doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.03.002

时间基准的现在和未来

蔡志武[1],袁海波[2],张升康[3]

(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;
3. 北京无线电计量测试研究所,北京 100854)

摘　要:介绍了时间基准、时间系统的基本内涵及常用类型,阐述了当前时间基准的理论定义、计量定义、物理实现。分析评估了时间基准未来可能的发展变化,特别是对光钟的影响、秒定义的变化、闰秒的变化等进行了详细分析。考虑到我国实际情况,从基础研究、技术试验和体系应用的角度给出了关于时间基准的一些思考和建议。

关键词:时间基准;协调世界时;秒定义;光钟;闰秒

中图分类号:P127.1　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:2095-8110(2023)03-0021-08

Present and future of time standard

CAI Zhiwu[1], YUAN Haibo[2], ZHANG Shengkang[3]

(1. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China;
2. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. Beijing Institute of Radio Metrology and Measurement, Beijing 100854, China)

Abstract: This paper introduces the basic connotation and common types of time standard and time systems, and expounds the theoretical definition, metrological definition, and physical implementation of the current time standard. It analyzes and evaluates the possible development and changes of time standard in the future, especially the impact of optical clocks, changes in second definitions, and changes in leap seconds. Considering the actual situation in China, some thoughts and suggestions on time standard are put forward from the perspectives of basic research, technical experiments, and system applications.

Key words: Primary time standard; Coordinated universal time; Definition of second; Optical clock; Leap second

1　时间基准的现状

1.1　理论定义

时间基准通常指的是在国际、国家、地区或某个领域被公众所认可的或法律所规定的作为源头的具有最高地位的参考时间,其他的各类时间都需要溯源至时间基准或与时间基准保持一致。通常情况下,时间基准也具有最高的性能,并通过高精度的量值传递体系向下分发。例如,协调世界时(temps universel coordonné/coordinated universal time, UTC)是当今世界生产生活等日常活动的时间基准,在国际上它被广泛认可,同时还具有法定效力和最高的综合性能。

时间基准一般需要通过具体的时间系统来代表,时间系统通常需要对时间的产生方式、表达形式、物理实现等进行具体明确的规范。从存在形式来看,有些时间系统主要以理论形态存在,有些主

收稿日期:2023-04-19;**修订日期**:2023-05-10

作者简介:蔡志武(1978-),男,博士,高级工程师,主要从事卫星导航和时间频率方面的研究。

要以物理形态存在。

时间系统的定义包含时间单位长度、时间起点、时间的计量方式等内容，其中时间单位长度的定义具有重要的意义，直接决定了时间系统的准确性和稳定性等关键性能。现代科学中，通常采用秒作为时间的基本单位。如何定义秒，是一个涉及面很广的问题。从现代科学的角度上看，要定义秒，首先需要深刻地认识什么是时间。

时间是科学时空观的一部分，在牛顿理论体系下的时空观中，时间是用于描述物质运动的顺序性、持续性的参数，时间是绝对的、平直的，与物质的运动状态无关、与所处的空间位置无关；在爱因斯坦相对论体系下的时空观中，时间与物质的运动速度相关，与所处的空间位置是相关的，与空间的质量分布和引力场大小是相关的。

当前，相对论时空观是认识和定义时间和空间的理论基础。对于地球或近地空间而言，需要重点关注的时间系统主要有地心坐标时（temps-coordonnée géocentrique/geocentric coordinate time，TCG）、地球时（terrestrial time，TT）、国际原子时（temps atomique international/international atomic time，TAI）、UTC、世界时（universal time，UT）、极移修正后的世界时 UT1 等[1]。其中，TCG、TT 是在相对论基础上定义的主要以理论形态存在的时间系统，TAI 是基于原子钟建立的原子时系统，UT1 是基于地球自转建立的天文时间系统，UTC 是综合 TAI 和 UT1 基础上形成的协调时。为什么要建立这么多的时标，这些时标之间的联系与区别又是什么呢？这里给出作者的几点初步认识和观点。

1）为什么需要 TCG 和 TT。相对论时空观对时间的属性有一个理论的规范和要求，揭示了时间与物质运动和空间位置的相关性，但相对论本身并没有给出一个具体的、统一的、方便使用的时间系统的具体定义，这样不方便开展科学研究和理论分析，为此，科学家们在相对论框架下建立和定义了 TCG 和 TT，用于支撑天文、物理、航天等各类科学研究和探索活动。TCG 和 TT 可以认为是符合相对论理论体系、又比较好地适应近地空间的各类物质运动的、从理论上具有明确定义的时间尺度。

2）为什么需要 TAI。TCG 和 TT 虽然已经完成了近地空间的时间的理论定义，但没有提供一个物理层面的具体实现，而在人类日常的科研、生产等活动当中往往又需要一个物理的、可见的、可用的时间系统，这样方便协调和统一各类活动。为此，20 世纪 60 年代末，国际计量局（Bureau International des Poids et Measures/National Metrology Institutes，BIPM）以原子跃迁为基础建立了国际原子时 TAI，这样就形成了一个具有物理实现的时间系统，方便世界各国在物理上统一时间。TAI 与 TT 的关系又是什么呢？TAI 可以认为是物理时间尺度的代表，TT 可以认为是理论时间尺度的代表，考虑到时间体系的客观性和自洽性，可以认为 TAI 就是 TT 的一种高精度的物理实现，未来可能还会存在关于 TT 的其他形式的物理实现。

3）为什么需要 UTC 和 UT1。在原子时系统出现以前，科学上主要是依靠地球自转运动观测来定义时间，称之为世界时（UT），世界时包含 UT0、UT1 等类型，其中 UT1 在 UT0 基础上扣除了地球极移影响，是原子时出现以前应用较多的时间系统。在原子时系统出现以后，原子时系统就成为当时物理实现水平最高的时间系统，此时，一部分科学家们认为时间系统应该建立在更高精度的原子时系统上，也有一部分科学家们认为地球上的时间系统不应与地球自转脱离联系，而且 UT1 在天文、航天等领域应用广泛，为此，形成了一套折中的方案，即结合 TAI 的秒长和 UT1 的时刻的优势，建立了协调世界时 UTC，并沿用至今。

由此可见，多个时间系统是在历史发展的过程中形成的，不同的时间系统有不同的产生根源，也有不同的作用，有些是长期有效的，有些则逐步退出或淡化出历史舞台。在不同的历史时期或不同的研究领域，可采用不同的时间系统。

1.2 时间单位的计量定义

时间是一个基本物理量，是当前国际单位制 7 个基本量之一，如图 1 所示。时间是目前可测量精度最高的物理量，在物理学、计量学、测量学等领域具有重要地位，其他多个物理量可通过时间测量来提升其测量精度；时间的研究主要由国际计量组织实施，时间定义修改主要由国际电信联盟负责。

当前，在计量学上，以铯原子跃迁频率来定义秒长。1967 年第 13 届国际计量大会（Conférence Générale des Poids et Mesures/General Conference of Weights and Measures，CGPM）确定了以铯原子辐射为基础的秒长定义，即：在海平面、零磁场下铯^{133}原子基态的两个超精细能级间跃迁辐射 9192631770 周所持续的时间为原子秒，并把它规定为国际单位制时间单位。

图 1　国际单位制系统

Fig. 1　International system of units

根据 2018 年 11 月 16 日第 26 届国际计量大会包括中国在内 53 个成员国的集体表决，全票通过关于“修订国际单位制（système international d'unités/international system of units，SI）”的 1 号决议，自 2019 年 5 月 20 日起，国际单位制的时间单位秒将采用表 1 中的定义[2]。

在该次会议中，时间单位“秒”的定义保持不变，但是定义的表达方式有一定的改变，以与修订后的其他基本单位的新定义表达方式保持一致。国际单位制的修订将使所有的基本单位都建立在自然界的基本自然常数上，由这些自然常数组成的通用的测量基础，将使人类社会拥有一个更加可靠、一致、大范围的测量体系。

表 1　国际单位制（SI）的时间单位秒的定义

Tab. 1　Definition of the unit of time second in the international system of units（SI）

SI 基本单位	新修订中文定义	国际公布英文定义
秒 second	国际单位制中的时间单位，符号 s。当铯频率 $\Delta\nu_{Cs}$，即铯 133 原子不受干扰的基态超精细跃迁频率，以单位 Hz 即 s^{-1} 表示时，取其固定数值为 9 192 631 770 来定义秒。	The second, symbol s, is the SI unit of time. It is defined by taking the fixed numerical value of the caesium frequency $\Delta\nu_{Cs}$ the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to s^{-1}

1.3　物理实现

这里重点阐述 TAI 和 UTC 的物理实现过程。

（1）国际原子时的物理实现方式

为保持全世界时间尺度的统一，BIPM 联合数十个国家和地区的时频实验室来共同建立统一的国际原子时，即 TAI。目前，全世界约有 80 多个守时实验室、400 多台原子钟、10 多台频率基准装置参与 TAI 的时间比对和综合原子时计算[3]。这些实验室主要通过卫星双向、卫星共视、卫星全视、精密单点定位等时间比对方法完成原子钟之间的时差测量并将数据上传到 BIPM，然后 BIPM 采用综合原子时算法计算得到 TAI，并对外发布计算结果。

随着原子钟数量和质量的不断提高、远程时间比对技术的不断更新，BIPM 多次更新 TAI 计算方法和取权规则，优化了氢原子钟模型和权重，加快了计算周期和发布更新周期。

为满足生产、生活、国防建设多方面的需要，世界上许多国家都通过国内的守时实验室建立和产生地方原子时，地方原子时与 TAI 保持高度一致。例如，中国的守时实验室主要有中国科学院国家授时中心、中国计量科学研究院、北京无线电计量测试研究所等单位，分别建立了各自的原子时，并保持相应的地方原子时。

当前，TAI 是最高性能的具有物理实现的系统时标，也是 UTC 等其他时标的基础，TAI 的综合性能要求主要体现在以下 5 个方面：

（Ⅰ）连续性（continuity）；

（Ⅱ）可靠性（reliability）；

（Ⅲ）可用性（accessibility）；

（Ⅳ）频率稳定性（frequency stability）；

（Ⅴ）频率准确性（frequency accuracy）。

时间作为一个连续量，一旦中断便难以找回，TAI 是国际时间的最高基准，对连续性的要求更高，因此连续性是 TAI 时间尺度要求的首要指标。

可靠性主要体现在时间系统的实现上，时间系统必须保障长期的正常运行，才能提供有效的时间参考基准。TAI 是通过全世界的数十个钟组共同保持，不会因为个别钟组故障而影响系统整体功能，可靠性能够得到充分的保障。

可用性主要体现在用户对时间的使用方面。TAI 可通过主钟系统输出实时信号，并连接到各类授时系统或时间传递系统，为用户提供时间服务。TAI 也可通过 UTC 等相关时标的发播和转换来提供用户服务。

频率稳定性主要反映了频率的均匀性。单个原子钟通常频率抖动较大，通过原子钟组的平均可

以获得更高的频率稳定性，TAI 的 ALGOS 算法就是基于加权平均的方法而设计的，当前，TAI 的频率稳定性优于 5×10^{-16}(20～40 d)。

频率准确性主要反映了频率与秒定义的一致性。秒定义通过频率基准装置实现，TAI 通过与频率基准装置的比对和修正，来保证与原子时秒 SI 的高度一致性，当前，TAI 的频率不确定性优于 1×10^{-15}。

(2)协调世界时的物理实现方式

协调世界时是在世界时和原子时之间，通过“协调”产生的一种时间尺度，具体来说，就是时间尺度单位为原子时秒长，但在时刻上又采用闰秒调整方式使之与世界时尽量接近。

在 1972 年以后，UTC 的“协调”方案明确：UTC 与 TAI 保持相同的基本速率，UTC 与 TAI 之间只相差整数秒，UTC-UT1 的差值范围最大为 ±0.9 s。闰秒通常安排在 6 月 30 日或 12 月 31 日的最后 1 分钟，必要时也可安排在 3 月 31 日或 9 月 30 日的最后 1 分钟。1975 年以后，按照新修订方案，作为候补日期，如果有必要，每个月末最后 1s 都可实施闰秒。

闰秒有两种方式，增加 1 s(相对正常计时推迟 1 s)称为正闰秒，减少 1 s(相对正常计时提前 1 s)称为负闰秒，如图 2 所示。

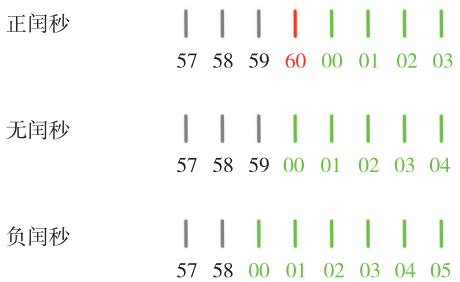

图 2 正闰秒与负闰秒时序关系

Fig. 2 The timing relationship between positive and negative leap seconds

闰秒信息可从 BIPM 发布的时间公报中获得，也可从卫星导航系统导航电文信息中提取，当前的闰秒信息如图 3 所示。

UTC 的实现和发布也是由 BIPM 负责，UTC 和 TAI 的实现过程基本相同，需要在 TAI 的基础上增加必要的闰秒调整。传统的 UTC 结果大约每月发布一次，2013 年推出的快速 UTC(rapid coordinated universal time, UTCr)大约每周发布一次。

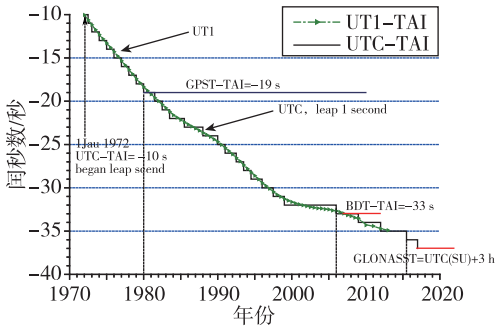

图 3 UTC 闰秒信息及与 GNSST 时间关系

Fig. 3 UTC leap second information and its relationship with GNSST time

类似于地方原子时，许多国家的守时实验室同时也建立了本地的 UTC，以方便为本国提供时间系统服务。

2 时间基准的未来发展

2.1 理论定义的发展

时间基准的理论定义未来将继续保持现有含义，但实现时间基准的物理装置会随着技术更新而不断变化，时间基准发展的核心是秒定义的变化。

秒定义的变化随着秒定义的实现技术提高而不断变化。从真太阳时、平太阳时、世界时、历书时再到原子时，秒定义不断变化，是由时间测量技术的发展和时间应用需求共同推动的。当前的秒定义是原子秒，是定义在铯原子能级跃迁一定数量持续的时间。在定义原子时秒长的时候就存在一个不确定度，即(9 192 631 770±20) Hz。这使得原子时秒实现中存在一定的误差，这也为未来秒定义的更新埋下了伏笔。如前文所述，当前不同领域使用的主要时间系统包含 TT、TAI 和 UTC 等，这些时间系统都是建立在秒定义的基础上，因此秒定义的变化对时间系统的影响需进一步分析。

(1)秒定义未来发展的考虑

在讨论未来秒定义之前，需要明确秒定义的改变不是秒长的改变，而是实现秒长的物理方式的改变，即采用更加稳定准确的秒长实现技术，确保未来秒长的更加准确和稳定。当前常见的守时型铯原子钟、氢原子钟以及作为基准钟的大铯钟、铯原子喷泉钟等都是基于原子的微波频段，并将其输出的微波共振频率作为基准频率，都是微波钟。铯原子喷泉钟作为当前微波钟里频率准确度和稳定度领先的原子钟，其频率准确度已进入 10^{-16} 量级，频

率稳定度已进入 10^{-16} 量级。锶光钟、镱光钟等则是以原子的光学波段共振频率作为时间频率基准的原子钟，通常被称为光钟。光钟的工作频段比微波钟的工作频段高 4 到 5 个量级，光钟可以达到比微波钟更高的频率准确性和频率稳定性。

未来新的“秒”定义将会给整个科学领域甚至社会的方方面面带来改变。鉴于当前光钟相对微波钟的优势越来越明显，国际计量组织通过多轮次讨论后，计划于 2026 年讨论“秒”定义的变更问题，即用光钟取代目前铯原子微波钟，更新和复现新的时间单位“秒”，并在 2030 年第 29 届国际计量大会上作出最终决定。

光钟是以原子或离子在光学波段的跃迁频率为参考建立的原子钟，光钟是工作在光学频率上的，要将其引入日常的以电信号为基础的测量系统中，需要将光学频率转换到微波信号，只有这样才可和现代电子系统实现对接，满足实际应用需求[4-5]。解决了应用问题，还需要考虑如何将光钟复现的秒长与在现行定义下的秒长保持一致，确保秒定义变化后秒长本身不变。上述问题均解决后就可以考虑秒定义的更新问题，但新的问题又出现了，那就是当前有多种类型光钟，选择哪一种光钟作为秒定义物理实现的装置是最优的？该问题将在 2.2 节中论述。无论选择镱离子光钟、锶原子光晶格钟、钙离子光钟还是其他光钟中任一种作为未来秒定义的物理实现装置，都体现了秒定义的发展趋势。总体来说秒定义的发展是随着人类计时工具的发展而不断发展的，实现的秒定义也越来越准确和稳定。

(2)TT 定义发展的考虑

TT 是由国际天文联合会在相对论框架下定义的适合于近地空间的时间系统，通常用作从地球表面进行天文观测的时间量，例如，天文历书使用 TT 作为从地球上看到的太阳、月球和行星的位置表(星历)。从 1991 年开始，TT 秒长定义为国际标准单位 SI 秒长。TT 是一个连续时间尺度，TT 与国际原子时 TAI 关系是

TT= TAI + 32.184 s(从 1997 年 1 月 1 日 0 时起)

TT 在天文观测和天文测量中有着重要的应用，符合从地球开展天体观测和天文测量的应用需求，其和 TAI 关系固定后，其使用更加便捷。在当前秒定义和秒长实现条件下，TT 的概念近期没有出现更改或重新定义的必要。

(3)未来 TAI 的产生

秒定义的改变，是不改变秒长情况下、实现秒定义的物理方式的改变，实际就是基准钟的变化。如果秒定义从现有铯原子微波钟改变成某一种型号的光钟，则这个光钟就是未来的基准钟，也就是未来的时间以及频率标准。

对于 TAI 来说，其产生过程预计不会有太大变化，还是基于全球 n 个实验室的 m 台原子钟进行综合计算得到自由原子时(échelle atomique libre/free atomic scale，EAL)，通过基准钟(光钟)校频后获得 TAI。

(4)未来 UTC 的变化

若秒定义的改变，不会改变 TAI 的产生方式，那么同样不会改变 UTC 的产生方式。需要解释的是，当前 UTC 是通过 TAI 增加闰秒的方式使得 UTC 和 UT1 保持在一定偏差范围内，未来如果改变闰秒策略，通过闰分、闰小时或其他方式，使得 UTC 变成一个在较长时间内连续的时间尺度，将可能影响 UTC 的定义方式和产生方式，但 UTC 产生总体过程和现阶段不会有太大变化，只是在基准钟校频时采用新定义的基准钟，即某一型号的光钟，未来 UTC 产生过程如图 4 所示。

UTC 是当前国际通用的时间参考，预计未来也不会有变化。但 UTC 和 UT1 的相对偏差会随着闰秒方式的调整而变大。闰秒改革问题是国际时间频率领域最为重大的热点问题之一，闰秒调整改革，意味着协调世界时和世界时关联方式的改变，甚至是脱钩，调整后对导航、通信等领域有着明显的益处，能够防止破坏导航与通信系统的连续运行，但调整后对天文观测、天体测量、地月及深空探测来说，就失去了通过 UTC 粗略获得 UT1 的方式，进而可能造成相关实验研究无法顺利开展。闰秒改革问题比较复杂，如有兴趣，可参阅相 BIPM 网站、ITU 网站以及相关文献资料。

2.2　未来时间基准的物理实现

(1)秒定义实现装置

当前秒定义实现装置包含大铯钟、铯原子喷泉钟、守时型商品小铯钟等，这些原子钟按照其性能可分为基准钟、守时钟，都是基于铯原子超精细能级跃迁对外辐射稳定微波频率的特性实现原子钟。当前作为基准钟的原子钟包括大铯钟和铯原子喷

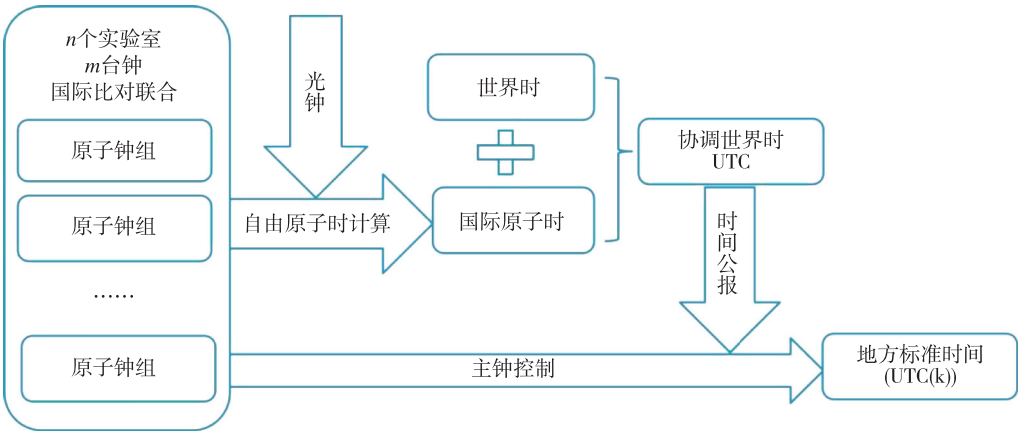

图 4 未来 UTC 的产生过程

Fig. 4 Generation process of future UTC

泉钟[6]，大铯钟大约从 20 世纪 50 年代末开始投入使用，目前有 2 台参与国际原子时的频率校准工作；铯原子喷泉钟从 2005 年前后开始投入使用，截至 2021 年底，有 11 台铯原子喷泉钟参与国际原子时的频率校准。

未来随着秒定义的变化，作为基准钟的原子钟必然出现相应的变化。虽然光钟被认为是未来可能成为秒定义的首选，但具体选择哪一种光钟，还没有定论，未来几年可能会有多轮讨论，以确定未来实现秒定义的光钟类型。需要注意，无论未来选择哪一种光钟作为秒定义的物理实现，都需要考虑如何将光频信号转换为连续输出的电信号，以便电子系统使用。当前常用的方法是光钟驾驭微波钟，即通过微波钟和光钟相对频偏测量，采用频率驾驭的方式提高微波钟的频率准确度。这样既发挥了光钟优势，又可以依赖微波钟产生长期连续稳定的时间频率信号。

由于光钟在未来秒定义、精密测量和基础研究等领域的作用，发达国家都非常重视其研究和发展。当前能成功研制光钟的国家主要有美国、法国、德国、英国、日本等，其中研究领先的是美国的叶军团队和日本东京大学的香取秀俊研究组[7]。光钟按照参考物理体系的种类划分，主要可以分为离子光钟和中性原子光晶格钟。离子光钟方面[8-10]，美国国家标准与技术研究院（National Institute of Standards and Technology，NIST）的铝离子光钟的不确定性达到 9.4×10^{-19}、德国联邦物理技术研究院（Physikalisch-Technische Bundesanstalt，PTB）的镱离子光钟的不确定性达到了 2.7×10^{-18}。中性原子光晶格钟方面[11-12]，美国天体物理联合实验室（Joint Institute for Laboratory Astrophysics，JILA）和日本理化研究所（Rikagaku Kenkyusho/Institute of Physical and Chemical Research，RIKEN）的锶原子光晶格钟的不确定度分别达到了 2×10^{-18} 和 5.5×10^{-18}，NIST 的镱原子光晶格钟的不确定性达到了 1.4×10^{-18}。国内方面，中科院精密测量科学与技术创新研究院、中国计量科学研究院、中国科学院国家授时中心、中国科学院上海光学精密机械研究所等多家单位正在开展光钟研制工作，也取得了明显进展。目前已有多台光钟的不确定度达到了 10^{-18} 量级，加入了上述国际第一方阵。其中，据已公开发表的文献，中国计量科学研究院实现了不确定度 7.2×10^{-18} 的锶原子光晶格钟；中科院精密测量科学与技术创新研究院实现了不确定度 7.9×10^{-18} 的铝离子光钟和不确定度 3×10^{-18} 的钙离子光钟；中国科学院国家授时中心锶原子光晶格钟不确定度已经优于 5.7×10^{-17}。中国计量科学研究院和中国科学院国家授时中心都独立完成了光钟输出频率通过国际原子时溯源到当前秒定义的工作。

由上述分析发现，不同类型的光钟均处于快速发展期，不同光钟各有特点，且所有光钟性能都在不断提高，因此当前还无法给出未来的秒定义实现装置[13]。

（2）未来时间基准实现方法

秒定义更新后，为确保新的秒定义在各个国家的物理实现，我们仍然需要考虑本地守时系统设计。在不考虑 UTC 重新定义的条件下，即不考虑取消闰秒，继续保持现有闰秒机制条件下，BIPM 计算的 TAI 和当下计算过程预计不会有太大差异，主要包括以下几个步骤：

第一步，收集全球参与国际原子时合作的守时

实验室的时间比对链路数据、内部原子钟比对数据等，采用适当的原子时计算方法，计算 EAL；第二步，比较 EAL 和作为基准钟的光钟的相对频偏（可采用分布于各实验室的多台光钟），校准 EAL 的频率偏差获得 TAI；第三步在 TAI 钟插入闰秒信息，获得 UTC。由上述步骤可知，作为基准钟的光钟在 UTC 产生过程中主要起到了校频作用，但需说明的是，若未来基准钟具备连续运行的条件，则不仅可以用于对 EAL 进行校频，还可以直接参与到守时系统中来。

对于一个国家的守时实验室而言，本地保持的 UTC 产生过程也不会有太大变化，所不同的是，若守时实验室拥有新的基准钟，则可在采用传统守时方法的同时利用本地基准钟特性调整优化本地时间保持精度，增强本地时间自主保持能力。

3　我国时间基准发展的几点建议

20 年来，在北斗卫星导航系统建设的牵引带动下，我国的时间基准相关研究取得了较快的发展，在时空参考系、原子钟研发、钟组守时等方面取得了长足的进步，建立了用于北斗卫星导航系统的空间参考系和时间参考系，在突破星载原子钟技术的基础上，进一步具备了主动氢钟、小型磁选态和光抽运铯钟、铯原子喷泉钟的研发能力，基本具备了时间基准系统的自主建设供给能力。面向下一代更高精度的卫星导航系统和国家时空体系建设要求，还需进一步加大基础研究、技术研发与试验以及体系应用研究力度，满足未来智能化时代国防和国民经济建设对精密时空应用的迫切需求。

3.1　基础研究

加强时空参考系的自主观测和服务。时空参考系是时间基准建立的基础，当前我国时空参考系的建立主要是通过参与国际合作，对国际地球参考系（international terrestrial reference system，ITRS）的继承，我国在国际合作中参与的地面测量站数量较少，在国际合作中基本处于从属地位，缺乏自主的时空参考系观测与建立能力。面对当前的国际形势，我国应加大自主时空参考系的观测、模型构建和应用能力研究，建设形成自主的时空参考系观测运行服务能力。

进一步提升时空参考系的精度。如果把地球时 TT 作为近地空间的时间基准的理论参考，在实际应用过程中，TT 的理论计算模型还与地球重力场、地球自转速度等基础数据精度有关，这些基础数据会影响 TT 理论模型的计算精度，在未来使用自评不确定度性能达 10^{-18} 以上量级的光频标建立时间基准时，当前的 TT 的理论模型精度可能无法满足使用需求。为此，面向下一代更高精度时空基准应用需求，有必要进一步加强更高精度时空参考系的建立理论、观测处理方法等问题的研究，提升时空参考系理论模型精度，为充分发挥光钟等新型原子钟性能，构建更高精度时间基准奠定基础。

3.2　技术试验

加强新型原子钟技术研发和守时应用研究。以原子或离子体系的光频跃迁为参考进行秒定义的修订，是未来几年时间基准发展的必然要求，世界主要科技强国都在大力发展新型光钟技术，以获取秒定义的国际话语权。我国在新型光钟方面，布局技术较为广泛，但在指标实现上与国际领先水平存在差距，有必要进一步加强以光频原子钟为代表的新型原子钟技术研发，加大光钟测量、比对和守时应用技术试验力度，实现时间基准性能的跨越式发展。

加强分布式时间基准模式构建和技术验证。经过多年的建设，我国已建成多套守时系统，并参与 UTC 合作，北斗卫星导航系统、中国空间站等空间设施部署了大量高性能原子钟，充分发挥我国守时系统和空间原子钟资源，加强分布式时间基准模式研究、关键技术攻关和技术验证，对于构建精准统一、安全可靠的国家时间基准具有重要的意义。

3.3　体系应用

加强时间基准服务应用的顶层设计，提升时间基准服务体系的协调性、兼容性和安全性。我国的时间基准服务系统对外提供服务的方式主要包括北斗卫星授时、地基无线电授时、网络授时等，各授时系统运行维护主体不同，接入时间基准源头不同，提供的时间服务存在偏差。建立统一融合的时间基准网络，可为各授时服务系统提供多点接入的高精度时间基准，可有效提升授时系统服务的兼容性和安全性；加强用时终端的顶层设计，提升标准化、模块化、系列化水平，加强用时终端的多手段接收、多源时间信息融合和多信号体制服务能力，对于保障各领域时频应用的精确性和安全性具有重要作用。

参考文献

[1]　蔡志武，蔺玉亭，肖胜红　等．时间基准与授时服务

[M]. 北京:国防工业出版社,2021:21-35.
Cai Zhiwu, Lin Yuting, Xiao Shenhong, et al. Time standard and timing service[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2021:21-35(in Chinese).

[2] BIPM. Theinternational system of units[R]. BIPM, 2022:130-133.

[3] BIPM. BIPM annual report on time activities[R]. BIPM, 2020.

[4] 卢晓彤,常宏. 冷原子气体的时频测量—光晶格原子钟[J]. 物理,2022,51(2):100-109.
Lu Xiaotong, Chang Hong. Time-frequency measurement based on cold atomic gases—optical lattice atomic clocks[J]. Physics, 2022, 51(2):100-109(in Chinese).

[5] Lu X, Guo F, Wang Y, et al. Absolute frequency measurement of the 87Sr optical lattice clock at NTSC using international atomic time[J]. Metrologia, 2023, 60:1-7.

[6] Michael A L, Thomas P H, Steven R J. NIST primary frequency standards and the realization of the SI second [J]. The Journal of Measurement Science,2007,2(4): 74-89.

[7] 管桦,黄垚,高克林. 囚禁冷却钙离子精密光谱实验进展[J]. 中国科学:物理学力学天文学,2016,46(7):52-73.
Guan Hua, Huang Yao, Gao Kelin. The progress of the precision spectroscopy with single trapped and laser cooled$^{40}Ca^{+}$ ion[J]. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2016, 46(7): 52-73(in Chinese).

[8] Hachisu H, Ido T. Intermittent optical frequency measurements to reduce the dead time uncertainty of frequency link[J]. Jpn. J. Appl. Phys.,2015, 54:1-7.

[9] Hachisu H, Nakagawa F, Hanado Y, Ido T. Months-long real-time generation of a time scale based on an optical clock[J]. Sci. Reports,2018, 8:1-12.

[10] Grebing C, A-Masoudi A, Dörcher S, et al.. Realization of a timescale with an accurate optical lattice clock[J]. Optica 2016,3:1-10.

[11] Hachisu H, Petit G, Nakagawa F, et al. SI-traceable measurement of an optical frequency at low 10-16 level without a local primary standard[J]. Opt. Express,2017,25:1-14

[12] Nemitz N, Gotoh T, Nakagawa F, et al. Absolute frequnecy of 87Sr at 1.8×10^{-16} uncertainty by reference to remote primary frequency standards[J]. Metrologia, 2021,58:1-13.

[13] BIPM. Annual review 2016/2017[R]. BIPM, 2018.

(编辑:黄利华)