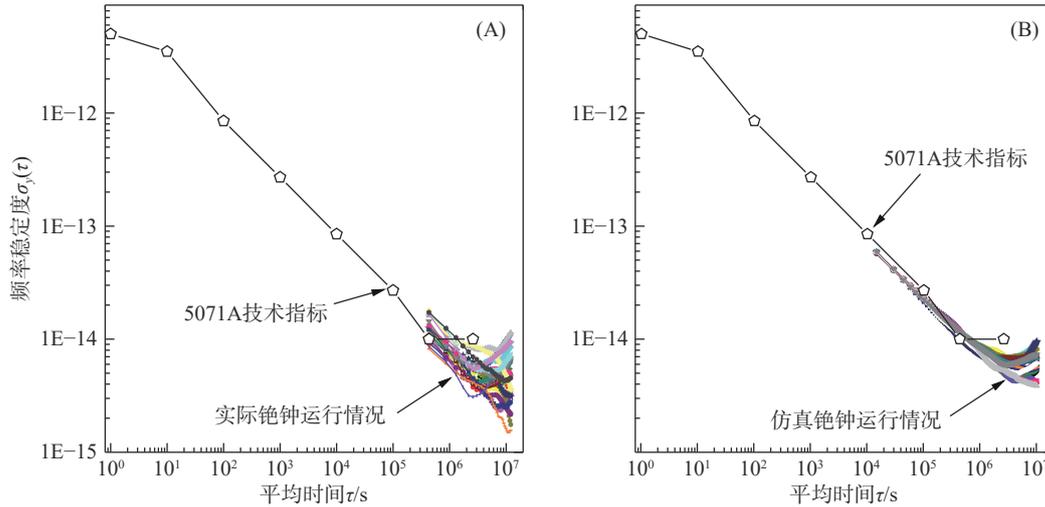


图 2 实际铯钟运行情况与仿真铯钟稳定度情况
Fig.2 Actual cesium clock operation and simulated cesium clock stability

表 2 铯钟仿真参数

Tab.2 Cesium clock simulation parameters

噪声类型	参数设置
RW-FM	1.0E-19
F-FM	6.0E-15
W-FM	8.0E-12

MHM-2010 和 VCH1003M 实际运行情况与厂家技术指标对比如图 3 中(A)所示。 数据采样间隔为 5 天, 数据长度为 2 年。 基于图 3 中(A)的数据, 对氢钟进行仿真模拟, 仿真的氢钟稳定度与厂家技术指标对比情况如图 3 中(B)所示。 仿真参数见表 3, 表中噪声参数为其在 $\tau=1$ s 处对阿伦偏差 ADEV 的影响。

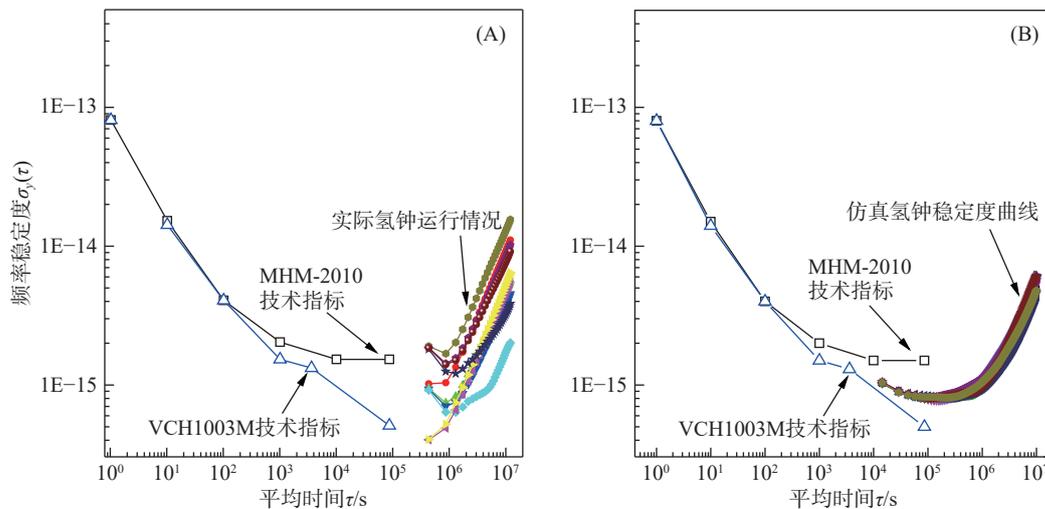


图 3 实际氢钟运行情况与仿真氢钟稳定度情况
Fig.3 Actual hydrogen maser operation and simulated hydrogen maser stability

表 3 氢钟仿真参数

Tab.3 Hydrogen maser simulation parameters

噪声类型	参数设置
RW-FM	5.5E-19
F-FM	7.5E-16
W-FM	6.0E-14

3 钟组配置与性能分析

3.1 理论分析

频率稳定度为 $\sigma_i(\tau)$ 的 N 台原子钟, 构成的钟组频率稳定度理论最小值为:

$$\sigma_{y,\min}^2(\tau) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sigma_i^{-2}(\tau)} \quad (9)$$

根据厂家技术指标, 氢钟天频率稳定度为 $2.0E-15$ (MHM2010、VCH1003A), 5071A 铯钟天频率稳定度约为 $2.5E-14$ 。按照式(9), 理论上 156 台铯钟组成的钟组天频率稳定度才能达到 $2.0E-15$ 。使用模拟的铯钟数据(天频率稳定度在 $2.34E-14 \sim 2.58E-14$ 之间, 均值为 $2.46E-14$), 计算不同数量的铯钟组天频率稳定度, 并与理论最小值进行比较, 结果如表 4 所示。实际计算结果表明, 180 台铯钟组成的钟组天频率稳定度与一台 MHM2010 相当。

平均时间 $\tau=1d$, 铯钟天频率稳定度比氢钟大一个数量级以上, 不限权的原子时计算, 铯钟权重占比非常小, 对原子时贡献非常有限; 而对钟组采用 A/N 进行限权($A=2.5$), 铯钟的加入可能使钟组的频率稳定度变差, 如表 5 所示。

表 4 铯钟数量与钟组时标频率稳定度关系

Tab.4 The relationship between the number of cesium clocks and the frequency stability of time scale in the clock ensemble

铯钟数量(台)	钟组频率稳定度 $\sigma_y(1 d)$	
	理论值	计算值
10	7.68E-15	9.11E-15
30	4.47E-15	5.24E-15
60	3.17E-15	3.58E-15
90	2.59E-15	2.95E-15
120	2.24E-15	2.46E-15
150	2.01E-15	2.19E-15
160	1.94E-15	2.10E-15
170	1.89E-15	2.05E-15
180	1.83E-15	1.99E-15

表 5 铯钟数量对氢铯联合钟组时标稳定度影响

Tab.5 The influence of the number of cesium clocks on the stability of time scale in the combined cesium hydrogen clock ensemble

钟组构成	钟组频率稳定度 $\sigma_y(1 d)$		
	理论值	计算值(不限权)	计算值(A/N 限权)
5HM	3.78E-16	4.00E-16	4.00E-16
5HM + 30Cs	3.76E-16	3.73E-16	3.00E-15
5HM + 60Cs	3.75E-16	3.74E-16	2.77E-15
5HM + 90Cs	3.74E-16	3.75E-16	2.50E-15
5HM + 120Cs	3.73E-16	3.74E-16	2.17E-15
5HM + 150Cs	3.71E-16	3.71E-16	1.98E-15
5HM + 180Cs	3.70E-16	3.70E-16	1.84E-15

注: 5HM + 30Cs表示5台氢钟30台铯钟的联合钟组

3.2 钟组配置与性能分析

应用 ALGOS 算法对氢钟和铯钟的仿真数据进行钟组时标计算和性能分析, 钟组配置方式包括铯

钟组、氢钟组和氢铯联合钟组三种类型。在钟组数量一致的情况下, 选取六种典型配置进行钟组时标计算, 具体配置见表 6。表 6 的计算结果表明, 溯源

状态下, 钟组频率稳定度和时间稳定度数值都随氢钟数量的增加而减小, 即氢钟占比越高, 钟组性能越

好。不同钟组频率稳定度和时间稳定度的变化情况如图 4 和图 5 所示。

表 6 不同钟组配置的性能情况

Tab.6 The performance of different clock ensemble configurations

钟组配置	频率稳定度 $\sigma_y(\tau)$ (溯源状态)			时间稳定度 $\sigma_x(\tau)$ /ns(溯源状态)			时间偏差(取绝对值)/ns(自主守时)		
	5 d	15 d	30 d	5 d	15 d	30 d	6 m	12 m	18 m
10Cs	3.39E-15	2.50E-15	1.74E-15	0.84	1.46	1.70	-299.1	-722.9	-1461.6
9Cs+1HM	2.91E-15	2.13E-15	1.50E-15	0.73	1.25	1.49	-283.2	-683.2	-1349.6
7Cs+3HM	1.62E-15	1.20E-15	8.19E-16	0.40	0.70	0.82	-215.1	-441.0	-795.4
3Cs+7HM	2.50E-16	2.85E-16	2.53E-16	0.06	0.18	0.27	-40.8	-86.8	-166.9
1Cs+9HM	2.32E-16	2.59E-16	2.33E-16	0.06	0.16	0.26	-40.3	-93.7	-144.8
10HM	2.21E-16	2.66E-16	2.34E-16	0.05	0.17	0.25	-40.7	-79.9	-114.1

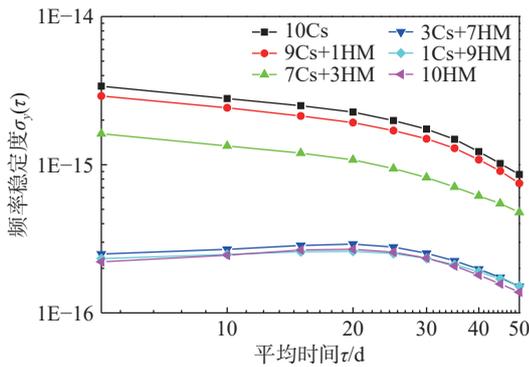


图 4 溯源状态下, 不同钟组频率稳定度变化情况
Fig.4 Frequency stability of different clock ensemble in the traceability state

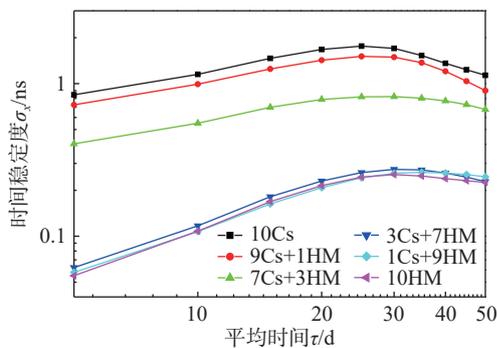


图 5 溯源状态下, 不同钟组时间稳定度变化情况
Fig.5 Time stability of different clock ensemble in the traceability state

$\pm 1E-14$ 以内, 7Cs+3HM 钟组在 $\pm 5E-15$ 以内, 3Cs+7HM 和 10HM 钟组在 $\pm 1E-15$ 以内。溯源情况下, 氢钟占比越高, 钟组时间偏差和频率偏差越小。

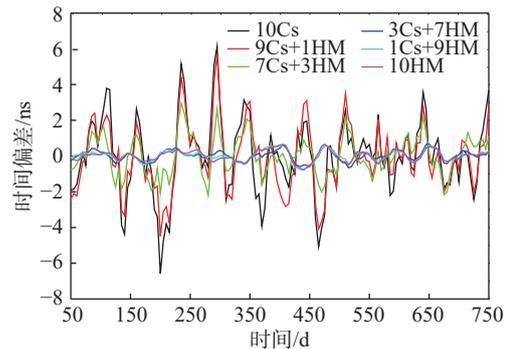


图 6 溯源状态下, 不同钟组时间偏差变化情况
Fig.6 Time difference of different clock ensemble in the traceability state

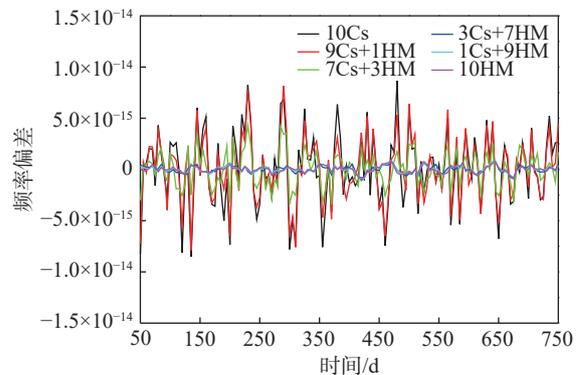


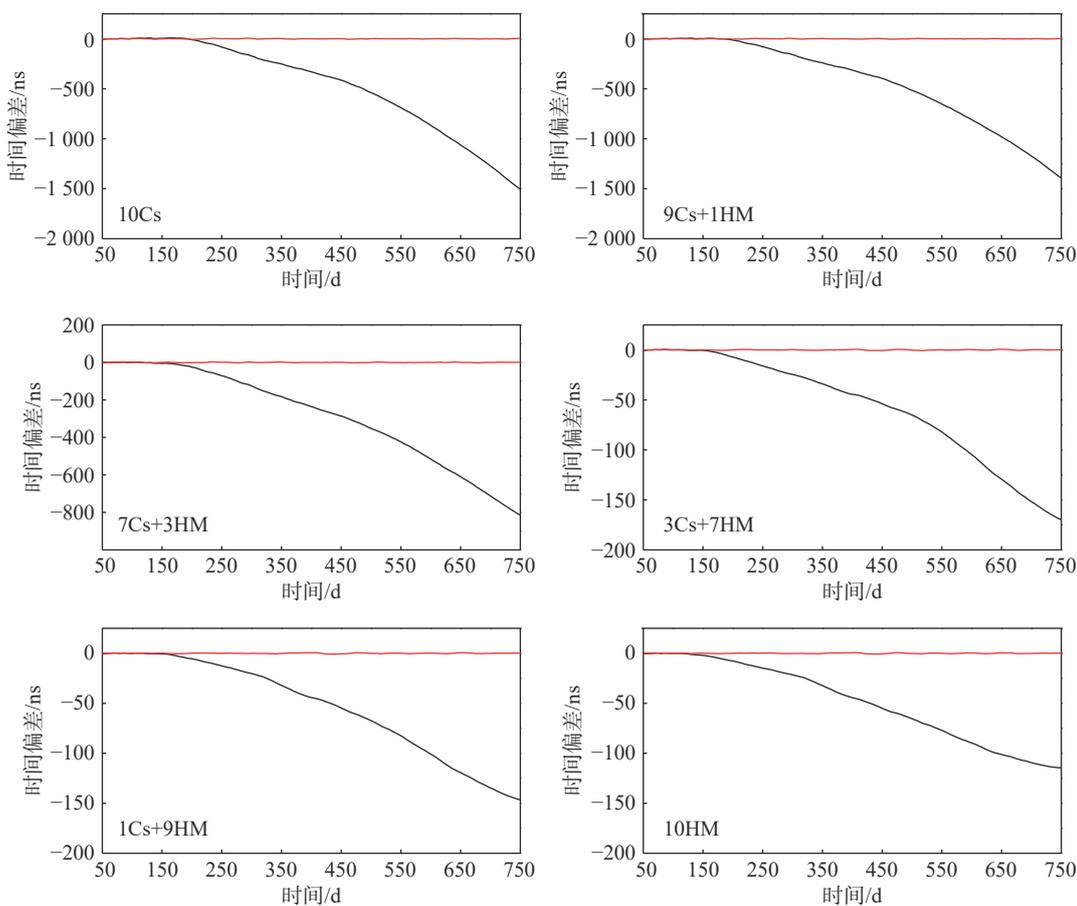
图 7 溯源状态下, 不同钟组频率偏差变化情况
Fig.7 Fractional frequency difference of different clock ensemble in the traceability state

图 6 和图 7 展示了不同钟组在溯源状态下的时间偏差和频率偏差。10Cs 钟组的时间偏差在 ± 6 ns 以内, 7Cs+3HM 钟组在 ± 3 ns 以内, 3Cs+7HM 和 10HM 钟组在 ± 1 ns 以内; 10Cs 钟组的频率偏差在

为了考察不同钟组在没有溯源条件下的自主守

时性能,在第 90 天以后不进行溯源,模拟计算 2 年钟组时间。自主守时状态下的模拟计算使用前 90 天的历史频率漂移数据,进行之后的钟组时标校正计算,4 种钟组配置的模拟计算结果如表 6 和图 8 所示。自主守时能力实际反映的是对频率漂移

估计值的准确程度。钟组频率稳定度好,则频率漂移估计误差小,有利于提高钟组频率预测的准确度。自主守时状态下,钟组频率预测的准确度越好,时间偏差越小。由于氢钟比例高的钟组频率稳定度相对较好,因此自主守时能力也相对较强。



注: 红线代表溯源情况下时间偏差, 黑线代表自主守时状态下时间偏差

图 8 不同钟组自主守时情况。

Fig.8 Timekeeping ability of different clock ensemble

4 结论

本文应用 ALGOS 算法计算了钟组时标,从时间偏差、时间稳定度、频率偏差、频率稳定度四方面分析不同钟组配置的时标性能指标。结果表明,180 台仿真铯钟的守时天频率稳定度相当于 1 台氢钟的守时天频率稳定度。由于铯钟和氢钟的稳定度相差较大,不限权情况下,铯钟取权非常低,对钟组稳定度的贡献有限;在采用 A/N 限权策略情况下,当钟组铯钟比例较高时,反而影响钟组时频稳定度。氢钟比例高的钟组时标稳定度比较好,溯源状态下

的时间偏差和频率偏差也较小,稳定度好的钟组对频率漂移的估计较准确,自主守时能力相对较好。

参考文献

- [1] 高源, 张爱敏, 王伟波, 等. UTC (NIM) 算法研究 [J]. 计量学报, 2015, 36(6A): 93-96.
- [2] 张莉莉, 高源, 朱江森, 等. AT1 原子时算法的研究 [J]. 电子测量技术, 2007, 30(11): 20-24.
- [3] 高源, 高小珣, 张爱敏, 等. 一种由 NIM5 铯喷泉基准驾驭实现的独立时标 TA (NIM)[J]. 计量学报, 2011, 32(1): 66-69.
- [4] Tavella P, Thomas C. Comparative study of time scale algorithms[J]. Metrologia, 1991, 28(2): 57.