

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2019-04-0319-08

国产激光抽运铯原子钟的性能分析

董文^{1,2}, 赵当丽^{1,3}, 胡永辉^{1,3}, 张向波^{1,2,3}, 何在民^{1,3}

(1. 中国科学院国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 时间频率基准重点实验室, 西安 710600)

摘要: 铯原子钟是建立和维持高精度守时系统的关键设备, 其性能直接影响所建立守时系统的准确性和稳定性。在介绍铯原子钟主要性能指标及测试方法的基础上, 对目前国产激光抽运小型铯原子钟的频率准确度、频率稳定度和频率漂移率等进行了测试、分析, 并与美国 5071A (优质管) 型铯原子钟的性能进行了对比。结果表明: 国产激光抽运铯原子钟的频率准确度优于 9×10^{-13} , 但与 5071A 型铯原子钟频率准确度还存在差距; 频率稳定度可达 $4.02 \times 10^{-13}/1\text{ks}$, $1.27 \times 10^{-13}/10\text{ks}$, $7.46 \times 10^{-14}/1\text{d}$, $9.77 \times 10^{-14}/10\text{d}$, 短期稳定度与 5071A 基本相当, 长期稳定度与 5071A 有一定差距, 可基本满足高精度守时系统的要求。

关键词: 激光抽运铯原子钟; 频率准确度; 频率稳定度; 频率漂移率; 守时系统

Performance analysis of domestic laser-pumped cesium atomic clock

DONG Wen^{1,2}, ZHAO Dang-li^{1,3}, HU Yong-hui^{1,3}, ZHANG Xiang-bo^{1,2,3}, HE Zai-min^{1,3}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

Abstract: Cesium atomic clock is the key device for establishing and maintaining high-precision time keeping systems, and its performances will directly affects the accuracy and stability of the established time keeping system. On the basis of introducing the main performances and the corresponding testing methods of cesium atomic clock, we have test and analyzed the frequency accuracy, frequency stability and frequency drift of domestic small-sized laser-pumped cesium atomic clock, and the results are compared with that of the 5071A (High-performance cesium beam tube). The results show that the frequency accuracy of the domestic laser-pumped cesium atomic clock is better than 9×10^{-13} , and there is a gap when compares with the frequency accuracy of 5071A. The frequency stability of the domestic laser-pumped cesium atomic clock achieves $4.02 \times 10^{-13}/1\text{ks}$, $1.27 \times 10^{-13}/10\text{ks}$, $7.46 \times 10^{-14}/1\text{d}$ and $9.77 \times 10^{-14}/10\text{d}$, the short-term frequency stability is basically the same as that of the 5071A, and the long-term frequency stability has a certain gap with the 5071A,

收稿日期: 2019-04-20; 接受日期: 2019-06-05

基金项目: 陕西省重点研发计划一般资助项目 (2018GY-004)

作者简介: 董文, 女, 硕士, 主要从事高精度时间比对方法的研究。

which basically meets the requirements of high-precision time keeping system.

Key words: laser-pumped cesium atomic clock; frequency accuracy; frequency stability; frequency drift; time keeping system

0 引言

原子钟作为高精度守时系统的关键设备,主要功能是产生时间信号和频率信号^[1-2]。在许多高精度的时间和频率应用场合,都使用原子钟作为时间频率基准。例如,北斗卫星导航系统(BDS)采用星载氢原子钟、铷原子钟和地面氢原子钟、铯原子钟等共同建立北斗卫星导航系统时间(BDT),国际上主要守时实验室采用氢原子钟和铯原子钟共同建立 UTC(k)或 TA(k)^[3-4]。氢原子钟和铯原子钟性能不同,在高精度守时系统中作用也不同,氢原子钟由于其优良的短期稳定性一般在守时系统中被作为主钟,而铯原子钟由于良好的长期稳定性和较高的可靠性也经常参与守时计算^[5-6]。目前,常用的铯原子钟包括美国 Microsemi 公司生产的 5071A 型铯原子钟和瑞士 OSA 公司生产的 3235B 型铯原子钟等^[7]。铯原子钟根据其物理机理可分为磁选态和激光抽运两种类型^[8]。磁选态铯原子钟发展较早,美国 Microsemi 生产的 5071A 型铯钟便是磁选态铯钟的典型代表,已实现商用多年,全球大多数的守时实验室都选用 5071A 型铯钟作为守时钟。激光抽运型铯原子钟采用激光进行原子态制备,效率高且磁场敏感性降低,不需要电子倍增器,寿命也可更长,可见,激光抽运型铯原子钟与磁选态型铯原子钟各有特色。

常用的 5071A 和 3235B 等型号铯原子钟长期以来主要依靠进口,其关键技术一直掌握在发达国家手中。为了不受制于人,近年来国内多家单位分别开展了国产激光抽运小型铯原子钟和国产磁选态型铯原子钟的研制,并取得了阶段性的成果^[9-10]。本文介绍了铯原子钟的主要性能指标及测试方法,以中国科学院国家授时中心时间频率基准实验室保持和发播的协调世界时 UTC(NTSC)为时间频率参考信号,对国产激光抽运型铯原子钟 TA1000 的性能进行了分析,并与美国 5071A 型铯原子钟的性能进行了对比。

1 铯原子钟主要技术指标及测试方法

铯原子钟的主要性能指标包括频率准确度、频率稳定度和频率漂移率^[11-12],下面分别介绍其指标定义及测试方法。

1.1 准确度

频率准确度是用来表征被测频率与其标称频率偏差的程度,它反映了被测频率与其标称频率的接近程度^[13],定义如公式(1)所示:

$$F_c = \left| \frac{f_c - f_{oc}}{f_{oc}} \right| = \left| \left(\frac{f_c}{f_{oc}} \right) - 1 \right|, \quad (1)$$

式(1)中, F_c 为频率准确度, f_c 为被测频率, f_{oc} 为被测频率的标称频率。在实际测量中,我们无法直接测得被测频率与标称频率的偏差,一般以参考频率源的实际频率作为标称频率。在测量中一般要求参考频率源的准确度要比被测频率的准确度高 3 倍及以上^[14]。

频率准确度测试方法主要有时差法、相位比较法和共视比对法等,本文用时差法测量国产激光抽运铯原子钟的频率准确度。首先,测量被测铯原子钟输出的 1PPS 信号与参考频率源输出的 1PPS 信号之间的时差,连续测量 3 次求平均值 ΔT_1^i ; 在第 2 天的同一时刻以同样的方法测量被测铯原子钟输出

的 1 PPS 信号与参考频率源输出的 1 PPS 信号之间的时差，测量 3 次求平均值 $\Delta T_2'$ ，然后用公式 (2) 计算频率准确度。

$$A = \left| \frac{\Delta f}{f_0} \right| = \left| \frac{\Delta T_2' - \Delta T_1'}{\tau_0} \right|, \quad (2)$$

式 (2) 中， Δf 为被测铯原子钟相对于参考频率源的频率偏差，为 f_0 参考频率源的标称频率， $\Delta T_1'$ 和 $\Delta T_2'$ 分别为连续两天测量的时差平均值， $\tau_0 = 86\,400 \times 10^9 \text{ ns}$ 。

1.2 稳定度

原子钟内部噪声主要包括：相位白噪声 (WPM)、相位闪烁噪声 (FPM)、频率白噪声 (WFM)、频率闪烁噪声 (FFM)、随机游走噪声 (RWFM) 五项^[17-18]。这些噪声将会影响原子钟输出频率在一个范围内波动，一般采用频率稳定度来描述原子钟输出频率受噪声影响随机起伏的程度。

常用 Allan 偏差 (ADEV) 来描述频率稳定度，但是 ADEV 无法区分调相白噪声 (WPM) 和调相闪烁噪声 (FPM)，而采用修正 Allan 偏差 (MDEV) 可准确区分这两种噪声^[17-18]。ADEV 和 MDEV 定义分别如式 (3) 和式 (4) 所示：

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

$$\text{Mod } \sigma_y(\tau) = \frac{1}{\tau} \sqrt{\frac{1}{2m^2(N-3m+1)} \sum_{j=1}^{N-3m+1} \left\{ \sum_{i=j}^{j+m-1} [x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_i] \right\}^2}, \quad (4)$$

式 (3) 和 (4) 中， $x_i (i=1, 2, \dots, N)$ 是原子钟的钟差数据， N 是钟差数据总数， τ 是测量间隔。当 $m=1$ 时，MDEV 的值与 ADEV 的值相等。图 1 为用 MDEV 表征的铯原子钟各类噪声的幂律谱曲线^[19]。

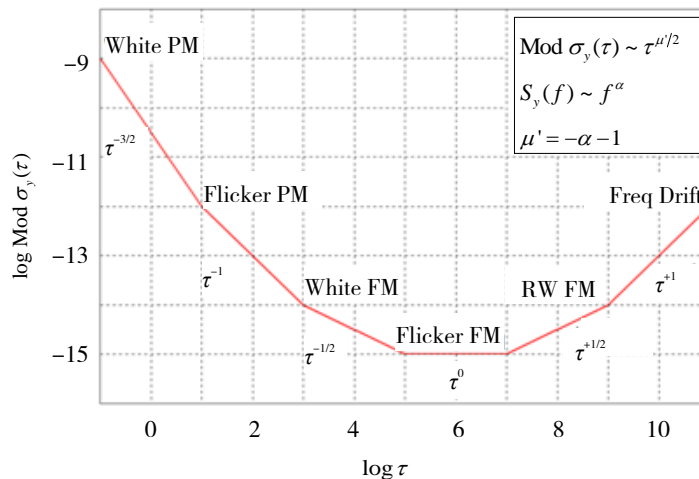


图 1 MDEV 表征的原子钟噪声幂律谱曲线

铯原子钟频率稳定度测试的取样时间 τ 一般为 1 s, 10 s, 100 s, 1 ks 和 1 d, 10 d 等，其中 1 s, 10 s, 100 s, 1 ks 的频率稳定度使用比相法测量，利用比相仪连续测量获得多组被测原子钟输出的 10 MHz 信号与参考频率源输出的 10 MHz 信号之间的相位差数据，然后将相差数据转换成时差数据，根据公式 (4) 计算频率稳定度；1 d, 10 d 的频率稳定度使用时差法测量，利用计数器连续测量获得多组被测铯原子钟输出的 1 PPS 信号与参考频率源输出的 1 PPS 信号之间的时差数据，然后按照公式 (4) 计算频率稳定度。

1.3 漂移率

频率漂移率是描述原子钟输出频率随运行时间变化而变化的特征^[20]。原子钟在连续的运行过程中，会受到周围环境变化的影响及内部元器件的老化，因此其输出的频率值会随运行时间单调增加而减小，这种变化率就称为频率漂移率。频率漂移率也常被称为频率老化率。频率漂移率测试方法主要有时差法、相位比较法和共视比对法等，本文用时差法测量国产激光抽运铯原子钟的频率漂移率。每天在同一时刻测量被测铯原子钟输出的 1 PPS 信号与时间频率参考源输出的 1 PPS 信号之间的时差，连续测量 3 次求平均值 T_i 。连续测量 15 d，分别计算出前后两天的时差变化量 $\Delta T_i = T_{i+1} - T_i$ 。频率漂移率的计算如公式 (5) 所示：

$$K(d) = \frac{\sum_{i=1}^{15} (\Delta T_i - \overline{\Delta T})(t_i - \bar{t})}{\tau_0 \sum_{i=1}^{15} (t_i - \bar{t})^2}, \tag{5}$$

式 (5) 中， $K(d)$ 为日频率漂移率， T_i 为第 i 天测得的时间差， $\overline{\Delta T} = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} \Delta T_i$ ， $t_i = 1, 2, \dots, 15$ ，为 ΔT_i 值的测量时序， $\bar{t} = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} \Delta t_i$ ， $\tau_0 = 86\,400 \times 10^9 \text{ ns}$ 。

2 国产激光抽运型铯原子钟性能测试及分析

以 UTC (NTSC) 为参考频率源，其频率准确度优于 5×10^{-14} ，日频率稳定度保持在 10^{-15} 量级，自 2017 年 10 月开始，对放置在国家授时中心的 3 台 TA1000 型激光抽运小型铯原子钟的频率准确度、频率稳定度和频率漂移率进行测试，并与美国产 5071A 型铯原子钟的性能进行对比，下面介绍国产铯原子钟的数据获取和性能测试结果。

2.1 铯原子钟数据获取

铯原子钟属于高精密电子仪器，其指标容易受到外界环境影响，因此在整个铯原子钟性能的测试过程中，提供了一个相对稳定的测试环境，测试房间的温度始终保持在 $18 \sim 22 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间，湿度保持在 $35\% \sim 55\%$ 。在该测试环境中对各铯原子钟进行性能测试，图 2 为铯原子钟的测试设备框图，通过时间间隔计数器测量得到各铯原子钟输出的 1 PPS 信号与 UTC (NTSC) 输出 1 PPS 信号的时差值，同时通过多通道比相仪进行 10 MHz 频率信号的相位差测量。图 2 为铯原子钟的测试连接框图。为了区分 3 台 TA1000 型铯原子钟，将其分别表示为 TA1000 (1)、TA1000 (2)、TA1000 (3)。

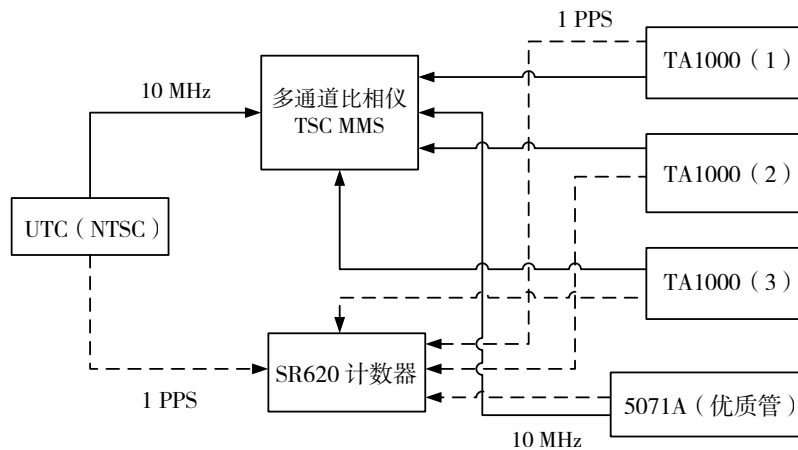


图 2 铯原子钟测试设备框图

按照图 2 所示连接设备,通过多通道比相仪 TSC MMS 测量 10 MHz 信号的相位差数据,通过 SR620 计数器测量 1 PPS 信号的时差数据,然后分别使用 3σ 法则对相差数据和时差数据进行粗差别除^[21-22]。因为多通道比相仪测量相差值的系统与 SR620 计数器测量时差值的系统分别独立,互不相关,因此可用 1 PPS 信号时差数据与 10 MHz 信号相差数据的测量结果是否一致来验证测试系统的稳定性^[23]。经过 3 个多月的运行表明,被测原子钟 1 PPS 时差信号与 10 MHz 相差数据完全一致,测试系统稳定,可以进行铯原子钟的测试评估。

2.2 频率准确度测试结果及分析

采用时差法对被测国产铯原子钟的频率准确度进行测试,连续采集了一个月各铯原子钟的时差数据,计算每天铯原子钟的频率准确度,统计一个月各铯原子钟频率准确度的平均值和均方根值,并与 5071A 型铯原子钟的频率准确度进行对比,其中 5071A (优质管)的准确度为实测结果,5071A (标准管)为官方指标,其结果如表 1 所示。

表 1 各铯原子钟频率准确度统计表

统计类型	铯钟型号				
	5071A (优质管)	TA1000 (1)	TA1000 (2)	TA1000 (3)	5071A (标准管)
统计平均值	1.95×10^{-13}	1.84×10^{-12}	1.80×10^{-12}	8.43×10^{-13}	$\pm 1 \times 10^{-12}$
均方根值	3.92×10^{-14}	1.22×10^{-13}	1.09×10^{-13}	1.37×10^{-13}	-
最大测量值	2.84×10^{-13}	2.12×10^{-12}	2.11×10^{-12}	1.17×10^{-12}	-

由表 1 可以看出,TA1000 (3) 型铯原子钟的频率准确度优于 9×10^{-13} ,另外 2 台 TA1000 型铯原子钟的频率准确度均优于 2×10^{-12} ,而美国产 5071A (优质管)型铯原子钟频率准确度为 1.95×10^{-13} 。国产 TA1000 型铯原子钟的频率准确度与 5071A (优质管)型铯原子钟的频率准确度还有一定差距,但是其与 5071A (标准管)型铯原子钟的准确度相当。

2.3 频率稳定度测试结果及分析

根据连续采集的 3 个月的相差数据和时差数据,使用 MDEV 求频率稳定度。图 3 为国产 TA1000 型铯原子钟频率稳定度结果,表 2 为各铯原子钟的稳定度统计表,其中 5071A (标准管)为官方指标,其余均为实测结果。

首先,从图 3 可见,3 台 TA1000 型铯原子钟短期 (1~10 s) 频率稳定度曲线变化相似,主要以频率闪烁噪声影响为主;中期 ($10 \sim 10^5$ s) 频率稳定度曲线虽然有一定差异,但是差异不大,主要以相位白噪声和相位闪烁噪声影响为主;3 台 TA1000 型铯原子钟长期 ($> 10^5$ s) 频率稳定度主要以随机游走噪声影响为主,曲线变化相差很明显,而且 TA1000 (1) 频率稳定度要比 TA1000 (2)、TA1000 (3) 频率稳定度高,这从表 2 频率稳定度统计表也可以明显看出。TA1000 型铯原子钟长期频率稳定度可达 4.02×10^{-13} 1 ks, 1.27×10^{-13} /10 ks, 7.46×10^{-14} /1 d, 9.77×10^{-14} /10 d,而且已连续、稳定运行超过 1 年时间,其长期稳定性和可靠性基本满足守时系统的要求。

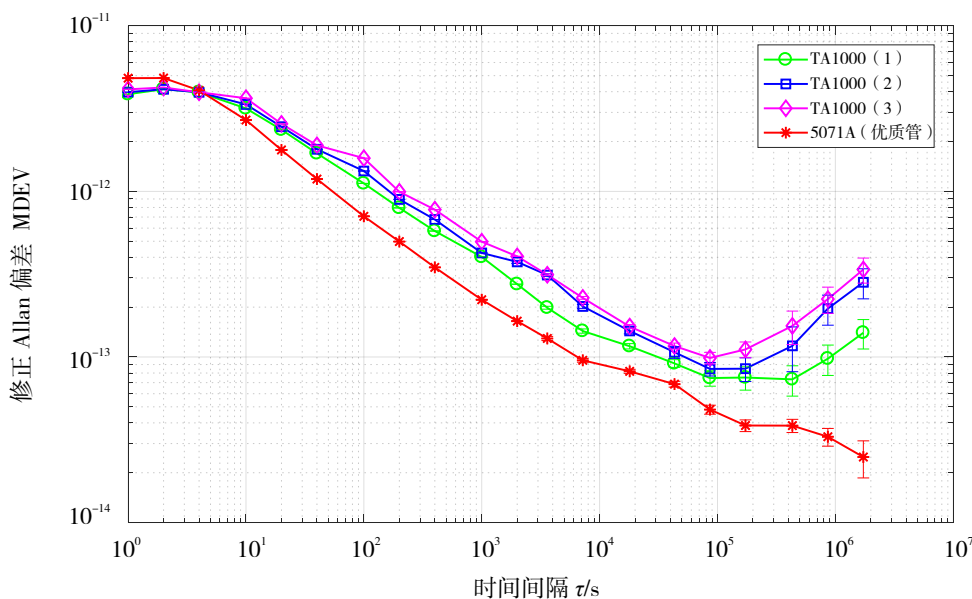


图 3 各铯原子钟频率稳定度统计图

表 2 各铯原子钟频率稳定度统计表

时间间隔 τ	5071A (优质管)	TA1000 (1)	TA1000 (2)	TA1000 (3)	5071A (标准管)
1 s	4.83×10^{-12}	3.86×10^{-12}	3.97×10^{-12}	4.13×10^{-12}	$\leq 1.20 \times 10^{-11}$
10 s	2.70×10^{-12}	3.17×10^{-12}	3.35×10^{-12}	3.65×10^{-12}	$\leq 8.50 \times 10^{-13}$
100 s	7.07×10^{-13}	1.12×10^{-12}	1.33×10^{-12}	1.59×10^{-12}	$\leq 2.70 \times 10^{-12}$
1 ks	2.22×10^{-13}	4.02×10^{-13}	4.25×10^{-13}	4.97×10^{-13}	$\leq 8.50 \times 10^{-13}$
10 ks	7.56×10^{-14}	1.27×10^{-13}	1.87×10^{-13}	2.19×10^{-13}	$\leq 2.70 \times 10^{-13}$
1 d	8.89×10^{-14}	7.46×10^{-14}	8.47×10^{-14}	9.87×10^{-14}	$\leq 8.50 \times 10^{-14}$
5 d	3.85×10^{-14}	7.33×10^{-14}	1.17×10^{-13}	1.54×10^{-13}	$\leq 5.00 \times 10^{-14}$
10 d	3.30×10^{-14}	9.77×10^{-14}	1.96×10^{-13}	2.24×10^{-13}	$\leq 5.00 \times 10^{-14}$

其次, 5071A 型铯原子钟在短期 (1~10 s) 主要以频率闪烁噪声影响为主, 在中长期 (> 10 s) 主要受相位白噪声和相位闪烁噪声的影响, 而且与 3 台 TA1000 型铯原子钟频率稳定度相比, 5071A 铯原子钟短期 (1~10 s) 频率稳定度与国产 TA1000 铯原子钟频率稳定度曲线差异不大, 但是 5071A 在中长期 (> 10 s) 的频率稳定度明显要优于 TA1000 型铯原子钟频率稳定度, 尤其是长期 (> 10^5 s) 频率稳定度。

最后, 从表 2 的各频率稳定度统计结果可以看出, 与 5071A (优质管) 型铯原子钟相比, TA1000 型铯原子钟中短期频率稳定度已经接近 5071A 型铯原子钟, 但就长期稳定度来说, TA1000 型铯钟与 5071A 型铯钟还有一定差距, 尤其是 > 1 d 的频率稳定度; 而与 5071A (标准管) 型铯原子钟相比, TA1000 型铯原子钟中短期频率稳定度已完全达到 5071A (标准管) 型铯原子钟的官方指标, 长期稳定度稍微逊色一些。

2.4 频率漂移率评估

根据 1.3 节介绍的铯原子钟频率漂移率的测试方法, 根据采集的时差数据计算出频率漂移率, 统计结果如表 3 所示。从表 3 可以看出, TA1000 型铯原子钟的日频率漂移率在 1×10^{-14} 和 1×10^{-15} 量级, 但

是受铯原子钟日频率稳定度的限制和系统噪声的影响，所计算得到的日频率漂移率并不够准确。对于铯原子钟，因其日频率漂移率不明显且受其他因素影响较大，一般建议使用月频率漂移率作为评估标准，然而计算月频率漂移率时，铯原子钟需要至少连续运行1年甚至更长时间，才能得到较为客观的评估结果。

表3 各铯原子钟频率漂移率统计表

铯钟型号	频率漂移率/d
5071A	6.76×10^{-16}
TA1000 (1)	-3.93×10^{-15}
TA1000 (2)	1.35×10^{-14}
TA1000 (3)	1.42×10^{-14}

另外，铯原子钟的可靠性也是守时型铯原子钟一个重要指标，用平均无故障工作时间（MTBF）来表示^[24-25]。3台TA1000型铯原子钟至今已连续、稳定运行1年半的时间，但其运行时间依然有限，而可靠性则需要更长时间的连续、稳定运行才能评估。

3 结语

本文介绍了铯原子钟的频率准确度，频率稳定度和频率漂移率的测试方法，以UTC（NTSC）为时间频率参考，对国产TA1000型铯原子钟的性能进行了测试。测试结果表明，国产TA1000型铯原子钟的频率准确度优于 9×10^{-13} ，与5071A（优质管）型铯原子钟相比，频率准确度还有一定差距，但是已达到5071A（标准管）的准确度指标。TA1000型铯原子钟的中短期频率稳定度与5071A型铯原子钟相差不大，长期稳定度由于受随机游走噪声的影响，与5071A型铯原子钟有一定差距，但是从守时系统一年多的连续、可靠运行情况来看，国产TA1000铯原子钟基本可满足守时系统的要求。由于国产TA1000铯原子钟目前试运行时间不太长，可靠性指标则需要更长时间的运行才能进行评估。

参考文献：

- [1] 李孝辉, 杨旭海, 刘娅, 等. 时间频率信号的精密测量[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 98-108.
- [2] 漆贯荣. 时间科学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 75-112.
- [3] 张首刚. 新型原子钟发展现状[J]. 时间频率学报, 2009, 32(2): 81-91.
- [4] 王义道. 我国原子频标事业早期回顾一隅[J]. 时间频率学报, 2016, 39(4): 247-254.
- [5] 董绍武, 屈俐俐, 袁海波, 等. NTSC守时工作: 国际先进、贡献卓绝[J]. 时间频率学报, 2016, 39(3): 129-137.
- [6] 董绍武, 王燕平, 武文俊, 等. 国际原子时及NTSC守时工作进展[J]. 时间频率学报, 2018, 41(2): 73-79.
- [7] 董绍武. 守时中的若干重要技术问题研究[D]. 西安: 中国科学国家授时中心, 2007.
- [8] 李孝峰. 小型光抽运铯束原子频率标准关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2015.
- [9] 冯遂亮. 原子钟数据预处理与钟性能分析方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2009.
- [10] 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.
- [11] 宋会杰, 董绍武, 王正明, 等. NTSC守时氢钟性能分析[J]. 天文学报, 2015, 56(6): 628-636.
- [12] 陈江, 王沛, 马骥, 等. LIP Cs3000C磁选态铯原子钟的测试[J]. 时间频率学报, 2018, 41(3): 191-193.
- [13] 董绍武. 国产守时型氢钟性能的初步测试[C]//第三届全国虚拟仪器大会, 桂林: 第三届全国虚拟仪器大会组委会,

2008.

- [14] 廖家源, 翟造成. 氢原子钟性能测试结果[J]. 时间频率学报, 1992, 15(1):36-37.
- [15] 张敏. 原子钟噪声类型和频率稳定度估计的自由度分析与探讨[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2008.
- [16] 袁海波, 董绍武, 武福平, 等. 原子钟信号主要噪声类别判定与分析[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(8): 187-194.
- [17] ALLAN D W, WEISS M A, JESPERSEN J L. A frequency-domain view of time-domain characterization of clocks and time and frequency distribution systems[C] // Proceedings of the 45th Annual Symposium on Frequency Control, Vancouver: IEEE Computer Society, 1991.
- [18] PEIL S, HANSEN J, SWANSON T B. Performance and applications of an ensemble of Atomic fountains[C] // PTTI Precise Time and Time Interval Systems and Application Meeting, 2012: 269-271
- [19] 杨文可. 时频信号相位噪声分析与辨识研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008: 9.
- [20] 李平, 马晖, 马俊超, 等. 铯原子钟日频率漂移率测量的不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2013, 40(8): 88-91.
- [21] 刘娅, 李孝辉, 唐升, 等. 多台原子钟性能在线监测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(10): 2177-2183.
- [22] 李跃华. 原子钟性能分析平台软件的设计与实现[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2006.
- [23] 卫国. 原子钟时间尺度的稳定性分析[J]. 中国科学, 1992(1): 80-86..
- [24] 王正明, 袁海波. 氢钟和铯钟联合守时初探[J]. 天文学报, 2007, 48(1): 71-83.
- [25] 黄观文. GNSS 星载原子钟质量评价及精密钟差算法研究[D]. 西安: 长安大学, 2012: 46.