时间: 天文时-原子秒-基于常数重新定义秒

房芳, 张爱敏, 林弋戈, 李天初*

中国计量科学研究院, 北京 100029

*联系人, E-mail: litch@nim.ac.cn

收稿日期: 2020-12-18; 接受日期: 2021-04-02; 网络出版日期: 2021-06-15

中国工程院-国家自然科学基金委咨询研究项目(编号: 2019-ZCQ-003)和国家重大科学仪器设备开发专项(编号: 2013YQ090943)资助

摘要 本文简略回顾现代时间从天文时到原子秒的变革历程. 简述铯冷原子喷泉频率基准复现现行秒定义的进展和现状, 国际原子时(TAI)和国际通用的协调世界时(UTC)产生过程, 以及国际上关于放宽对协调世界时和一类世界时UT1之差的趋势. 接着介绍原子喷泉频率基准常规驾驭TAI的现状, 国内外光学频率标准(简称光频标)研究的进展, 以及迄今6台光频标参与驾驭TAI. 依据国际正在讨论的未来修改秒定义路线图, 分析常规驾驭TAI对光频标的要求和对策. 在此基础上, 提出基础研究型 and 计量型两种光学频率标准研究定位, 并针对计量型光频标的性能指标提出建议. 提出对不确定度达到 3×10^{-17} 的计量型光频标频率评定要求, 不仅应计及相对论静态重力频率频移, 而且应考虑动态潮汐频移. 最后建议利用两台高稳定光频标, 跨越大经度距离实施频率比对, 实验测量直接验证相对论潮汐频移的方案.

关键词 计量, 单位与标准, 时间与频率, 钟与频标

PACS: 06.20.-f, 06.20.F-, 06.30.Ft, 95.55.Sh

1 引言

日出而作, 日落而息. 时间与人类生活生产密切相关, 也是国际单位制(Système International d'Unités, SI) 7个基本量中不稳定性、评定不确定度最小和最易于传递、应用最广的一个物理量.

1967年时间单位秒实现了量子化定义. 2018年国际计量大会(Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM)用基于常数的新理念重新表述了秒定义. 2020年国际时间频率咨询委员会(Consultative Committee for Time and Frequency, CCTF)提出了未来基于常数

修改秒定义的路线图.

当前已经发表了较多的综述回顾和讨论时间频率发展的文章, 如国外最新综述文章^[1,2], 以及国内比较早的文章^[3]. 本文试图少重复前人文章的内容, 只简略回顾依靠天文观测作为“自然基准”校准守时钟产生天文时; 通过“国际原子时合作”利用实验室型微波频率基准驾驭国际原子时(Temps Atomique International, TAI)的原理和发展现状; 提出基础研究型 and 计量型两种光学频率标准研究定位; 依据未来基于常数修改秒定义的要求, 建议计量型光频标在追求不确定度指标和持续驾驭国际原子时(运行可靠性)之间平衡取舍,

引用格式: 房芳, 张爱敏, 林弋戈, 等. 时间: 天文时-原子秒-基于常数重新定义秒. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 074208

Fang F, Zhang A M, Lin Y G, et al. Time: Astronomical time - atomic time - redefining second based on constant (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 074208, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0492](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0492)

并对研制计量型光频标应该满足的性能技术指标提出建议. 最后基于建设跨越地球大经度差的高精度频率比对链路, 提出通过光频标频率比对测量实验验证相对论潮汐频率偏移的方案.

2 天文时: 天文测量校准守时钟产生时间

人类从对天文现象的初始观测中, 认识到地球运动的周期性, 逐渐建立起时间的观念. 在现代时间概念发展历程中, 基于地球自转的时间体系称为世界时, 基于地球公转的时间体系为历书时, 两者统称天文时. 天文测量不能直接产生天文秒. 天文“时间基准”只产生基准时间周期, 如世界时产生“平太阳日”日长, 历书时使用1900年的“回归年”作为年长^[1]. 实际上, 天文时依赖守时钟(机械钟、石英钟、原子钟等)的连续运行和均匀细分产生并保持日、时、分、秒. 用现代时间概念描述的天文时, 即根据天文测量基准日长或基准年长, 进而校准守时钟产生时标.

3 原子秒: 铯原子频率基准复现原子秒

随着科学技术进步, 科学家认识到尽管地球具有巨大的质量, 但是它的自转和公转都不稳定. 地球转动不稳定, 直接导致世界时“基准日长”或历书时“基准年长”存在不可预测的变化.

到20世纪中期, 随着原子物理的发展和成形, 物理学家发现某些原子、分子的特定跃迁频率具有优异的稳定性(Stability)和复现性(Reproducibility), 非常适合作为时间频率基准^[4]. 1955年, 英国国家物理实验室(National Physical Laboratory, NPL)的Essen和Parry^[5]报道了第一台热铯原子束频率标准. 随即, 美国海军天文台(United States Naval Observatory, USNO)和NPL合作, 依据天文历书时标定了NPL铯频标的微波跃迁频率为9192631770 Hz, 相对准确度(相对误差=误差/名义值)为 2.2×10^{-9} ^[6].

原子频标问世就显示出明显的优越性能, 许多国家的计量院(National Metrology Institute, NMI)竞相

研制铯原子束频标, 产生标准频率.

原子频标诞生12年后, 1967年第13届国际计量大会(CGPM)通过了用原子秒取代天文秒的决议. 原子秒定义为铯-133原子基态两个超精细能级跃迁对应辐射的9192631770个周期持续的时间^[7]. 实验室型铯原子频标成为复现秒定义的频率基准(Primary Frequency Standard, PFS).

时间单位秒从天文测量转变到物理计量的过程, 可以总结为以下三个阶段:

- (1) 复现新定义的稳定性和复现性远优于原定义;
- (2) 用原定义的复现值对新定义溯源赋值;
- (3) 新定义取代原定义.

2018年第26届国际计量大会决议将SI七个基本量中的质量单位千克(kg)、电流单位安培(A)、温度单位开尔文(K)和物质的量单位摩尔(mol), 从基于实物的定义改为基于“定义常数(Defining Constant)”的新定义. 同时基于常数重新表述了时间单位秒(s)、长度单位米(m)和发光强度坎德拉(cd)三个基本量定义^[5]. 自1960年SI确立以来, 基于常数重新定义SI是国际计量届发生的最重要变革, 必将产生重要而深远的影响. 秒定义新表述首先定义铯频率(Cesium Frequency)常数 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$: 铯-133原子不受干扰的基态超精细跃迁频率为9192631770 Hz^[8,9]. 继而秒定义表述为: 当铯频率 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 以单位Hz(等于 s^{-1})表示时, 其固定数值定义为秒^[8].

基于常数定义几个基本量有许多优点, 如不随时间改变, 在任何地点都可以独立复现, 不必因技术进步而修改定义等^[5]. 但下文会涉及, 铯频率既不是物理常数, 更不是基本物理常数, 基于铯频率重新表述的秒定义并不具有上述的全部优越性.

国际计量委员会(Comité International des Poids et Mesures, CIPM)规定了秒定义的次级表示(Secondary Representations), 并陆续发布了微波频段的Rb原子, 光学频段的原子 ^{87}Sr , ^{88}Sr , Yb, Hg和离子 Hg^+ , Al^+ , Sr^+ , Yb^+ 的跃迁频率推荐值和复现不确定度^[9].

早在1954年美国Zacharias等人^[10]就提出了原子喷泉的设想, 20世纪80年代美国的Chu和Phyllips, 法国的

1) 时间, https://en.wikipedia.org/wiki/Time#%20History_of_time_measurement_devices/

2) 秒定义, <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies.html/>

3) 次级秒定义频率推荐值, <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies.html>

Tannoudji发明了用激光冷却和俘获原子的方法⁴⁾, 为实现原子喷泉奠定了基础. 1995年法国计量测试院(Laboratoire National de Métrologie et d'Essais-Système de Références Temps-Espace, LNE-SYRTE)的Clairon小组^[11]报道了新一代的激光冷却铯原子喷泉频率基准, 首次发表的频率评定不确定度就达到 3×10^{-15} . 目前世界最好的铯喷泉频率基准通过评定修正频率偏移后, 复现秒定义的不确定度达到 2×10^{-16} – 4×10^{-16} .

喷泉频率基准用冷原子取代热原子, 用激光操控冷原子团上抛-回落运动代替热原子束水平运动, 以可接受的原理-装置复杂性为代价, 获得了一系列优越性. 这里主要就喷泉频率基准用时分Ramsey方案(分离振荡场法)代替空间分立Ramsey方案, 减小腔相移频移加以说明. 图1表示热原子束频标中, 被加热的原子沿水平直线运动, 依次与两个微波场作用, 产生Ramsey干涉. 相比Rabi方案, Ramsey干涉压窄参考线宽 Δf , 改善量子鉴频能力⁵⁾. 但两个空间分立微波场相位不同会引入腔相位差频移, 典型的频移值可达 10^{-13} 数量级^[12,13], 以致当时德国物理技术院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)著名的铯束频率基准Cs2设计了如图2的双向原子源探测系统, 分别正反向运行以便差分评定腔相位差频移^[12,14]. 而喷泉钟原子在上抛和回落中两次与同一微波场作用, 如图3所示, 显著减小了腔相移频移及其评定不确定度^[15]. 喷泉钟从空间分立双腔到时分复用单腔, 是一项重要改进.

为什么频率基准复现秒定义要评定并修正系统频率偏移?

因为铯频率 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 只是一项“技术常数”(Technical Constants)^[8].

理论和实验均表明, 原子能级不可避免地受到干扰从而改变跃迁频率. 交变“噪声”干扰引入不稳定性, 不变的“直流”干扰产生系统频率偏移. 计量实验室在严格控制的实验条件下, 利用最先进的原理、技术和工艺研制稳定性和复现性最好的频率基准, 直接产生“物理频率”. 然后依照理论和实验, 逐项评定“直流干扰”(各项物理效应)引入的频率偏移值以达到尽可能小的不确定度, 修正物理频率, 从而在不确定度的近似

图1 (网络版彩图)原子束频率基准, 水平热原子束依次通过空间分立的两个Ramsey微波腔^[15], 插图所示的典型中心条纹半高线宽约为65 Hz. 图片来自文献, 已获得授权

Figure 1 (Color online) The atomic beam frequency standards, in which thermal atoms fly through two separated Ramsey microwave cavities successively [15]. The typical central fringe shown in the inset has a full linewidth at half maximum (FWHM) of about 65 Hz. The use of the figure from literature has been authorized.

范围内最佳复现“不受干扰”的铯频率 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, 评定-修正使得复现秒定义的不确定度改进了3–5个数量级.

1966年中国计量科学研究院(National Institute of Metrology of China, NIM) (简称中国计量院)研制成功NIM3磁选态铯原子束频率基准, 1981年改进后不确定度达到 10^{-13} 量级^[13]. 1997年NIM开始研制激光冷却铯原子喷泉频率基准. 2003年NIM4铯喷泉频率基准通过鉴定, 评定不确定度 8×10^{-15} ^[16]. 2010年完成NIM5铯喷泉频率基准, 不确定度为 1.5×10^{-15} ^[17], 2018年改进后重新评定的不确定度达到 9×10^{-16} . 上述评定结果都经相应国际比对加以验证. 目前NIM正在研制的NIM6铯喷泉, 2020年初步评定不确定度 5.8×10^{-16} .

另外, 中国科学院国家授时中心和中国科学院上海光学精密机械研究所(简称上海光机所)都在研制冷原子喷泉钟, 并取得良好进展.

4 国际原子时: 秒长基准驾驭原子时标

时间是一个流逝、不可逆转的量.

在天文时框架下, 天文基准校准守时钟产生时标.

4) Chu S, Cohen-Tannoudji C, Phillips W D. For development of methods to cool and trap atoms with laser light. The Nobel Prize in Physics, 1997. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1997/press-release/>

5) Ramsey N F. For the invention of the separated oscillatory fields method and its use in the hydrogen maser and other atomic clocks and the separated oscillatory fields method. The Nobel Prize in Physics, 1989. http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates

图 2 原子束频率基准的双向原子源探测系统^[14], 图片来自文献, 已获得授权

Figure 2 Bi-directional atomic source-detection system of atomic beam frequency standards [14]. The figure from literature has been authorized.

图 3 (网络版彩图)喷泉频率基准冷原子团在上升-回落的竖直抛物线运动过程中两次通过同一个Ramsey微波腔^[15], 插图所示的典型中心条纹半高线宽约为1 Hz, 图片来自文献, 已获得授权

Figure 3 (Color online) The schematic of an atomic fountain clock. The cold atoms interact with the same Ramsey microwave cavity twice during their ascending and descending movement [15]. The inset shows the central Ramsey fringe with an FWHM width of 1 Hz. The figure from literature has been authorized.

如果守时系统出现故障, 天文基准日或基准年仍可复现。基于守时原子钟的原子时标能不能长期可靠连续运行, 这是原子时诞生初期面对的一个严峻考验。幸运的是几乎在发明第一台原子频率基准的同时, 一些杰出的物理学家, 如美国的Cleppner, Ramsey等人, 就研制出磁选态铯束钟和主动氢钟(H-maser), 并迅速转化给工业界, 开发出高稳定、高可靠的商品守时钟。国际计量局(Bureau International des Poids et Mesures, BIPM)依靠多国守时实验室的多台商品守时钟产生国际原子时标。1985年, 实践圆满证明TAI长期连续可靠运行^[1,18,19]。1988年负责协调全世界天文时的国际时间

局(Bureau International de l'Heure, BIH)撤销, 标志着原子时最终取代天文时, 时间频率从天文学转入计量学^[18]。

现今, BIPM主导“国际原子时合作”产生国际通用的协调世界时(Coordinated Universal Time, UTC): 分布在世界各地的约80个守时实验室利用450–500台商品守时原子钟产生各自的本地时标^[1]。通过卫星比对, 这些实验室将守时钟数据报送BIPM, 加权平均得到自由原子时(Echelle Atomique Libre, EAL)。EAL是异地多台守时钟的平均结果, 不但稳定, 而且可靠。少数国家研制的喷泉频率基准复现秒定义, 驾驭修正EAL的长期漂移和系统偏差, 产生不仅稳定可靠, 而且准确国际原子时标。TAI不定期插入闰秒就是UTC。TAI和UTC的不稳定度为 $3.5 \times 10^{-16}/30$ d, 不确定度为 2×10^{-16} ^[1,19], 比天文时改进了7–8个数量级。UTC通过BIPM事后计算得到的一个纸面时间, UTC(k)是守时实验室 k 保持的UTC的本地物理复现。BIPM每30或35 d发布时间公报(Circular T)⁶⁾, 公布时间偏差UTC–UTC(k)及其不确定度等相关信息。

UTC基于复现铯原子谐振频率, 本质上是原子时。当UTC和基于地球自转的一类世界时UT1之差 $|\text{UTC}-\text{UT1}| > 0.9$ s, 位于巴黎的国际地球自转局发布公告, 全世界同步对UTC实施闰秒。随着近年卫星定位和数字技术发展, 不定期插入闰秒的负面影响愈发突出。实际上美国GPS、中国BDS和欧洲GALILEO卫星定位系统都采用不闰秒的连续时标。国际米制公约组织的时间频率咨询委员会正在研究放宽对 $|\text{UTC}-\text{UT1}| < 0.9$ s的限制, 比如, 扩大到远大于0.9 s^[20]。如此, 就可以在很长时间不闰秒, UTC也在实际上回归为连续时标。

地球以经度分为24个时区, 北京位于东八区, 中国政府规定用UTC+8:00:00作为中国法定时间。中国现有中国计量院(NIM)、北京卫星导航中心(BSNC)、中国科学院国家授时中心(NTSC)、北京无线电计量测试研究所(BIRM)、上海市计量测试技术研究院(SIMT)等多家实验室各自产生和保持时标, 其中NIM, NTSC和BIRM分别参加国际原子时合作。

国家市场监督管理总局作为中国国务院法定计量管理部门, 颁发证书授权NIM5铯喷泉频率基准作为中国秒长计量基准, NIM保持的协调世界时UTC(NIM)作

6) BIPM Circular T. <https://www.bipm.org/en/time-ftp/circular-t>

为中国原子时标计量基准.

UTC是高度国际合作的产物. 每一家守时实验室产生和保持的UTC(*k*)都是UTC的本地物理复现, 区别仅是各自的不确定度不同. 比如, UTC(NIM)+8:00:00是中国计量院在北京产生的北京时间, 德国PTB位于德国Braunschweig, UTC(PTB)+1:00:00为德国时间, 完全可以说UTC(PTB)+8:00:00是PTB在德国Braunschweig产生的北京时间.

目前, 最好的商品主动守时氢钟频率准确度 1×10^{-13} , 不稳定性 $< 3 \times 10^{-16}/\text{d}$ ^[7].

近年守时钟研制新进展有美国喷气推动实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)研制的 Hg^+ 线性离子阱微波钟, 2019年实现长寿命, 连续运行, 不稳定性为 $10^{-15}/\text{s}$, $10^{-16}/(1-10) \text{ d}$, 漂移 $\leq 10^{-17}/\text{d}$ ^[21]. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院(中科院武汉精测院)和清华大学正在分别研制 Hg^+ 和 Cd^+ 微波钟^[22,23].

5 计量型光频标: 应对未来修改秒定义

原子频标采用量子跃迁频率作为频率参考. 多种干扰因素都可能影响跃迁频率的不稳定度, 但是量子投影噪声设定了不稳定度的极限^[24], 其简化的Allan标准偏差表达式为

$$\sigma_y(\tau) = [2\pi \cdot f_0 \cdot (N \cdot T_m \cdot \tau)^{1/2}]^{-1}, \quad (1)$$

式中, τ 表示采样时间, f_0 表示中心频率, N 表示探测粒子数, T_m 表示单次测量时间.

上式表明量子投影噪声相对不稳定性与名义频率 f_0 成反比. 光学频率比微波高5个数量级, 在其他因素相当的条件下, 光频标比微波频标有5个数量级的不稳定性提高潜力. 目前, 美国标准技术院(National Institute of Standards and Technology, NIST)研制的铝离子光频标和镱原子光晶格光频标(NIST-Yb1)的评定不稳定性分别高达 9.4×10^{-19} 和 1.4×10^{-18} ^[25,26].

光频标研究可以有两种不同的目标定位. 第一种定位基础科学研究和应用, 称为基础研究型光频标. 20年来基础型光频标研究者提出并实现了一系列新原理、新技术, 如提出Sr原子光频标、Al离子光频标研究方案, 发明发现离子协同冷却、离子态的量子逻辑

探测、光晶格囚禁原子、光晶格魔术波长、超稳光学腔、超稳激光、低温制冷原子室和热屏蔽腔抑制黑体辐射频移等. 基础型光频标的研究已经在冷原子物理领域占据一席之地. 基础型光频标还屡屡刷新测量相对不确定度的世界纪录, 这本身就是前沿基础研究的重要成果.

基于基础光频标提出了多项基础研究应用的建议, 如验证相对论、检验物理常数变化、以厘米量级不确定度测量水准高差、探测引力波、发现暗物质等. 这里仅举一个例子, 2010年美国NIST的Wineland小组^[27]比较两台 Al^+ 光频标的频率, 然后将其中一台垂直升高30 cm, 发现频率改变了 $(4.1 \pm 1.6) \times 10^{-17}$. 这个实验在地面实验室环境验证了Einstein广义相对论预言的重力频率偏移. 2020年日本东京大学的Katori小组^[28]利用铯原子光频标在东京电视塔450 m垂直距离以更高的精度重复了上述实验.

在可预见的未来, 基础型光频标, 无论作为基础研究本身, 还是基础研究应用, 都大有可为. 值得注意的是, 很多基础研究应用只利用频率不稳定性, 换言之, 不需要绝对频率、不需要评定和修正频移.

光频标的第二种定位是作为计量型光频标. 微波频率基准的目标是复现现行秒定义, 计量型光频标的目标是复现现行次级秒定义和新一代秒定义. 与微波频率基准一样, 计量型光频标要求以尽可能好的不确定度评定干扰引入的频率偏移, 而且随着评定不确定度的改进, 原来忽略的效应, 现在也要计入评定.

很多文章提到, 光频标的不确定度已经比最好的铯喷泉频率基准好100倍. 实际上, 时间频率是一个体系, 在光频标-光学/微波转换(飞秒光梳)-微波频率基准-长距离时间频率比对-频差和时差测量-时标(守时钟)-时间频率应用的链条中, 光频标的不确定度比最好的微波频率基准和最高端的时间频率应用要求的不确定度, 比最好的长距离比对和最好的守时钟的稳定度都要好100倍以上. 从基本原理研究出发, 进一步改进光频标性能指标, 实现长距离高精度时间频率比对, 提高守时钟和时标的指标, 是未来修改秒定义面临的挑战.

Einstein的广义相对论预言重力势引入频率偏移, 包括重力频移和潮汐频移. 相对论频移是普适效应, 任

7) VCH1003M, <https://www.vremya-ch.com/english/product/index8389.html?Razdel=9&Id=44>

何频率源(不论微波频标, 还是光学频标), 都受相对论频移影响.

在地球水准面附近, 重力相对频移:

$$\Delta\nu/\nu \approx 1.09 \times 10^{-16} \times \Delta h, \quad (2)$$

式中, Δh (m)表示水准高差.

水准高度测量属大地测量学. 利用经典水准技术测量两个位置点的相对水准高差, 不确定度可达毫米量级. 经典水准等势面以平均海平面作为绝对水准标准, 其不确定度达数十厘米^[29-31]. 2018年26届CGPM将国际原子时定义为重力势 $W_0=62636856.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 的等势面(即水准面, Geoid)的时标^[32]. 2018年, 随着卫星水准测量理论模型和实践的发展, 卫星绝对水准高度测量不确定度达到 1.8 cm ^[33]. 然而德国PTB的PTB-CsF2铯喷泉频率基准评定重力频移从基于经典水准标准点转换到基于卫星模型的 W_0 时, 频率评定修正值改变了 2.2×10^{-17} , 相当于水准高改变 20 cm ⁸⁾.

微波频率基准都在频移评定中实施了本地重力频移修正^[29,30], 并将重力频移修正不确定度计入总不确定度. 2018年美国NIST的Ludlow小组^[26]将重力频移列入了NIST-Yb铯原子光频标评定. NIST-Colorado分部处于高原, NIST-Yb重力频移评定修正值高达 $180819 \times 10^{-18} \pm 1.8 \times 10^{-13}$. 计及重力频移, NIST-Yb的总评定不确定度从 1.4×10^{-18} 扩大到 6×10^{-18} ^[26].

据不完全统计, 中国有中国计量院、中科院武汉精测院、华东师范大学(华东师大)、中国科学院国家授时中心、上海光机所、华中科技大学、国防科技大学和中国科学技术大学8家单位正在研制7种14台光频标(Sr, Yb, Hg和 Hg^+ , Ca^+ , Al^+ , Yb^+). 其中已经发表评定结果文章的有: 中科院武汉精测院的 Ca^+ 光频标, 2015和2017年其频率值两次被接受参加 Ca^+ 频率的国际推荐值计算, 2018年评定不确定度 5×10^{-17} ^[34], 2020年评定不确定度 1.3×10^{-17} ; 中国计量院的镱光晶格光频标, 2015年评定不确定度 2.3×10^{-16} ^[35], 同年, 频率值参加国际推荐值计算, 2021年评定不确定度 2.9×10^{-17} ^[36]; 华东师大的Yb光晶格钟, 2020年评定不确定度 1.7×10^{-16} ^[37].

2020年时间频率咨询委员会(CCTF)第22届会议提出未来基于“常数”修改秒定义的路线图^[20].

复现秒定义是频率基准的天然使命, 驾驭TAI, 校

正其长期漂移和系统偏差是频率基准的首要应用. 微波频率基准如是, 计量型光频标也如是. 第22届CCTF提出光频标驾驭TAI的要求, 在至少一年时间里, 最少5台独立的光频标每个月有3台驾驭TAI^[20].

迄今, 全世界有10个国家的15台微波频率基准授权驾驭TAI. 图4(a)显示2006年以来, 德国、法国、意大利、俄罗斯、中国5国计量院的7台频率基准持续驾驭TAI的比对数据; 图4(b)显示10国15台喷泉驾驭TAI的有效时间⁶⁾. 图4(a)表明, 各国微波频率基准独立复现秒定义的分散性约 3.3×10^{-16} , 证明其各评定不确定度可信且达到很高水平. 随着微波频率基准“高覆盖”常规驾驭TAI如图4(b)所示, 目前TAI的不确定度达到 $2 \times 10^{-16} \sim 4 \times 10^{-16}$ ^[1,20].

2016年起, 法国计量院LNE-SYRTE的Sr原子光频标SYRTE-Sr2和SrB^[38], 日本信息通讯技术院(National Institute of Information and Communications Technology, NICT)的Sr原子光频标NICT-Sr1^[39], 美国NIST的Yb原子光频标NIST-Yb1^[26], 意大利计量院(Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, INRIM)的Yb原子光频标IT-Yb1^[40]和日本计量院(National Metrology Institute of Japan, NMIJ)的Yb原子光频标NMIJ-Yb1^[41]先后获准参与驾驭TAI. 图5显示国际计量局时间公报给出的上述6台光频标频率与UTC之差⁶⁾, 图中同时给出德国PTB铯喷泉微波频率基准PTB-FCs2的数据作为参考.

表1给出上述6台光频标的性能指标和与UTC比对数据.

运行率(Up Time)有限的光频标与不稳定性有限的守时钟比对死程(Dead Time)不确定度, 导致驾驭不确定度(表1中驾驭 u). 从表1可以看出, 面对 $3.6 \times 10^{-16} \sim 12 \times 10^{-16}$ 量级的受限短板, 总评定不确定度 5×10^{-17} 或是 1.4×10^{-18} 的光频标驾驭TAI的结果几乎没有差别.

对应修改秒定义常规驾驭TAI的要求, 计量型光频标性能指标应该是三项:

- (1) 含相对论频移的评定不确定度, 比如优于 5×10^{-17} ;
- (2) 运行率应优于某一个指标, 如优于50%/d/15 d;
- (3) 常规驾驭TAI, 如不少于7次/年.

针对上述要求, 计量型光频标面临在不确定度和运行可靠性(常规驾驭TAI能力)之间平衡取舍, 建议从

8) S. Weyers, private email communication on April 15, 2020

图 4 (网络版彩图) (a) 自2016年1月以来, 常规驾驭国际原子时的5国喷泉频率基准与TAI的比对数据^[6], 红色正方形是中国NIM5, 橙色圆形和黄色向上三角形是德国PTB-FCsF1和PTB-CsF2, 绿色菱形是意大利IT-CsF2, 紫色向右三角形和粉色五角星是法国SYRTE-FO2和SYRTE-FORb, 蓝色五边形是俄罗斯SU-CsFO2; (b) 10国15台喷泉频率基准驾驭TAI的有效时间

Figure 4 (Color online) (a) The comparison of fountain primary frequency standards from 5 countries, which regularly steer the international atomic time (TAI) since January 2016, with TAI^[6]. The red squares represent the China fountain clock NIM5, the orange circles and yellow upward triangles the Germany fountain clocks PTB-CsF1 and PTB-CsF2, the green diamond the Italian fountain clocks IT-CsF2, the purple triangles to the right and pink pentagrams the French fountain clocks SYRTE-FO2 and SYRTE-FORb, and the blue pentagons represent the Russian fountain clock SU-CsFO2; (b) up-times when 15 fountain primary frequency standards from 10 countries steer the TAI. (b) Effective Time for NMIs' PFSs steering TAI.

总体设计就要考虑.

(1) 选择适合的原子/离子种类, 研究适宜的工作原理.

(2) 优化方案技术和设计结构, 比如驾驭TAI终究要求光频标长时间可靠运行, 使用10 cm超稳腔实现超稳激光即可满足要求; 比如不考虑低温制冷原子/离子室, 利用测温建模以优于 4×10^{-17} 不确定度评定黑体辐射频移等.

(3) 在激光-光学-光纤-微波的电子或机械锁定实现失锁-自动上锁功能; 针对可靠性薄弱环节配置冗余和自动切换, 自动报警, 实现无人值守(如15 d)连续运行.

(4) 实现不确定度优于20 cm的绝对水准高测量, 相应重力频移评定不确定度 2.2×10^{-17} .

6 相对论潮汐频移和实验验证潮汐频移的建议

天体, 主要是月亮和太阳, 在地球表面的引力势对钟频产生相对论潮汐频率偏移. 计算表明, 除了南北极附近的高纬度地区, 地球大部分表面的潮汐频移呈现月调制的天周期曲线, 最大峰-峰值约 6×10^{-17} – 7×10^{-17} ^[42], 如图6(a)所示. 中国计量院位于北京, 法国LNE-SYRTE位于巴黎, 北京-巴黎之间经度差114.23°, 纬度差48.84°, 如图6(b)所示.

图 5 (网络版彩图)参与驾驭国际原子时的6台光学频率标准与TAI的比对数据⁶⁾, 红色圆形和圆是法国铯原子光频标SYRTE-Sr2和SYRTE-SrB, 绿色三角形是美国铯原子光频标NIST-Yb1, 紫色菱形为日本铯原子光频标NICT-Sr1, 蓝色正方为意大利铯原子光频标IT-Yb1, 粉红色五角星为日本铯原子光频标NMIJ-Yb1. 图中同时给出德国计量院PTB铯喷泉微波频率基准PTB-CsF2(灰色短线)的数据作为参考

Figure 5 (Color online) The comparison of 6 optical frequency standards that participating in steering the TAI with the UTC⁶⁾. The red solid and hollow circles represent the French strontium atom optical frequency standard SYRTE-Sr2 and the SYRTE-SrB, the green triangles represent the American ytterbium atom optical frequency standard NIST-Yb1, the purple diamonds represent the Japanese strontium atom optical frequency standard NICT-Sr1, the blue squares represent the Italian ytterbium atom optical frequency standard IT-Yb1 and the pink pentagram the Japanese optical frequency standard of NMIJ-Yb1. The data of the PTB Cesium fountain microwave frequency standard PTB-CsF2 are also given as reference represented by gray short vertical lines.

表 1 参与驾驭国际原子时的光学频率标准性能指标和与国际原子时比对数据^{a)}

Table 1 The performance comparison of optical frequency standards that participating in steering TAI with the TAI^{a)}

实验室	光频标/ (申报时间: 年-月)	评定 u/u_{BR} ($\times 10^{-17}$)	运行率 (%/d)	次级定义 u ($\times 10^{-17}$)	驾驭 $u^{(4)}$ ($\times 10^{-17}$)/次	频差 $a^{(4)}$ ($\times 10^{-17}$)	参考文献
法国SYRTE	Sr2/(14-10-16-6)	4.0/1.0	(66-94)/55	50	(36-63)/4	(-139)-(81)	[38]
	SrB/(16-6)	4.8/1.0	74/15	50	46/1	-122.0	
日本NICT	Sr1/(16-4-18-2)	7.0/2.2	(2.0-2.7)/210	40	(37-42)/6	(-92)-(-13)	[39]
美国NIST	Yb1/(17-11-18-6)	0.14/0.6	(1.6-7.9)/240	21(50)	(34-55)/8	(-43)-(77)	[26]
意大利IT	Yb1/(18-10-19-2)	2.8/0.3	(4-23)/150	26(50)	(40-92)/5	(-14)-(7.5)	[40]
日本NMIJ	Yb1/(19-9-20-3)	36.3/6	80.3/185	50	(70-120)/8	(-9)-(116)	[41]

a) u_B 为B类不确定度; u_{BR} 为相对论频移评定不确定度, u 代表总不确定度.

图6(b)显示北京-巴黎潮汐频移差峰-峰计算值高达 1.1×10^{-16} [42].

当频标计及相对论频移的评定不确定度优于 3×10^{-17} , 且运行率小于60%-80%/d, 可以多天测量取平均消除潮汐频移, 或是评定当时当地的潮汐频移加以修正.

迄今未见实验验证相对论潮汐频移的报道. 如果用两个光频标频率比对实验测量潮汐频移, 要求: (1) 跨越足够大经度距离的两个实验室, 如北京和巴黎, 两地间潮汐频移差峰-峰值高达 1.1×10^{-16} ; (2) 建设连接两实验室的长距离高稳定的卫星或光纤比对链路; (3) 在采样周期小于2.4 h (远小于潮汐的天周期), 分处

图 6 (网络版彩图) (a) 2016 年 12 月中国北京中国计量院(NIM, 点划线)和法国巴黎法国计量院(SYRTE, 红线)典型的计算相对论潮汐频率偏移; (b) NIM 和 SYRTE 计算相对论潮汐频率偏移差^[42]. 图片来自文献, 已获得授权

Figure 6 (Color online) (a) The computed tidal relativistic tidal frequency shifts at NIM (Beijing) and SYRTE (Paris) in December, 2016; (b) the difference of the tidal relativistic tidal shift between NIM and SYRTE [42]. The figure from literature has been authorized.

两实验室的两台光频标频率比对的合成不稳定性(加上比对链路的不确定度)优于某一数值, 比如 $2 \times 10^{-17}/$

(2.4 h), 以便在时间和频率差二维测量分辨, 如图 6(b) 的潮汐频移差周期曲线. 期待不远的未来, 建设跨越大经度距离高精度卫星或光纤链路, 利用光频标频率比实现对实验验证相对论潮汐频移.

7 讨论

目前中国秒长计量基准——中国计量院 NIM5 铯原子喷泉基准与法国、德国、俄罗斯、意大利等国家的基准频标一起驾驭国际原子时(TAI).

据不完全统计, 中国有 8 家单位正在研制 7 种 14 台光学频率标准. 应对未来基于常数修改秒定义, 定位计量型的光学频率标准最重要的挑战是否能以足够好的不确定度常规驾驭国际原子时标.

目前光频标的评定不确定度比最好的微波频率基准不确定度、比最好的守时钟(时标)和长距离时间频率比对不稳定性都要好 100 倍. 研制不稳定性优于 $5 \times 10^{-17}/\text{d}$ 的光频守时钟和新型微波守时钟, 研究不稳定性为 10^{-18} 量级的长距离时频比对技术是对未来修改秒定义的实质贡献.

致谢 感谢《中国科学: 物理学 力学 天文学》和中国科学院物理研究所刘伍明研究员的约稿, 我们于 2020 年疫情期间撰写这篇文章. 本文介绍的内容涉及国内外许多研究组的成果, 感谢他们的工作和对本文撰写的支持. 特别感谢中国计量科学研究院左娅妮博士不辞辛苦帮助整理文稿、参考文献、插图和表格.

参考文献

- 1 Panfilo G, Arias F. The coordinated universal time (UTC). *Metrologia*, 2019, 56: 042001
- 2 Bize S. The unit of time: Present and future directions. *C R Phys*, 2019, 20: 153–168, arXiv: 1910.12118
- 3 Li T C. From length unit (meter) to time unit (second) at NIM: Stabilized lasers-optical comb-cesium fountain clock-optical clock (in Chinese). *Acta Metrol Sin*, 2006, 27: 1–6 [李天初. 从长度单位米到时间单位秒: 稳频激光-飞秒光梳-铯原子喷泉钟-光钟. *计量学报*, 2006, 27: 1–6]
- 4 Lyons H. Spectral lines as frequency standards. *Ann New York Acad Sci*, 1952, 55: 831–871
- 5 Essen L, Parry J V L. An atomic standard of frequency and time interval: A Cesium resonator. *Nature*, 1955, 176: 280–282
- 6 Markowitz W, Hall R G, Essen L, et al. Frequency of cesium in terms of ephemeris time. *Phys Rev Lett*, 1958, 1: 105–107
- 7 Terrien J. News from the international bureau of weights and measures. *Metrologia*, 1968, 4: 41–45
- 8 Bureau International des Poids et Mesures. On the Revision of the International System of Units (SI). In: The General Conference on Weights and Measures (CGPM) 26th Meeting. Versailles, 2018
- 9 Riehle F, Gill P, Arias F, et al. The CIPM list of recommended frequency standard values: Guidelines and procedures. *Metrologia*, 2018, 55: 188–200
- 10 Zacharias J R, Yates J G, Haun R D. An atomic frequency standard. In: Proceedings of the Institute of Radio Engineers. New York: Institute of Radio Engineers, 1955. 364
- 11 Clairon A, Laurent P, Santarelli G, et al. A cesium fountain frequency standard: Preliminary results. *IEEE Trans Instrum Meas*, 1995, 44: 128–131

- 12 Bauch A, Fischer B, Heindorff T, et al. Performance of the PTB reconstructed primary clock CS1 and an estimate of its current uncertainty. *Metrologia*, 1998, 35: 829–845
- 13 Li M S. NIM-Cs Research Report. Technical Report. Beijing: National Institute of Metrology of China, 1993 [李明寿. NIM-Cs研制报告. 技术报告. 北京: 中国计量科学研究院, 1993]
- 14 Bauch A. The PTB primary clocks CS1 and CS2. *Metrologia*, 2005, 42: S43–S54
- 15 Sullivan D B, Bergquist J C, Bollinger J J, et al. Primary atomic frequency standards at NIST. *J Res Natl Inst Stand Technol*, 2001, 106: 47
- 16 Li T, Lin P, Li M, et al. The transportable cesium fountain clock NIM5: Its construction and performance. In: Maleki L, ed. *Frequency Standards and Metrology (Proceedings of the 7th Symposium)*. Singapore: World Scientific, 2009. 314–320
- 17 Fang F, Li M, Lin P, et al. NIM5 Cs fountain clock and its evaluation. *Metrologia*, 2015, 52: 454–468
- 18 Bureau International des Poids et Mesures. The International System of Units (SI). Appendix 2 of the SI Brochure. 8th ed. Paris: Bureau International des Poids et Mesures, 2006, <http://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>
- 19 Petit G, Arias F, Panfilo G. International atomic time: Status and future challenges. *C R Phys*, 2015, 16: 480–488
- 20 CCTF R. Report of the 22nd Meeting of the Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF). Technical Report. Paris: BIPM, 2020, https://www.bipm.org/en/committees/cc/cctf/22-_1-2020
- 21 Yi L. Report from JPL Frequency Standards Test Laboratory, ION-GNSS+ (Miami, Florida) 2019 CGSIC Timing Subcommittee. <https://www.gps.gov/cgsic/meetings/2019/yi.pdf>
- 22 Liu H, Chen Y, Yan B, et al. Progress towards a miniaturized mercury ion clock for space application. In: *China Satellite Navigation Conference*. Singapore: Springer, 2020. 557–561
- 23 Miao K, Zhang J W, Sun X L, et al. High accuracy measurement of the ground-state hyperfine splitting in a $^{113}\text{Cd}^+$ microwave clock. *Opt Lett*, 2015, 40: 4249–4252
- 24 Itano W M, Bergquist J C, Bollinger J J, et al. Quantum projection noise: Population fluctuations in two-level systems. *Phys Rev A*, 1993, 47: 3554–3570
- 25 Brewer S M, Chen J S, Hankin A M, et al. $^{27}\text{Al}^+$ quantum-logic clock with a systematic uncertainty below 10^{-18} . *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 033201, arXiv: [1902.07694](https://arxiv.org/abs/1902.07694)
- 26 McGrew W F, Zhang X, Fasano R J, et al. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level. *Nature*, 2018, 564: 87–90
- 27 Chou C W, Hume D B, Rosenband T, et al. Optical clocks and relativity. *Science*, 2010, 329: 1630–1633
- 28 Takamoto M, Ushijima I, Ohmae N, et al. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks. *Nat Photon*, 2020, 14: 411–415
- 29 Parker T, Hetzel P, Jefferts S, et al. First comparison of remote cesium fountains. In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition (Cat. No. 01CH37218)*. Seattle: IEEE, 2001. 63–68
- 30 Weiss M A, Ashby N. Relativistic red shift with 1×10^{-16} uncertainty at the NIST, Boulder. *Metrologia*, 2000, 37: 715–717
- 31 Kleppner D. Time too good to be true. *Phys Today*, 2006, 59(3): 10
- 32 Resolution B: On the definition of time scales. In: *the General Conference on Weights and Measures (26th Meeting)*. Versailles: BIPM, 2018
- 33 Denker H, Timmen L, Voigt C, et al. Geodetic methods to determine the relativistic redshift at the level of 10^{-18} in the context of international timescales: A review and practical results. *J Geod*, 2018, 92: 487–516
- 34 Huang Y, Guan H, Bian W, et al. A comparison of two $^{40}\text{Ca}^+$ single-ion optical frequency standards at the 5×10^{-17} level and an evaluation of systematic shifts. *Appl Phys B*, 2017, 123: 166
- 35 Lin Y G, Wang Q, Li Y, et al. First evaluation and frequency measurement of the strontium optical lattice clock at NIM. *Chin Phys Lett*, 2015, 32: 090601
- 36 Lin Y, Wang Q, Meng F, et al. A ^{87}Sr optical lattice clock with 2.9×10^{-17} uncertainty and its absolute frequency measurement. *Metrologia*, 2021, 58: 035010
- 37 Gao Q, Zhou M, Han C, et al. Systematic evaluation of a ^{171}Yb optical clock by synchronous comparison between two lattice systems. *Sci Rep*, 2018, 8: 8022
- 38 Lodewyck J, Bilicki S, Bookjans E, et al. Optical to microwave clock frequency ratios with a nearly continuous strontium optical lattice clock. *Metrologia*, 2016, 53: 1123–1130, arXiv: [1605.03878](https://arxiv.org/abs/1605.03878)
- 39 Hachisu H, Petit G, Nakagawa F, et al. SI-traceable measurement of an optical frequency at the low 10^{-16} level without a local primary standard. *Opt Express*, 2017, 25: 8511–8523, arXiv: [1704.00893](https://arxiv.org/abs/1704.00893)

- 40 Pizzocaro M, Bregolin F, Barbieri P, et al. Absolute frequency measurement of the $^1S_0-^3P_0$ transition of ^{171}Yb with a link to international atomic time. *Metrologia*, 2020, 57: 035007
- 41 Kobayashi T, Akamatsu D, Hisai Y, et al. Uncertainty evaluation of an ^{171}Yb optical lattice clock at NMIJ. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr*, 2018, 65: 2449–2458
- 42 Zhuang W, Fang F, Wang S K, et al. Computed tidal relativistic red-shifts of frequency standards on Earth and in space stations. *Chin Phys Lett*, 2017, 34: 110601

Time: Astronomical time - atomic time - redefining second based on constant

FANG Fang, ZHANG AiMin, LIN YiGe & LI TianChu^{*}

National Institute of Metrology of China, Beijing 100029, China

The evolution history of modern time from the astronomical time to the atomic second is briefly reviewed herein. The progress and status of realizing the current definition of the second using cesium cold atomic fountain primary frequency standards, the process of generating the international atomic time (TAI) and coordinated universal time (UTC), and trend of releasing the tolerance on inserting leap-seconds into the UTC are sketched. The present situation on steering the TAI regularly from January 2016 by cesium fountain frequency standards from five countries is reported. Research progress of local and global optical frequency standards is summarized, and steering TAI by six optical frequency standards starting from 2016 is reported. Requirements and responses on steering TAI regularly by optical frequency standards are introduced according to the roadmap, which is under discussion internationally, or the future redefinition of the second. Furthermore, two types of optical frequency standards, namely the basic-research and the metrological type are suggested, and the performance and technical qualifications for the metrological type of optical frequency standards are recommended. For the optical frequency standards of the metrological type, with uncertainties better than 3×10^{-17} , not only static relative gravity but also the alternative tide frequency shifts should be considered in their frequency evaluations. Finally, a scheme employing frequency comparison, across a long longitude-distance, between two highly stable optical frequency standards to demonstrate the relativistic tidal frequency shift directly and experimentally is proposed.

metrology, units and standards, time and frequency, clocks and frequency standards

PACS: 06.20.-f, 06.20.F-, 06.30.Ft, 95.55.Sh

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0492](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0492)