

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311982

# 基于 NIM-Sr1 光晶格钟驾驭氢钟产生本地时标的研究\*

朱 琳<sup>1,2,3</sup>, 王 强<sup>1,2</sup>, 王玉琢<sup>1,2</sup>, 林戈戈<sup>1,2</sup>, 方占军<sup>1,2</sup>

(1. 中国计量科学研究院时间频率计量研究所 北京 100029; 2. 国家市场监督管理总局重点实验室(时间频率与重力计量基准);  
3. 清华大学精密仪器系 北京 100084)

**摘 要:**光钟在生成高性能原子时标方面有很大的潜力。本文介绍了以中国计量科学研究院(NIM)的 NIM-Sr1 光晶格钟为参考生成本地时标的基本思路,评估了实验室目前用作飞轮振荡器的 HM57 氢钟的噪声参数。针对 NIM-Sr1 光晶格钟作为基准钟长期间歇运行时的运行率和时间分布,设计了对测量数据的分段处理方式。通过对 2022 年 9 月和 10 月 NIM-Sr1 光晶格钟与 HM57 氢钟比对数据的后处理,生成了光钟驾驭的纸面时标 TS(P),其在 60 天内相对于 TT(BIPM22)的最大时间偏差为 0.7 ns,验证了驾驭方法的可靠性。搭建了以 NIM-Sr1 光晶格钟为参考驾驭 HM57 氢钟生成本地实时物理时标的实验系统,并评估了 2023 年 4 月生成的实时物理时标 TS(R)的性能,其在 30 天内相对于 UTC 的最大时间偏差为 0.89 ns。

**关键词:**时标;光钟;驾驭;氢钟

中图分类号: TH741.4 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 410.55

## Research on generating a local time scale with NIM-Sr1 optical lattice clock

Zhu Lin<sup>1,2,3</sup>, Wang Qiang<sup>1,2</sup>, Wang Yuzhuo<sup>1,2</sup>, Lin Yige<sup>1,2</sup>, Fang Zhanjun<sup>1,2</sup>

(1. Division of Time and Frequency Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;  
2. Key Laboratory of State Administration for Market Regulation (Time Frequency and Gravity Primary Standard),  
Beijing 100029, China; 3. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Optical clocks have great potential to generate high-performance atomic time scales. This paper introduces the basic idea of generating a local time scale steered to NIM-Sr1 optical lattice clock of the National Institute of Metrology (NIM), and the evaluation of the noise parameters of the HM57 hydrogen maser which is currently used as the flywheel oscillator. When NIM-Sr1 is operated as a reference clock, it runs consecutively with interrupts. A post-processing steering algorithm is designed to match this operation condition with the comparison data between NIM-Sr1 and HM57 in September and October 2022. The post-processing time scale TS(P) steered to NIM-Sr1 has a maximum time deviation of 0.7 ns compared with TT(BIPM22) within 60 days. Moreover, a system with dedicated hardware and software is built to generate a real-time physical time scale by steering HM57 to NIM-Sr1. The generated real-time physical time scale TS(R) in April 2023 is evaluated with a maximum time deviation of 0.89 ns compared with UTC within 30 days.

**Keywords:** time scale; optical clock; steering; hydrogen maser

## 0 引 言

高准确度的基准原子钟是时间频率体系的量值源头。目前,国际单位制的时间单位秒仍然是基于<sup>133</sup>Cs 原子的基态超精细跃迁定义的<sup>[1]</sup>。近年来,光钟的系统不确定度已经达到  $10^{-18}$  甚至进入  $10^{-19}$  量级<sup>[2-3]</sup>, 优于喷泉

钟的系统不确定度约 2 个数量级。将来的国际单位制秒有望基于光学频率标准重新定义<sup>[1]</sup>。因此,以光学频率标准为参考生成一个连续、稳定的高性能原子时标是非常重要的。与协调世界时(coordinated universal time, UTC)相对应,各守时实验室保持有各自的本地时标 UTC(*k*)(其中 *k* 是本地实验室的简称)<sup>[4-5]</sup>。UTC(*k*)作为 UTC 的物理实现,是一个实时的物理信号,并通常作

收稿日期:2023-09-28 Received Date: 2023-09-28

\* 基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFF0603802)资助

为当地的标准时间,为各个领域提供精准的授时服务。用光钟驾驭 UTC( $k$ )有助于新的秒定义的实现和应用。

在用光钟作为 UTC( $k$ )的参考前,一般是以 UTC 或本地 Cs 喷泉钟为参考,修正连续运行的飞轮振荡器的输出频率,生成本地时标<sup>[6-7]</sup>。目前的飞轮振荡器一般采用氢钟。根据每月 Circular-T 公报给出的 UTC 与 UTC( $k$ )的差值驾驭,可以保持 UTC( $k$ )与 UTC 时标的同步。也有实验室以本地 Cs 喷泉钟为参考驾驭,这可以实现比 Circular-T 公报更短的驾驭周期<sup>[8]</sup>。中国计量科学研究院(NIM)目前用 UTC 和 NIM5 铯喷泉钟共同驾驭本地氢钟,生成稳定的本地时标 UTC(NIM)<sup>[9]</sup>。

近几年来,已经有多个实验室开展了光钟驾驭本地时标的研究。德国 PTB 用镱光钟驾驭氢钟,仿真计算的本地时标相对于理想参考的时间偏差在 25 天内保持在 0.2 ns 以下<sup>[10]</sup>。日本 NICT 同样用镱光钟驾驭氢钟,连续生成了长达半年的时标,其频率稳定度在 20 天时为  $3.9 \times 10^{-16}$ ,相对于 TT(BIPM16)的时间偏差在 5 个月后才为 0.79 ns<sup>[11]</sup>。美国 NIST 用镱光钟驾驭氢钟组,通过对测量数据后处理生成时标 AT1',其频率稳定度在 50 天时为  $8.8 \times 10^{-17}$ ,相对于 UTC 的时间偏差在 MJD(modified julian date)58 054~58 214 期间的均方根为 0.4 ns<sup>[12]</sup>。意大利 INRiM 仿真研究了光钟的运行时间和氢钟噪声系数及频率跳变对驾驭的时标性能的影响<sup>[13]</sup>。本实验室之前也开展了光钟驾驭本地时标的初步研究<sup>[14]</sup>。

随着一些光频飞轮振荡器的可靠性和稳定性不断提高,其更优的中短期频率稳定度可以突破微波飞轮振荡器对本地时标性能的限制,有望取代微波飞轮振荡器成为新的守时钟。JILA、NIST 等实验室采用基于低温硅腔的光频振荡器作为守时飞轮钟,其频率稳定度在约 1 周的时间范围内均优于  $1 \times 10^{-15}$ 。以镱光钟为参考,通过数据后处理,驾驭所得时标的时间偏差在 34 天后仅为  $48 \pm 94$  ps;分析表明,该时标的频率稳定度在 85 天后可以达到  $10^{-18}$  量级<sup>[15]</sup>。

与 2020 年绝对频率测量时的运行率相比,NIM-Sr1 在作为基准钟长期运行时,其运行率为 15%~20%,且运行时间集中在工作日 UTC 时间的 2:30~12:00 之间。本文针对 NIM-Sr1 长期间歇运行的时间分布,调整了对测量数据的分段处理方法。利用 2022 年 8 月 28 日~10 月 27 日(MJD 59 819~59 879)NIM-Sr1 光晶格钟与氢钟的比对数据,采用后处理的方式生成了纸面时标 TS(P),其在 60 天内相对于 UTC 的最大时间偏差为 1.14 ns,相对于 TT(BIPM22)的最大时间偏差为 0.7 ns。进一步验证了驾驭方法的可靠性,也有助于接下来以 NIM-Sr1 为参考生成实时物理时标。

在仿真数据模拟和实际数据后处理的基础上,本文还介绍了光钟驾驭生成本地实时物理时标的初步结果。由

于光晶格钟结构复杂,在生成实时物理时标时需要及时判断光钟测量数据的有效性,剔除无效数据。因此,本文通过记录各个激光的锁定状态、光晶格内的原子数和探测的跃迁几率,设计程序自动判断光钟的运行状态,实时提取有效的测量数据,进而预测和修正氢钟频率。从 2023 年 4 月开始,以 NIM-Sr1 为参考对位于计量院昌平院区的 HM57 氢钟进行实时驾驭并生成实时物理时标 TS(R),其在 30 天内相对于 UTC 的最大时间偏差为 0.89 ns。

本文主要分为以下几个部分:第 1 节介绍 NIM-Sr1 光晶格钟驾驭氢钟生成本地时标的基本思路 and 数据处理流程;第 2 节评估了 HM57 氢钟的噪声模型;第 3 节介绍了之前对仿真数据模拟驾驭的结果,并对 NIM-Sr1 作为基准钟长期间歇运行的测量数据进行了后处理的驾驭;第 4 节介绍了 2023 年 4 月生成本地实时物理时标的方法和结果。

## 1 光钟驾驭本地飞轮振荡器的基本思路

现阶段,尽管已有光钟运行率在实验过程中达到 80% 以上<sup>[16]</sup>,但仍然无法做到无中断运行。借助光钟产生本地时标的方法是以光钟作为参考,提供间歇的频率修正,驾驭连续运行的飞轮振荡器。本节以氢钟为例,介绍用光钟驾驭本地飞轮振荡器的基本思路。

中国计量科学研究院的第 1 套铯原子光晶格钟系统 NIM-Sr1 在 2020 年的系统频移评估测量中不确定度已经达到  $2.9 \times 10^{-17}$ <sup>[17]</sup>,可以作为准确的频率参考。如图 1 所示是 NIM-Sr1 驾驭 HM57 氢钟并生成本地时标的原理图,其中实线方框是生成实时物理时标 TS(R)的实验设置,虚线方框是计算后处理纸面时标 TS(P)的数据处理流程。

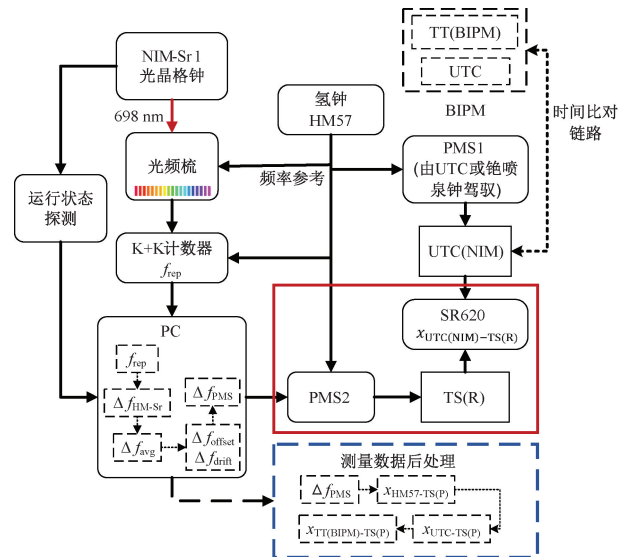


图 1 NIM-Sr1 光晶格钟驾驭氢钟并生成本地时标原理图  
Fig. 1 The schematic of steering HM57 hydrogen maser by NIM-Sr1 optical lattice clock to generate local time scales

其中 HM57 氢钟作为守时飞轮钟连续运行, NIM-Sr1 作为基准钟间歇运行, 借助光梳测量氢钟与铯光钟的相对频差。光梳方程可以表示为:

$$f_{\text{opt}} = N \cdot f_{\text{rep}} + f_0 + f_b \quad (1)$$

其中,  $f_{\text{opt}}$  是利用氢钟测量的钟激光的名义频率, 其锁定在  $^{87}\text{Sr}$  原子  $^1S_0 - ^3P_0$  跃迁能级上;  $f_0$  是载波包络偏移频率;  $f_b$  是钟激光和其最近的光梳梳齿的拍频频率;  $N$  是整数;  $f_{\text{rep}}$  为光梳的重复频率。以氢钟信号作为计数器的参考, 通过测量  $f_{\text{rep}}$ ,  $f_0$  和  $f_b$ , 代入式(1) 计算出  $f_{\text{opt}}$ , 经各项频移(铯光钟系统频移、相对论红移等)修正后即为氢钟测量的 NIM-Sr1 光晶格钟的名义频率  $f_{\text{Sr}}^{[17]}$ 。则以铯光钟为参考, 由式(2) 计算氢钟的相对频差为:

$$\Delta f_{\text{HM-Sr}} = \frac{f_{\text{Sr}}}{f_{\text{Sr}}} - 1 \quad (2)$$

其中,  $f_{\text{Sr}}$  是 CCTF 2017 给出的  $^{87}\text{Sr}$  原子的频率推荐值。通过监测和记录 NIM-Sr1 的运行时间和状态, 每隔一段时间提取 NIM-Sr1 正常运行时间的有效测量数据  $\Delta f_{\text{HM-Sr}}$ , 并由式(3) 计算该周期内的测量平均值  $\Delta f_{\text{avg}}$ :

$$\Delta f_{\text{avg}} = \int_0^{T_{\text{Sr}}} \Delta f_{\text{HM-Sr}}(t) dt / T_{\text{Sr}} \quad (3)$$

其中,  $T_{\text{Sr}}$  为该周期内铯光钟正常运行的时间。如图 2 所示, 是 2022 年 8 月 28 日~10 月 27 日(MJD 59 819~59 879) NIM-Sr1 光晶格钟间歇运行期间, 以 6 h 为周期分段计算的测量平均值  $\Delta f_{\text{avg}}$ , 误差棒代表相应的统计不确定度  $\sigma_{\text{HM-Sr}}^{[12]}$ 。

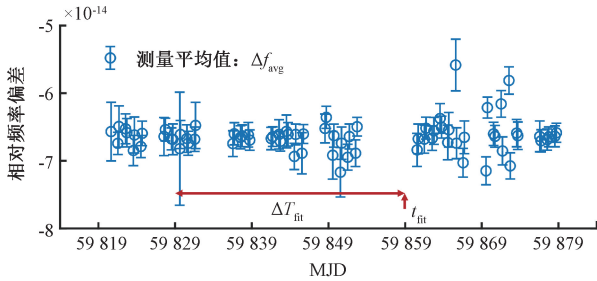


图 2 2022 年 8 月 28 日~10 月 27 日(MJD 59 819~59 879) 以 6 h 为周期分段计算的测量平均值  $\Delta f_{\text{avg}}$

Fig. 2 The measurement value  $\Delta f_{\text{avg}}$  averaged over each 6-hour period from August 28 to October 27, 2022 (MJD 59 819~59 879)

由测量平均值  $\Delta f_{\text{avg}}$  计算和预测 HM57 氢钟的频率漂移  $\Delta f_{\text{drift}}$  和偏差  $\Delta f_{\text{offset}}$  的方法主要有两种, 一种是线性拟合, 一种是卡尔曼滤波。线性拟合的方法是对  $t_{\text{fit}}$  前  $\Delta T_{\text{fit}}$  范围内的测量平均值  $\Delta f_{\text{avg}}$  进行最小二乘拟合, 拟合结果的斜率值  $\Delta f_{\text{drift}}$  作为氢钟的频率漂移<sup>[11]</sup>, 由于本文的时间坐标采用 MJD 坐标, 因此拟合结果的截距  $\Delta f_0$  是当

$MJD = 0$  时的值。由拟合结果利用式(4) 预测  $MJD = t_{\text{fit}}$  时的相对频差  $\Delta f_{\text{offset}}$ :

$$\Delta f_{\text{offset}} = \Delta f_{\text{drift}} \cdot t_{\text{fit}} + \Delta f_0 \quad (4)$$

当  $t_{\text{fit}}$  随时间向后移动时, 拟合范围  $\Delta T_{\text{fit}}$  也会随之平移。拟合范围  $\Delta T_{\text{fit}}$  的大小主要取决于氢钟闪烁噪声本底的持续时间。

卡尔曼滤波算法则是对测量平均值  $\Delta f_{\text{avg}}$  和之前的预测值加权平均, 计算新的状态估计值  $\mathbf{X}(n)^{[18-19]}$ :

$$\mathbf{X}(n) = \mathbf{X}(n|n-1) + K \cdot [\Delta f_{\text{avg}}(n) - \mathbf{H} \cdot \mathbf{X}(n|n-1)] \quad (5)$$

其中,  $K$  是卡尔曼增益系数,  $\mathbf{X}(n|n-1)$  是之前的状态预测值, 状态值包括频率偏差和漂移两部分  $\mathbf{X}(n) = \begin{pmatrix} \Delta f_{\text{offset}}(n) \\ \Delta f_{\text{drift}}(n) \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{H} = (1 \ 0)$ 。由式(5) 可以看出预测值  $\mathbf{X}(n|n-1)$  和测量值  $\Delta f_{\text{avg}}(n)$  所占的比重取决于卡尔曼增益系数  $K$ 。进一步地,  $K$  的大小主要取决于测量过程中测量噪声  $R$  和过程噪声  $Q$  的大小。测量平均值  $\Delta f_{\text{avg}}(n)$  所对应的周期内, 光钟运行时间越长, 测量不确定度越小, 测量噪声  $R$  越小, 卡尔曼增益系数  $K$  越大, 测量值所占的比重越大。过程噪声取决于飞轮振荡器的噪声系数和两个测量值之间的时间间隔, 噪声系数越大或时间间隔越长, 过程噪声  $Q$  越大,  $\mathbf{X}(n|n-1)$  所占的比重越小。

如图 1 中实线方框所示, 生成实时物理时标时, 在计算和预测得到氢钟的频率漂移  $\Delta f_{\text{drift}}$  和偏差  $\Delta f_{\text{offset}}$  后, 需要控制相位微跃器(phase micro stepper, PMS)对氢钟信号进行修正, 由式(6) 可以计算出对氢钟频率的修正值:

$$\Delta f_{\text{PMS}} = -(\Delta f_{\text{drift}} \cdot \Delta t + \Delta f_{\text{offset}}) \quad (6)$$

其中,  $\Delta t$  为当前时刻距最近一次  $\Delta f_{\text{offset}}$  更新的时间间隔。PMS2 的输出信号即为 NIM-Sr1 光晶格钟驾驭 HM57 氢钟生成的本地时标 TS(R)。利用时间间隔频率计数器(SR620)测量 TS(R) 与本地时标 UTC(NIM) 的时差。并可以借助 UTC(NIM) 的时间比对链路, 进一步实现 TS(R) 与 UTC 和 TT(BIPM) 的比对。如图 1 中的虚线方框所示, 在生成后处理的纸面时标 TS(P) 时, 同样需要计算对氢钟信号的频率修正量  $\Delta f_{\text{PMS}}$ , 再对  $\Delta f_{\text{PMS}}$  积分计算时间误差的修正量  $x_{\text{TS(P)}-\text{HM57}}$ , 借助过去 UTC(NIM) 与 HM57 的时差记录, 溯源至 UTC 和 TT(BIPM), 具体计算过程在本文第 3 节中介绍。

## 2 噪声系数的评估

在光钟驾驭本地飞轮振荡器前, 首先要了解飞轮振荡器的性能, 包括噪声参数和频率漂移, 这也能够为预测氢钟频率的算法提供先验信息。



本文选用计量院的 HM57 氢钟 (VREMYA-CH VCH-1003M<sup>[20]</sup>, No. 4857) 作为飞轮振荡器, 并评估了其噪声参数。在测量绝对频率时, 光梳采用锁光频测微波的测量模式<sup>[17]</sup>。选取一段较长的连续测量数据并计算  $\Delta f_{\text{HM-Sr}}$  的阿伦偏差 (Allan deviation), 如图 3 中的三角形标记的虚线所示。由于铯原子光晶格钟的频率稳定度远优于氢钟, 因此可以认为  $\Delta f_{\text{HM-Sr}}$  的噪声和漂移主要来源于氢钟。但该方法受限于频率计数器的分辨率, 测量结果的短期频率稳定度较差, 在 1 s 时的频率稳定度为  $3.7 \times 10^{-12}$ , 并不能反映氢钟的性能。因此在评估氢钟短期频率稳定度时, 光梳采用锁微波参考测光频的测量模式。式 (1) 中的  $f_0$  和  $f_{\text{rep}}$  分别锁定在微波频率参考, 频率计数器测量钟激光与光梳某根梳齿的拍频  $f_b$ 。选取一段连续测量数据评估氢钟的短期频率稳定度, 如图 3 中的三角形标记的实线所示, 1 s 时约为  $1.0 \times 10^{-13}$ 。

两台性能相近的氢钟 HM57 和 HM50 (No. 4850) 借助双混频时差系统 (dual mixer time difference system, DMTD) 互比, 由此评估 HM57 氢钟在 300 s ~ 10 天的频率稳定度, 如图 3 中的圆圈标记的实线所示。HM57 氢钟的长期频率稳定度则以 UTC 为参考计算, 频率漂移和随机游走噪声是导致其长期频率稳定度变差的主要原因。图 3 中的方形标记的实线是没有去除长期频率漂移的结果, 方形标记的虚线是去除漂移后的结果。通过对频率稳定度的分析, 评估出 HM57 氢钟的噪声系数, 包括相位白噪声  $1.0 \times 10^{-13} (\tau/s)^{-1}$ , 频率白噪声  $4.5 \times 10^{-14} (\tau/s)^{-1/2}$ , 频率闪烁噪声  $3.0 \times 10^{-16}$  和随机游走噪声  $3.8 \times 10^{-19} (\tau/s)^{1/2}$ 。图 3 中用星号标记的实线是根据氢钟噪声系数仿真的模拟数据的频率稳定度, 与测量结果基本吻合。由 BIPM 网站公布的数据计算, HM57 氢钟的长期频率漂移在 2022 年 8 月 ~ 10 月为  $1.5 \times 10^{-17}/\text{day}$ , 在 2023 年 1 月 ~ 3 月为  $1.1 \times 10^{-18}/\text{day}$ 。

光梳采用锁光频测微波的工作模式时, 虽然频率计数器的分辨率会影响测量结果的短期频率稳定度, 但长期频率稳定度仍将表现为氢钟的噪声性能。对三角形标记的虚线的斜率拟合的结果为  $5 \times 10^{-12}/\tau$ , 如图 3 中的点划线所示, 在约  $10^4$  s 与圆圈标记的实线相交。相交时的频率稳定度约为  $(6 \sim 8) \times 10^{-16}$ , 接近氢钟的闪烁噪声本底。因此, 在以光钟为参考驾取该氢钟时, 为了最大限度地利用测量数据, 发挥光钟驾取的优势, 每当测量时间达到  $10^4$  s, 就可以更新对氢钟频率漂移  $\Delta f_{\text{drift}}$  和偏差  $\Delta f_{\text{offset}}$  的预测。

在利用 NIM-Sr1 光晶格钟驾取 HM57 氢钟时, 同时还在进行铯光钟的绝对频率测量, 采用了光梳锁光频测微波的测量模式。因此, 本文对该测量模式下测量结果的噪声系数也进行评估, 以便给驾取提供参考<sup>[19]</sup>。相应的噪声系数为: 相位白噪声  $3.7 \times 10^{-12} (\tau/s)^{-1}$ , 频率白

噪声  $5.7 \times 10^{-14} (\tau/s)^{-1/2}$ , 频率闪烁噪声  $3.0 \times 10^{-16}$  和随机游走噪声  $3.8 \times 10^{-19} (\tau/s)^{1/2}$ 。频率计数器的分辨率并不会影响频率闪烁噪声和随机游走噪声。图 3 中的星号标记的虚线是根据该噪声系数仿真的模拟数据的频率稳定度。

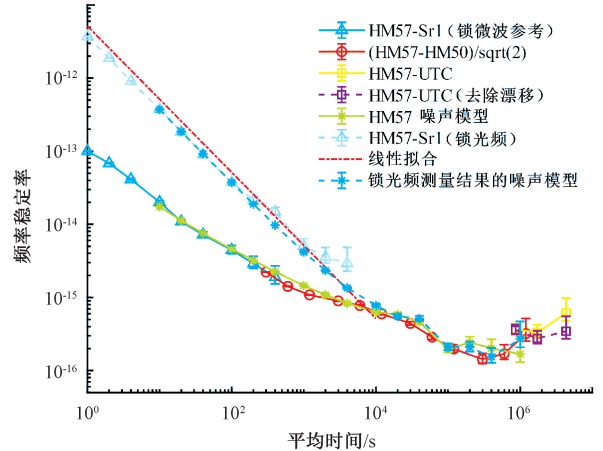


图 3 相对频率稳定度

Fig. 3 The fractional frequency stability

### 3 仿真结果和数据后处理

本文整理并总结了光钟驾取连续运行的飞轮振荡器的研究思路, 其主要分为 3 步。首先是对仿真数据的驾取, 因为采集实验数据需要很长的时间周期, 而研究仿真数据可以更方便的分析不同光钟运行情况, 以及不同性能的飞轮振荡器对驾取结果的影响。通过对同一状态下的多次仿真, 可以了解该状态下驾取所得时标性能的典型值。但仿真数据并不能完全等同于实验数据, 通过对已有的测量数据进行后处理的驾取, 可以进一步验证驾取方法的可靠性, 并通过时间比对链路 TS → UTC ( $k$ ) → UTC → TT (BIPM) 实现与 UTC 或 TT (BIPM) 的比对。最终需要生成实时物理时标, 此时需要及时提取光钟的有效测量数据, 更新对氢钟频率偏差和漂移的预测, 控制 PMS 修正氢钟频率。

在之前关于光钟驾取生成本地时标的初步研究中<sup>[14]</sup>, 通过对仿真数据的模拟驾取, 研究了在光钟总运行时间相同的情况下, 运行时间的分配对驾取结果的影响。分别从时间偏差和频率稳定度两方面评价驾取所得时标的性能。仿真结果表明, 光钟总运行时间相同时, 每次光钟运行时间内测量数据的阿伦偏差接近氢钟的闪烁噪声本底即可, 在此基础上将运行时间均匀分配, 有利于提高驾取所得时标的性能。并且应尽可能保证光钟规律运行, 避免长时间运行中断。

在相同的光钟运行情况下,文献[14]还比较了驾驭氢钟,以及碘稳频 532 nm 激光器和热束钙原子 Ramsey-Bordé 干涉仪这两种光频飞轮振荡器的结果。仿真结果表明,若要达到相同的时标性能,用热束钙原子 Ramsey-Bordé 干涉仪做守时钟,能够极大地降低对光钟运行率的需求。且在光钟运行率较高时,用热束钙原子 Ramsey-Bordé 干涉仪能够得到性能更好的时标,在未来有更大的提升空间。而碘稳频 532 nm 激光器的频率稳定度在光钟两次运行的中断时间(几个小时~几天)内均差于氢钟和热束钙原子 Ramsey-Bordé 干涉仪,因此驾驭所得时标的性能也较差。

文献[14],通过对 2020 年 NIM-Sr1 绝对频率测量期间的数据进行后处理,驾驭生成后处理的时标 TS。TS 相对于 TT(BIPM20)的时间偏差的最大值在 30 天内为 0.68 ns。该段数据的光钟运行率约 56%,但 NIM-Sr1 在作为基准钟长期运行时,运行率并没有这么高。图 2 所对应的光钟运行率是 NIM-Sr1 作为基准钟长期运行的情况,60 天的总运行率约 18.5%。

本文通过对 MJD 59819-59879 期间 NIM-Sr1 与 HM57 的比对数据进行后处理驾驭,来研究光钟作为基准钟长期运行时的驾驭方法和驾驭所得时标的性能。由这段时间的日常运行了解到,NIM-Sr1 在作为基准钟运行时,运行时间集中在工作日 UTC 时间的 2:30~12:00 之间。结合 HM57 氢钟的频率稳定度,且为了保证数据集中可用和及时驾驭,将每天的时间分为 4 段,分别为 UTC 时间 1:00~7:00,7:00~13:00,13:00~19:00 和 19:00~第 2 日 1:00。提取每段时间内的有效测量数据计算测量平均值  $\Delta f_{\text{avg}}$ 。以 UTC 时间 7:00 为界,多数情况一天可以得到两个测量平均值,且对应较长的测量时间。

在驾驭的最初的一天多时间里(MJD 59 819~59 820),由于还没有测量数据,这段时间是根据 BIPM 网站上 HM57 氢钟的数据进行驾驭的。其中,HM57 氢钟在 8 月的相对频率偏差为  $-6.7014 \times 10^{-14}$ ,在 6 月~8 月的相对频率漂移为  $9.3 \times 10^{-18}/\text{day}$ 。将这些值作为卡尔曼滤波算法的初始值。在有光钟测量数据后,每当有一个新的测量平均值  $\Delta f_{\text{avg}}$ ,采用本文第 1 节中所述的卡尔曼滤波算法更新对氢钟频率漂移和偏差的预测。若某个周期内有效测量时间小于 1 000 s,则认为所对应的测量值统计不确定度较大,需舍去。若某个周期内没有测量值,则仍然沿用最近一次估计的频率漂移  $\Delta f_{\text{drift}}$  和偏差  $\Delta f_{\text{offset}}$ 。如图 4(a)中的星号所示,是根据式(6)计算的对氢钟信号的修正值  $-\Delta f_{\text{PMS}}$ 。

按照式(7)对  $\Delta f_{\text{PMS}}$  积分计算某一时刻  $t$  对应的时间误差的修正量  $x_{\text{HM57-TS(P)}}$  :

$$x_{\text{HM57-TS(P)}}(t) = \int_0^t \Delta f_{\text{PMS}}(t) dt \quad (7)$$

根据 UTC(NIM)与 HM57 氢钟的时间差  $x_{\text{UTC(NIM)-HM57}}$ ,由式(8)、(9)和(10)可以计算出光钟驾驭后的本地时标信号 TS(P)与 UTC 的差值,并进一步与 TT(BIPM22)比对:

$$x_{\text{UTC-HM57}} = x_{\text{UTC-UTC(NIM)}} + x_{\text{UTC(NIM)-HM57}} \quad (8)$$

$$x_{\text{UTC-TS(P)}} = x_{\text{UTC-HM57}} + x_{\text{HM57-TS(P)}} \quad (9)$$

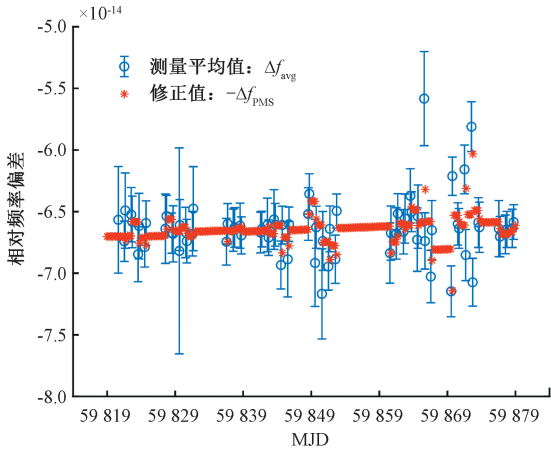
$$x_{\text{TT(BIPM22)-TS(P)}} = x_{\text{TT(BIPM22)-UTC}} + x_{\text{UTC-TS(P)}} \quad (10)$$

这里为了便于比较,将起始时刻  $x_{\text{UTC-TS(P)}}$ ,  $x_{\text{TT(BIPM22)-UTC(NIM)}}$ ,  $x_{\text{UTC-UTC(NIM)}}$  和  $x_{\text{TT(BIPM22)-UTC}}$  均设置为 0 ns,如图 4(b)所示。在这 60 天内,UTC(NIM)相对于 UTC 的最大时间偏差为 1.4 ns,后处理得到的光钟驾驭时标 TS(P)相对于 UTC 的最大时间偏差为 1.14 ns。UTC(NIM)相对于 TT(BIPM22)的最大时间偏差为 0.8 ns,TS(P)相对于 TT(BIPM22)的最大时间偏差为 0.7 ns。通过对 2022 年 9 月和 10 月测量数据的后处理,验证了驾驭方法的可靠性。且该段测量数据对应的光钟运行情况,与 NIM-Sr1 作为基准钟长期间歇运行时一致,为接下来生成实时物理时标打下了基础。

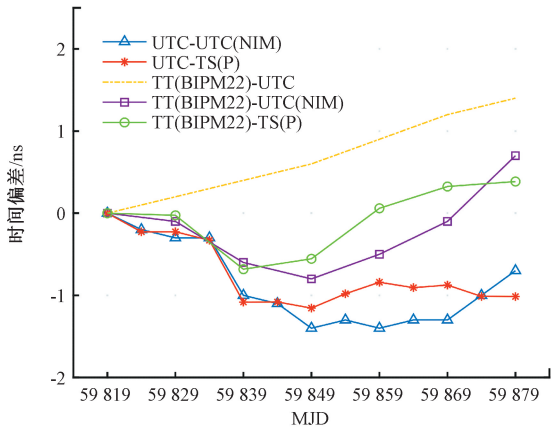
## 4 生成本地实时物理时标

在生成实时物理时标时,与依据历史实验数据后处理产生时标最大的不同在于,由于铯原子光晶格钟结构复杂,部分运行参数不正常状态的比对数据不能用于驾驭。为了能够及时更新对氢钟频率漂移  $\Delta f_{\text{drift}}$  和偏差  $\Delta f_{\text{offset}}$  的估计,需要及时判断并提取上一个周期内光钟的有效测量数据。而完全依靠人力实时处理数据显然是不可能的。因此本文设计了计算机程序根据铯原子光晶格钟运行过程中所用到的激光频率,以及激光与原子相互作用时探测的原子数和跃迁几率等,来判断 NIM-Sr1 是否正常运行,并提取正常运行时间内的有效比对数据。

NIM-Sr1 光晶格钟主要包括原子量子参考体系的制备和激光与原子量子参考体系之间相互作用两大部分。其中一共用到了 7 个不同频率的激光,它们分别锁定在谐振腔、波长计或光梳上。当激光失锁后频率会有很大的变化,用波长计测量它们的频率值并监测锁定状态。通过记录时间戳的方式记录下各个激光均正常锁定的时间为 T1。在激光均正常锁定的基础上,通过监测光晶格里的原子数和锁定时探测的跃迁几率,判断激光与原子之间相互作用是否正常,并记录下正常作用时间为 T2。此外,根据计数器测量的光梳中  $f_{\text{rep}}$ ,  $f_0$  和  $f_b$  的值,判断并记录下光梳正常锁定的时间为 T3。按照式(11)对 3 段时间 T1、T2 和 T3 取交集即为测量得到有效数据的时间 T4。



(a) 2022年9月和10月的测量值 $\Delta f_{\text{avg}}$ 和修正值 $\Delta f_{\text{PMS}}$   
(a) Measurement value  $\Delta f_{\text{avg}}$  and correction value  $\Delta f_{\text{PMS}}$   
in September and October 2022



(b) 后处理的时标TS(P)和本地时标UTC(NIM)相对于UTC和TT(BIPM22)的时间偏差  
(b) The time deviation of the post-processed time scale TS(P) and local time scale UTC(NIM) compared to UTC and TT(BIPM22)

图4 测量数据后处理和生成时标的结果

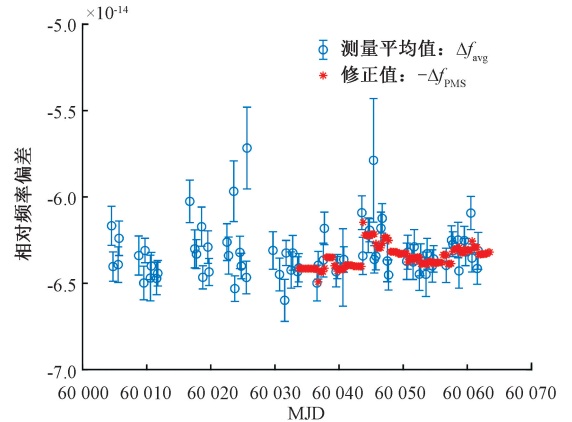
Fig. 4 Post-processing of the measurement data and the performance of the time scales

$$T4 = T1 \cap T2 \cap T3 \quad (11)$$

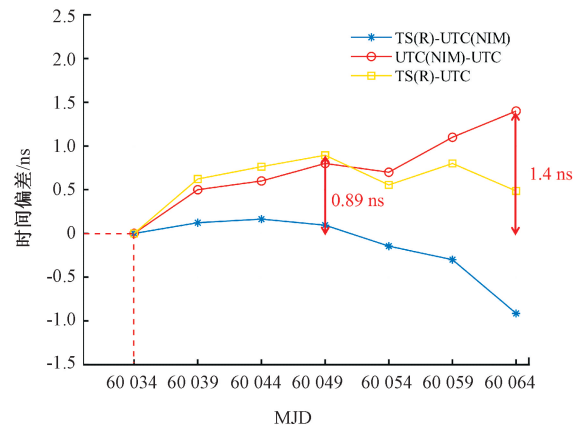
NIM-Sr1 光晶格钟自 2023 年 3 月 2 日 (MJD 60 005) 开始间歇运行。从 2023 年 4 月开始,以 NIM-Sr1 光晶格钟作为参考,对位于计量院昌平院区的 HM57 氢钟进行实时驾驭并生成物理时标 TS(R),实验系统的原理如图 1 所示。计算机程序每隔 6 h 提取前 6 h 周期内 T4 时间所对应的有效测量数据并计算测量平均值  $\Delta f_{\text{avg}}$ ,如图 5(a) 中的圆圈所示。

程序将测量均值  $\Delta f_{\text{avg}}$  和对应的时间戳保存在一个文件中,并记录光钟中断运行的时间。在有光钟测量数据或光钟中断运行时间小于 1 天时,采用本文第 1 节所述的卡尔曼滤波算法预测氢钟频率。但卡尔曼滤波算法在测量数据缺失时,可能会对系统的状态估计不准确。如图 4(a) 中在 MJD 59 868 左右两天,由于仍然沿用最近

一次估计的频率漂移和偏差值,导致修正值与 MJD 59 866 之前和 MJD 59 870 之后的结果相差较大。若之后仍然很长时间没有数据,则很有可能使得驾驭不准确。因此在生成实时物理时标时,在光钟连续中断运行的时间超过 1 天后,通过读取之前保存的测量均值  $\Delta f_{\text{avg}}$ ,对该时刻之前  $\Delta T_{\text{fit}}$  范围内的测量值进行加权最小二乘拟合,估计氢钟的频率漂移  $\Delta f_{\text{drift}}$  和偏差  $\Delta f_{\text{offset}}$ ,这里  $\Delta T_{\text{fit}}$  的取值为 30 天。之后按照式(6)计算对氢钟信号的修正量,并发送给相位微跃器不断更新对氢钟频率的修正。如图 5(a) 中的星号所示,是每个 6 h 周期内相位微跃器的修正值  $\Delta f_{\text{PMS}}$ 。



(a) 2023年3月和4月的测量平均值 $\Delta f_{\text{avg}}$ 和相位微跃器修正值 $\Delta f_{\text{PMS}}$   
(a) Measurement value  $\Delta f_{\text{avg}}$  and correction value  $\Delta f_{\text{PMS}}$   
of PMS2 phase micro stepper in March and April 2023



(b) 光钟驾驭的时标TS(R)和现有本地时标UTC(NIM)相对于UTC和UTC的时间偏差  
(b) The time deviation between the time scale TS(R) steered to the optical lattice clock and the local time scale UTC(NIM) compared to UTC

图5 生成本地实时物理时标的结果

Fig. 5 The performance of the local real-time physical time scale

用时间间隔计数器 SR620 测量光晶格钟驾驭的本地时标 TS(R) 与现有的本地时标 UTC(NIM) 的时差,结果如图 5(b) 中的星号所示。Circular-T 给出了该段时间



UTC (NIM) 相对于 UTC 的时差,如图 5(b)中的圆圈所示。为便于比较将起始时刻的时间差对齐,均设置为 0 ns。这 30 天内,UTC (NIM) 相对于 UTC 的最大时间偏差为 1.4 ns,TS (R) 相对于 UTC 的最大时间偏差为 0.89 ns。以光晶格钟作为基准钟,可以在更短时间内更准确地评估出氢钟频率变化,可以提升本地时标的性能。

## 5 结 论

根据实验室目前用作飞轮振荡器的氢钟的频率稳定度,以及 NIM-Sr1 光晶格钟作为基准钟长期间歇运行时的运行率和运行时间的分布情况,本文设计了对测量数据的处理方式。通过对 2022 年 9 月和 10 月 NIM-Sr1 与 HM57 氢钟的历史比对数据进行后处理,驾取生成了 60 天的纸面时标 TS (P),这段时间内 TS (P) 相对于 TT (BIPM22) 的最大时间偏差为 0.7 ns。本文还介绍了生成实时物理时标时的方法和初步结果。针对长时间驾取需要实时提取光钟有效测量数据的问题,设计程序自动判断光钟的有效运行时间并提取数据。参考对 2022 年历史测量数据后处理的方法和结果,建立了物理时标产生系统,从 2023 年 4 月开始驾取产生本地实时物理时标 TS (R)。评估了 4 月份 TS (R) 的性能,在 30 天内相对于 UTC 的最大时间偏差为 0.89 ns。今后将利用该方法生成更长时间的物理时标,以及针对光钟运行特性继续优化预测和驾取方法。

## 致谢

在李天初院士的带领下,中国计量科学研究院在国际上较早开展了基准钟驾取守时钟产生时标的研究,最早采用铯原子喷泉驾取,在铯光钟研制成功后又把铯光钟应用到时标驾取领域,对于产生我国独立自主的原子时标起到了非常重要的引领作用。谨以本文纪念李天初院士。

## 参考文献

[ 1 ] LODEWYCK J. On a definition of the SI second with a set of optical clock transitions [J]. *Metrologia*, 2019, 56(5): 055009.

[ 2 ] BOTHWELL T, KEDAR D, OELKER E, et al. JILA SrI optical lattice clock with uncertainty of  $2.0 \times 10^{-18}$  [J]. *Metrologia*, 2019, 56(6): 065004.

[ 3 ] BREWER S M, CHEN J S, HANKIN A M, et al.  $^{27}\text{Al}^+$

quantum-logic clock with a systematic uncertainty below  $10^{-18}$  [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(3): 033201.

[ 4 ] PANFILO G, ARIAS F. The coordinated universal time (UTC) [J]. *Metrologia*, 2019, 56(4): 042001.

[ 5 ] BIZE S. The unit of time: Present and future directions [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2019, 20(1): 153-68.

[ 6 ] BAUCH A, WEYERS S, PIESTER D, et al. Generation of UTC (PTB) as a fountain-clock based time scale [J]. *Metrologia*, 2012, 49(3): 180-8.

[ 7 ] GALLEANI L, SIGNORILE G, FORMICHELLA V, et al. Generating a real-time time scale making full use of the available frequency standards [J]. *Metrologia*, 2020, 57(6): 065015.

[ 8 ] ROVERA G D, BIZE S, CHUPIN B, et al. UTC (OP) based on LNE-SYRTE atomic fountain primary frequency standards [J]. *Metrologia*, 2016, 53(3): S81-S8.

[ 9 ] GAO Y, GAO X, ZHANG A, et al. The generation of new TA (NIM), which is steered by a NIM4 caesium fountain clock [J]. *Metrologia*, 2008, 45(6): S34-S7.

[ 10 ] GREBING C, AL-MASOUDI A, DÖRSCHER S, et al. Realization of a timescale with an accurate optical lattice clock [J]. *Optica*, 2016, 3(6): 563-9.

[ 11 ] HACHISU H, NAKAGAWA F, HANADO Y, et al. Months-long real-time generation of a time scale based on an optical clock [J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 4243.

[ 12 ] YAO J, SHERMAN J A, FORTIER T, et al. Optical-clock-based time scale [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(4): 044069.

[ 13 ] FORMICHELLA V, GALLEANI L, SIGNORILE G, et al. Robustness tests for an optical time scale [J]. *Metrologia*, 2022, 59(1): 015002.

[ 14 ] ZHU L, LIN Y, WANG Y, et al. Preliminary study of generating a local time scale with NIM  $^{87}\text{Sr}$  optical lattice clock [J]. *Metrologia*, 2022, 59(5): 055007.

[ 15 ] MILNER W R, ROBINSON J M, KENNEDY C J, et al. Demonstration of a timescale based on a stable optical carrier [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(17): 173201.

[ 16 ] LODEWYCK J, BILICKI S, BOOKJANS E, et al. Optical to microwave clock frequency ratios with a nearly continuous strontium optical lattice clock [J]. *Metrologia*, 2016, 53(4): 1123.

- [17] LIN Y, WANG Q, MENG F, et al. A  $^{87}\text{Sr}$  optical lattice clock with  $2.9 \times 10^{-17}$  uncertainty and its absolute frequency measurement[J]. *Metrologia*, 2021, 58(3): 035010.
- [18] GALLEANI L, TAVELLA P. On the use of the Kalman filter in timescales [J]. *Metrologia*, 2003, 40(3): S326-S34.
- [19] GALLEANI L, TAVELLA P. Time and the Kalman filter[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2010, 30(2): 44-65.
- [20] 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.
- ZENG D, CHEN J, GUO R, et al. Atomic Clock Ensemble Configuration and Performance Analysis [J]. *Metrology Science and Technology*, 2022, 66(4): 114-119, 62.

### 作者简介



朱琳, 2019 年于华中科技大学获得学士学位, 现为清华大学精密仪器系博士研究生, 主要研究方向为光钟在产生高性能原子时标方面的应用研究。

E-mail: zhu-119@mails. tsinghua. edu. cn

**Zhu Lin** received her B. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2019. She is currently a Ph. D. candidate in the Department of Precision Instrument at Tsinghua University. Her main research interests include the application of optical lattice clock in generating high performance atomic time scale.



林弋戈(通信作者), 2013 年于北京理工大学获得博士学位, 现为中国计量科学研究院时间频率计量科学研究所研究员, 主要研究方向为时间频率量子计量基准、时间频率精密比对与测量等。

E-mail: linyige@nim. ac. cn

**Lin Yige** (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2013 from Beijing Institute of Technology. He is currently a research fellow in the Division of Time and Frequency Metrology at National Institute of Metrology, China. His main research interests include time and frequency atomic standards, precision measurement of time and frequency, et al.