

引用格式:李孝辉,董绍武,袁海波,等. 中国协调世界时技术发展[J]. 时间频率学报, 2026, 49(1): 20-28.

中国协调世界时技术发展

李孝辉^{1,2,3}, 董绍武^{1,2,3}, 袁海波^{1,2,3}, 武文俊^{1,2,3}, 张首刚^{1,2,3}

1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600;
3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:协调世界时(UTC)的定义在 1972 年最终形成,成为国际标准时间,我国在同年的 7 月按照新的规范产生了符合协调世界时标准的国家标准时间,并于 1980 年正式加入国际比对,当时的国家标准时间与协调世界时的偏差保持在 $\pm 1 \mu\text{s}$ 。随着技术的革新,我国国家标准时间的性能也不断提高,至 2000 年,国家标准时间与协调世界时的偏差已经进入 100 ns,5 日稳定度在 14 个有独立地方原子时的守时实验室中排名第 6,对国际原子时(TAI)贡献权重从第 10 上升到第 5。近十年随着比对手段、原子时算法、环境控制、自主研发原子钟等的加入,对国际原子时的权重贡献也超越了美国海军天文台,达到了世界第二的水平。独立地方原子时中长期稳定度进入 10^{-16} 量级,综合指标进入世界第二。国家标准时间的性能更是迅速提高,从 2024 年 1 月开始,我国国家标准时间的偏差已经小于 1.4 ns,超过了美、俄、德等国家,处于世界第一。

关键词:协调世界时;国际原子时;国家标准时间;时间比对

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2026-01-0020-09

Development of Coordinated Universal Time in China

LI Xiao-hui^{1,2,3}, DONG Shao-wu^{1,2,3}, YUAN Hai-bo^{1,2,3},
WU Wen-jun^{1,2,3}, ZHANG Shou-gang^{1,2,3}

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The definition of Coordinated Universal Time(UTC) was finally established in 1972. In July of the same year, China generated the national standard time that agree with the UTC standard. China officially joined the international time comparison in 1980, and the time difference between the national standard time and the UTC was within 1 microsecond. With the innovation of technology, the performance of the national standard time has been continuously improved. By 2000, the time difference of the national standard time had reached within 100 ns, and its 100-second stability ranked sixth among the 14 timekeeping laboratories with independent local atomic time. The rank of contribution weight to the International Atomic Time (TAI) rose from tenth to fifth place. In the past ten years, with the incorporation of better time comparison methods, atomic time algorithms, environmental control, and self-developed

收稿日期:2025-07-10;接受日期:2025-11-05

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDB1070301)

作者简介:李孝辉,男,博士,研究员,主要从事标准时间产生与授时技术的研究。

atomic clocks, etc., the performance of the national standard time has been rapidly enhanced. The deviation has reached within ± 2 ns, ranking second in the world. Its contribution weight to TAI has also surpassed that of the United States Naval Observatory, reaching the first place in the world.

Keywords: Coordinated Universal Time(UTC); International Atomic Time(TAI); national standard time; time comparison

协调世界时 UTC 是以原子时秒长为基础,在时刻上尽量接近于世界时的一种时间测量系统。由国际权度局(BIPM)综合世界上近 90 个守时实验室 400 多台原子钟(截至 2025 年 5 月 31 日)的比对数据,采用加权平均的方法,形成自由原子时(EAL),并经过基准/二级频率标准改正后得到国际原子时(TAI)。协调世界时以 TAI 秒为基础,通过添加闰秒的方式,使协调世界时(UTC)与世界时(UT1)的偏差保持在 ± 0.9 s 以内。

协调世界时是滞后的纸面时间,守时实验室需要依托本地守时钟或钟组,并依据本地时间和 UTC 的偏差数据,直接修正本地主钟信号或通过修正本地产生的地方原子时,进而控制本地主钟产生协调世界时的物理实现($UTC(k)$, k 是实验室缩写), $UTC(k)$ 是国家授时系统发播的时间基准。

从 1972 年开始,中国科学院陕西天文台(CSAO)产生我国的国家标准时间 $UTC(CSAO)$ 。由于 UTC 使用零时区的时间,我国在日常使用的时候需要加上 8 个小时的时区差形成北京时间,一般并不直接区分这两个时间,把北京时间、UTC(NTSC)统称为国家标准时间,本文也不区分这两个概念。

中国科学院陕西天文台于 2001 年更名为中国科学院国家授时中心(NTSC)。目前,国家授时中心产生与保持我国唯一的独立地方原子时 TA(NTSC)(原 TA(CSAO))、建立并运行我国唯一的世界时自主测量系统,产生作为中国国家标准时间的协调世界时物理实现(原 $UTC(CSAO)$ 、现 $UTC(NTSC)$)。

自 1972 年产生开始, $UTC(NTSC)$ 的性能稳步提高,目前已经达到国际先进水平。文章对我国协调世界时的产生方法、技术特点以及性能指标的发展历程进行了回顾分析。

1 1980 年,国家标准时间正式加入国际时间比对,偏差优于 $1 \mu\text{s}$

1963 年,隶属国际电信联盟(ITU)的国际无线

电咨询委员会(CCIR)在其第 374 号建议案中首次对协调世界时作出定义,1970 年通过第 460 号建议案进行了修正,形成目前的添加闰秒控制 UTC 与 UT1 偏差的方案,并在 1972 年将 UTC 和 UT1 的最大偏差扩大到 0.9 s, UTC 正式形成^[1]。

为了适应新的 UTC 定义,中国科学院陕西天文台通过接收其他国家短波授时台的授时信号,测量了 BPM 短波授时台发播的国家标准时间与协调世界时的偏差,在 1972 年 7 月 1 日完成了世界时向协调世界时的转换, BPM 短波授时台开始发播 UTC 时间。

陕西天文台在 1979 年初建立了我国的原子时系统。守时钟组包括四机部 768 厂和北京大学汉中南分校研制的 3 台气泡型铷原子钟和上海计量局(现上海市计量测试技术研究院)研制的 2 台氢原子钟。以氢原子钟作为参考钟,按月对铷原子钟进行校准,平均各原子钟的时间得到地方原子时标准 TA(CSAO),继而得到协调世界时的物理实现,也就是国家标准时间 $UTC(CSAO)$ ^[2-3]。

为了确定 $UTC(CSAO)$ 与 UTC 的偏差,需要积极参与国际原子时合作,从而通过本地主钟信号控制获得国家标准时间信号与信息。

1979 年 6 月 18 日至 27 日,中国科学院陕西天文台、上海天文台和邮电部第一研究所联合组成试验小组,利用法德联合研制的“交响乐”通讯卫星,与法国巴黎天文台(OP)成功地进行了一次洲际时间比对试验,确定了 $UTC(CSAO)$ 和 $UTC(OP)$ 之间的偏差,准确度约 100 ns。同时,也测量出了观测罗兰 C 西太平洋链 9970-Y 台地波信号进行定时的系统偏差。

中法时间比对确定了我国的协调世界时与协调世界时的一致性,1979 年 10 月,中国科学院陕西天文台主办的《时间频率公报》创刊,正式承担我国标准时间和标准频率发布任务。

然后,以氢原子钟的信号为参考,接收罗兰 C

西太平洋链 9970-Y 台地波信号进行定时,同时接收澳大利亚的 NWC 甚低频无线电授时台和英国的 GBR 长波授时台的信号进行定时,长时间测量 UTC(CSAO)与 UTC(USNO)(USNO 为美国海军天文台)的偏差,根据 BIPM 发布的 T 公报中 UTC(USNO)与 UTC 的偏差,最终在 1980 年 1 月 1 日 0 时校准确定 TA(CSAO)的起点。根据守时钟的信号进行累加,获得连续、独立的 TA(CSAO)。

以 TA(CSAO)的秒长为参考,分析作为主钟的氢原子钟的频率偏差,利用相位微调仪对主用氢钟的频率进行修正,便可独立、连续累积得到 UTC(CSAO)的信号,据此提供协调世界时服务,控制长短波授时台的发播。

从 1980 年 3 月 1 日起,国际权度局在其时间公报上每月刊布 TA(CSAO)和 UTC(CSAO)结果,中国的国家标准时间 UTC(CSAO)和地方原子时 TA(CSAO)正式加入国际时间比对。

1980 年 5 月,陕西天文台又引进 3 台美国商品铯原子钟 HP5061 参加守时,提高了标准时间的产生能力。1980 年 1 月至 10 月,如图 1 所示,UTC(CSAO)与 UTC 的偏差基本保持在 $1\mu\text{s}$ 以内^[2]。

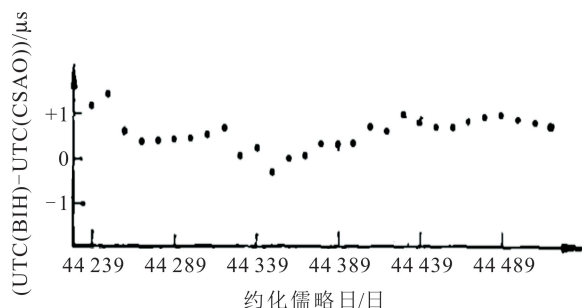


图 1 国家标准时间的偏差(1980 年 1 月至 10 月)^[2]

为了进一步提高陕西天文台参加国际原子时计算的时间比对精度,1980 年,美国海军天文台搬运钟小组,携带搬运钟(USNO,PC1809)于 8 月 23 日从东京到达上海,8 月 26 日抵达西安,8 月 28 日到北京,8 月 31 日从北京回东京。在中国境内历时 8 天,分别与上海天文台、陕西天文台和北京天文台三处的时频实验室的时间尺度进行了时刻比对和相位比对,确定了各天文台的时间尺度和美国海军天文台的时间尺度的差,测出了各天文台至罗兰 C 西北太平洋链 Y 台长波时延采用值的偏差,并根据这个结果,对国际时间局时间公报上刊布的 UTC(CSAO)的偏差进行了修正^[4-5]。图 2 为 20 世纪 80 年代的国

家标准时间产生系统。



图 2 20 世纪 80 年代的国家标准时间产生系统

中国计量科学研究院负责产生和维护国家时间频率计量基准,为了计量的需要,也建立了协调世界时的物理实现 UTC(NIM),从 1980 年 5 月开始,在国际时间局的时间公报上刊布。

2 2000 年,国家标准时间偏差进入 100 ns 以内,权重上升到第五位

从 20 世纪 80 年代开始,陕西天文台采用上海计量局(现上海计量科学研究院)研制的氢原子钟作为参考^[6],控制美国进口的铯原子钟 HP5061,产生我国的标准时间。

90 年代初,美国 HP 公司研制出性能比 HP5061 高一个数量级的新一代守时型铯原子钟 HP5071A(优质管)。陕西天文台 1997 年 4 月引进 6 台 HP5071A 钟后,开展了新的原子钟性能分析^[7-9],并根据原子钟的性能调整了标准时间产生方法,主要从四个方面提高了国家标准时间的性能^[8]。

首先,改变了 80 年代氢钟校准铯钟的原子时产生方法,采用与国际原子时计算的 ALGOS 算法近似的加权平均方法,只采用单一类型的 HP5071 进行原子时计算,并根据钟的特点对加权方法进行了调整。

其次,修改了原子钟的驾驭方法,选择钟组中性能比较好的铯钟作为主钟,根据地方原子时 TA(CSAO)的速率及上个月的 UTC(CSAO)的偏差预测数据,动态调整相位微调仪偏差设置值,改善主钟的控制精度。

第三,利用 BIPM 的时间比对接收机巡回校准的机会,改进全球定位系统 GPS 接收机的时延校准精度,并修订接收机天线相位中心的坐标误差,提

高比对精度。

最后,卫星双向时间比对系统开始运行,改进了国际时间比对的精度。

通过这些方式,TA(CSAO)的稳定度逐年提高。2000 年 1 月 1 日开始的 12 个月,100 天的稳定度在国际上 14 个有独立地方原子时的守时实验室中排名第 6。如图 3 所示,陕西天文台与 SCL(香港标准及校正研究所)成为亚太地区仅有的两个时间偏差进入 $\pm 100\text{ ns}$ 以内的守时实验室,UTC(CSAO)的控制水平达到了国际电联的建议标准。2000 年,陕西天文台对 TAI 贡献权重由 1999 年的 3%上升到 5%,在所有时间实验室中的排名由第 10 上升到第 5。图 4 为陕西天文台 20 世纪 90 年代的守时装置。

MJD	AUS	BIRM	CRL	CSAO	INPL	NRLM	KRIS	MSL	NAO	NIM	NPLI	PSB	SCL	TL
51 534	839	-15 355	-79	10	-127	2 229	48	-	-2 016	-2 991	3 673	835	39	192
51 564	838	-15 695	-153	-6	-150	2 376	22	5 072	-2 692	-2 903	-	941	-4	170
51 594	832	-16 045	-240	-5	-148	2 488	45	5 703	-2 918	-2 896	5 980	1 065	-22	172
51 624	841	-16 305	-198	8	-	2 614	44	6 353	-3 171	-2 800	5 555	1 205	-80	144
51 654	761	-16 456	-167	5	-30	2 754	47	7 184	-3 181	-2 764	-	1 288	-70	140
51 684	675	-16 592	-115	-10	-113	2 891	24	7 971	-3 033	-2 764	-	1 440	-50	116
51 714	600	-	-55	-45	-	3 031	52	8 785	-2 851	-	-	1 585	-47	104
51 744	526	684	-21	-69	-	3 166	37	9 502	-2 720	-2 688	-	1 726	-25	126
51 774	416	421	-29	-81	-	3 313	-6	9 990	-888 917	-	-	1 883	-37	78
51 804	329	249	-37	-39	-38	3 457	12	10 348	-888 925	-2 711	7848	1 979	-14	12
51 834	230	205	-48	-14	-110	3 627	58	11 076	-2 201	-2 722	-	2 079	-6	-72
51 864	135	116	-41	20	-191	3 812	108	12 026	-2 026	-2 748	8 455	2 162	25	-115
51 894	13	56	-39	37	-285	-	85	-	-1 844	-2 737	8 780	2 261	8	-125
51 924	-23	30	-20	34	-362	-67	121	13 910	-1 693	-2 776	9 066	2 348	-44	-156
51 954	-19	-32	1	38	-458	-68	86	15 225	-1 523	-2 744	9 413	53	-48	-176

注:图中数据单位为 ns,主要 UTC(*k*)的产生和保持单位:AUS 澳大利亚国家计量实验室,BIRM 中国航天科工 203 所,CRL 日本通信研究实验室,CSAO 中国科学院陕西天文台,INPL 以色列国家物理实验室,NRLM 日本国家计量研究所,KRIS 韩国标准科学研究院,MSL 新西兰测量标准实验室,NAO 日本国立天文台,NIM 中国国家计量科学研究院,NPLI 印度国家物理实验室,PSB 新加坡生产力标准局,SCL 香港标准及校正研究所,TL 中国中华电信研究所

图 3 亚太主要 UTC(*k*)偏差(1999 年 12 月至 2001 年 2 月)^[8]



图 4 20 世纪 90 年代的守时装置(1999 年 10 月)

3 2005 年,通过改进主钟系统等,国家标准时间的偏差进入 30 ns 内

在 21 世纪初,中国科学院陕西天文台更名为中国科学院国家授时中心,UTC(CSAO)相应的改为

UTC(NTSC)。

国家授时中心增加了 2 台商品铯原子钟 Agilent 5071A,2004 年引进了 2 台美国的 Sigma-tau MHM-2010 型主动氢原子钟,2005 年初,由上海天文台研制的 2 台主动型氢原子钟也加入到守时钟组中。这样,守时钟组的种类变成三种,数量也有了较大提高。但是,8 台商品铯原子钟中,有 6 台购于 1997 年,工作年限已经远远超出 3 年的优质期,性能已经下降了很多,标准时间产生的形式比较严峻。

为了保持国家标准时间的性能优势,从软件上下功夫,提高标准时间的产生能力,通过对原子时算法、远程时间比对数据处理方法等进行深入的探讨和研究,编制了大量计算、实时监测和分析软件^[10-12],严格维护守时设备及钟房环境,努力提高协调世界时的产生水平。

在 2005 年 3 月,将“铯钟+相位微调仪”的主钟模式改为“氢钟+相位微调仪”的模式,提高主钟频率和时间的可预测性,同时使 UTC(NTSC)短期稳定度提高了 1 个数量级。

组合多种国际时间比对方式。首先,从 2003 年开始,用卫星双向时间比对链路与日本信息与通信技术研究院(NICT)进行常规比对。其次,将 2001 年 11 月至 2003 年 12 月期间使用的两台多通道 GPS/GLONASS 双系统 R100/30T 共视接收机升级到自研的多通道单频 GPS 共视接收机。第三,采用 ASHTECH 公司的 Z2-T GPS 接收机进行 P3 码共视比对和载波相位时间传递,并成为国内第一个向 BIPM 提供载波相位时间传递数据的守时实验室。

研究有利于氢、铯联合守时的原子时算法。氢钟短稳好但具有明显的长期频率漂移,铯钟长期稳定度好,按照以前的铯钟守时算法会严重影响原子时的长期稳定度,尤其是影响 60 d 以上取样时间的长期稳定度。初步实现的氢、铯钟联合守时的方法有效地提高了原子时的短期稳定度,虽然 60 d 以上稳定度仍比单铯钟组的稳定度差,但也有明显改善。

随着这些工作的陆续实施,克服了原子钟性能下降的不利因素,UTC(NTSC)与 UTC 的偏差,从 2001 年开始进入 50 ns 以内,比 2000 年提高了 1 倍,如图 5 所示^[8-9]。更进一步,在 2005 年 9 月 1 日,国家标准时间的偏差进入 30 ns,达到国际先进水平。

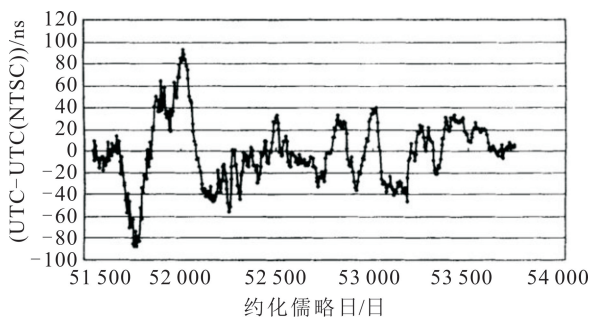


图 5 国家标准时间的偏差(1999 年 11 月至 2006 年 9 月)

4 2008 年,国家标准时间的偏差小于 20 ns,权重进入国际前三

标准时间产生,需要从硬件和软件两方面着手。在硬件方面,首先是配置高精度的原子钟,2005 年新增 10 台 Agilent 铯钟并在 2006 年加入原子时计算,使守时钟组达到了 19 铯 4 氢的规模,成为亚洲最大的守时钟组。然后,开始进行守时软件

配置改进。为了避免人为错误的影响,开始进行自动监控能力的改进,主要包括守时系统计算机网络的自动同步、实验室时间信号定时比对、守时设备超差自动报警、钟房环境自动监测和监测数据自动定时处理等^[13]。最后,为提高值班人员工作效率,实现一个专用监测软件,值班人员可以随时查看守时系统各设备的运行情况。

原子钟性能的提高是国际时间频率技术发展的重要环节,它们的发展对远程时间传递技术的发展是一种冲击。远程时间传递技术的水平会制约高性能原子钟发挥应有的作用。2007 年开始,国家授时中心在保持与亚洲守时实验室进行比对的前提下,开始建设与欧洲时间实验室的卫星双向时间比对链。2008 年分别实现了与荷兰 VSL(国家计量研究院)、法国 OP、德国 PTB(国家计量研究院)的双向卫星时间比对。2009 年 5 月起,NTSC 与 PTB 之间的 TWSTFT(卫星双向时间频率传递)比对链数据用于 TAI 计算。

对氢铯联合守时方法进行了更新,针对原子钟噪声特点设计保真消噪的数据预处理方法^[14-16],改进原子钟频率预测方法和原子钟取权方法,实现了更能充分发挥氢原子钟和铯原子钟各自性能的原子时尺度计算方法,使原子时稳定度大幅度提高,全球排名处于第二到第五的位置,在 2008 年,60 d 稳定度超过美国海军天文台的 TA(USNO),达到国际第二。

良好稳定度的原子时,为国家标准时间产生奠定了良好的基础,如图 6 所示,国家标准时间的偏差从 2008 年 1 月 1 日开始进入 20 ns 以内,处于国际前三。

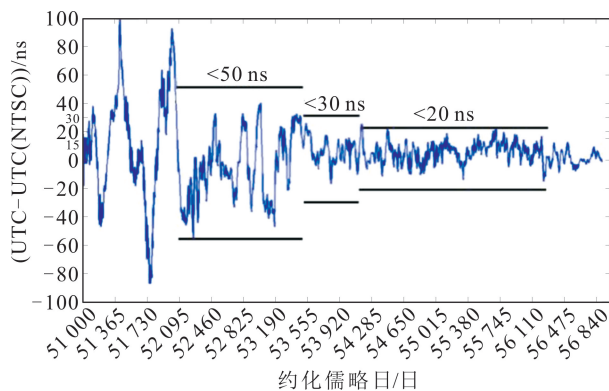


图 6 国家标准时间的偏差(1998 年 7 月至 2014 年 7 月)

图 7 为 21 世纪初的国家标准时间产生系统(2008 年 7 月)。



图 7 21 世纪初的国家标准时间产生系统(2008 年 7 月)

5 2017 年,国家标准时间的偏差小于 5.1 ns,进入国际前三,国际权度局时间部主任专函致贺

建立完善的国际时间比对系统是各守时实验室的一项基础性工作,是产生高性能的协调世界时的前提和基础。

国家授时中心不断完善卫星双向时间比对链路,实现了自动化运行,可同时与亚洲多个国家进行比对。同时,积极开展 GPS PPP(precise point positioning)时间比对等前瞻性研究,以保持国际比对链路的高精度和先进性。在 PPP 精密时间比对方法研究中攻克了多项关键技术,顺利实现了 PPP 精密时间比对系统。2013 年 9 月 9 日,PPP 时间比对正式纳入国际原子时计算。

国家授时中心同时运行双向、共视、全视、PPP 四种国际时间比对手段^[17],在国际原子时计算中发挥了重要的作用。在时间比对方式上,实现三条全球导航卫星系统 GNSS 国际时间比对链路的融合,A 类不确定度均达到 0.7 ns,改善了国际时间比对的稳定性和可靠性,总不确定度为 5.1 ns,比原先不确定度改善 3~4 倍。

2013 年,国际上 74 个守时实验室中,拥有这三种链路的实验室只有 12 个。彼时,中国计量科学研究院主要采用 GPS PPP 和共视时间比对链路,卫星双向时间比对链路处于不连续运行状态。

2012 年开始,国家授时中心又购置了 8 台 5071 铯原子钟和 2 台 Sigma-tau 主动型氢原子钟,钟组规模达到了 24 铯 4 氢。图 8 为 2010 年代的守时系统。



图 8 2010 年代的守时系统(2013 年)

在原子时算法方面也有进展^[18-19],提出自适应卡尔曼滤波对原子钟频率和频率漂移率异常检测,异常检测统计量平均值达到 52.99,检测效率提高 1 倍,提高了守时精度和可靠性。

通过三方面的工作,如图 9 所示,从 2017 年 1 月 1 日开始,UTC(NTSC)偏差从以前的 ± 9.5 ns 改善到 ± 5.1 ns 以内,对 UTC 权重贡献位居国际第 3~4 行列,各项指标居于世界先进水平。

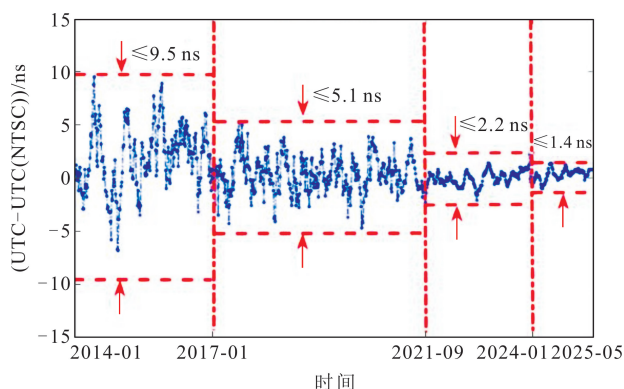


图 9 国家标准时间的偏差(2014 年 1 月至 2025 年 5 月)

国家标准时间保持的成果,以“我国时间基准 UTC(NTSC)保持实现国际先进水平”为题,在 2016 年 6 月 1 日至 7 日,参加了国家“十二五”科技创新成就展。

在 2016 年 10 月 15 日,国家授时中心 50 周年所庆之际,国际权度局时间部主任 Arias 专函致贺(图 10):“UTC(NTSC), whose divergence with respect to UTC has been kept stable within five nanoseconds most all the time during the last year”。

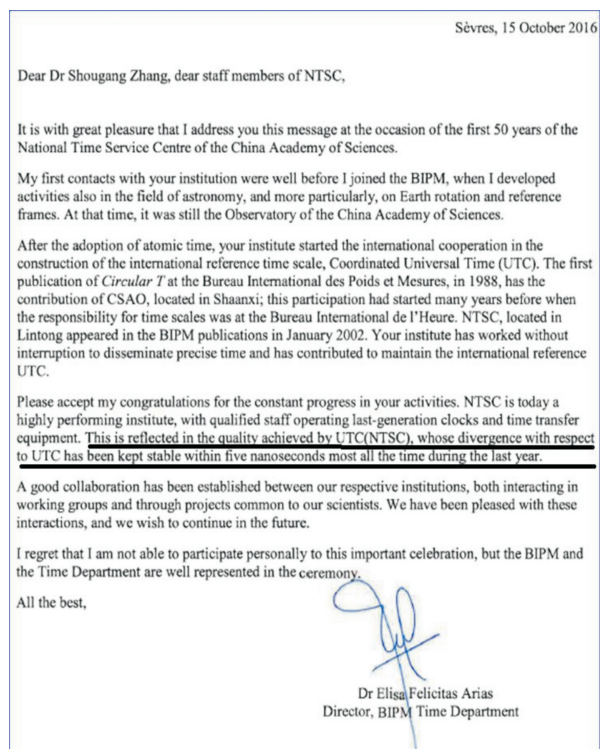


图 10 国际权度局时间部主任公函

6 2021 年,国家标准时间的偏差进入 ± 2.2 ns,性能达到国际第二,在国际原子时中权重达到国际第三

随着国家重大科技基础设施——高精度地基授时项目的实施,进一步提高国家标准时间的性能被提上了日程。国家授时中心主要从三个方面对标准时间的产生方法进行了改进。

首先是完成了守时算法和原子钟控制算法的

更新,其次是对钟房的温控和环境监测进行了升级。最明显的改善是时间比对链路的改进。

远程国际时间比对是各国国家标准时间产生中最大的不确定度来源,其占到时间保持总不确定度的 98%。从 2015 年开始增加的三条 A 类不确定度为 0.3 ns 的 GNSS 冗余远程时间比对链路的基础上,通过对卫星双向时间比对链路的升级,构建了我国新的国际时间比对系统,提升了国际时间比对的稳定性和可靠性;利用闭环校准方式直接对国际时间比对链路进行了整体法标定,提高了国际时间比对的准确性,将原来时间保持总不确定度由 5.1 ns 降低至 1.7 ns。2017 年开始,国际时间比对设备时延变化值保持在 0.5 ns 之内,优于国际权度局(BIPM)远程时间比对 1.5 ns 的总不确定度。

这一时期对跨区域多类型原子钟联合守时的算法也得到了突破性进展,通过在国内几个单位建立数据及信号比对复用信道的卫星双向时间比对系统、GNSS PPP 和共视时间比对系统,实现了几家单位的时间比对与数据交换。基于对原子钟异常检测方法的突破,提高了对原子钟性能的分析效率,攻克了分域加权、故障检测、容错控制实时反馈等关键技术,建立了异地氢铯联合守时技术体系,建成了异地多类型原子钟联合守时的演示验证系统,为多守时实验室数据共享使用奠定了基础。

以上几种措施,有效地改进了原子时的稳定度,国家标准时间的性能也得到极大的提升。从 2021 年 9 月开始,与 UTC 的偏差进入 ± 2.2 ns,各项性能均达到国际前二(表 1)。

表 1 2021—2023 年主要国家标准时间性能

排名	时间偏差最大值/ns	时间偏差 RMS/ns	30 d 频率稳定度
第一	1.8	0.65	2.23×10^{-16}
	美国 UTC(USNO)	美国 UTC(USNO)	德国 UTC(PTB)
第二	2.2	0.66	3.32×10^{-16}
	中国 UTC(NTSC)	中国 UTC(NTSC)	中国 UTC(NTSC)
第三	2.4	0.97	3.34×10^{-16}
	德国 UTC(PTB)	德国 UTC(PTB)	美国 UTC(USNO)
第四	2.9	1.17	3.42×10^{-16}
	俄罗斯 UTC(SU)	俄罗斯 UTC(SU)	俄罗斯 UTC(SU)
第五	4.2	1.27	5.34×10^{-16}
	法国 UTC(OP)	法国 UTC(OP)	法国 UTC(OP)

7 2024 年,国家授时中心对国际原子时贡献权重超过美国海军天文台,位居国际第二

国家标准时间应用多台不同种类、不同特性的守时原子钟综合产生连续稳定的时间信号,再经基准原子钟或国际比对校准,最后与基于地球自转测量的世界时协调产生。

小铯钟是应用最多的守时原子钟,一直被美国独家垄断。2018 年,美国政府以“出口威胁美国国家安全”为由对我国全面禁售,包括国际守时系统在内的我国多个重要基础设施面临无钟可用的风险。国家授时中心设计了不同于美国小铯钟的新型光抽运小铯钟方案,解决了激光自动稳频稳幅及环境适应性等难题,与企业合作研发了国际首款光抽运小铯钟产品,核心指标优于美国小铯钟。

光抽运小铯钟打破了美国逾半个世纪的垄断,不仅用于国家标准时间产生,还有百余台用于海军长河导航、北斗导航等国防重大工程和国计民生重要领域,化解了因美国禁运的风险。产品入选国际守时钟名录,并出口德国等国家,获省部级科技进步一等奖。

铷喷泉守时钟是应用激光冷却和原子操控实现的最新型守时原子钟,各国竞相研制。国家授时中心发明无相位突变微波干涉开关,将微波泄漏频移从 10^{-15} 降至 10^{-16} 量级,整钟天稳定度提升超 2 倍^[20]。使中国成为与美国并列的,仅有的两个实现铷喷泉守时钟的国家。经国际权度局连续 5 个月测评后,2022 年 10 月起用于国际标准时间产生。

铯喷泉基准钟是用于校准其他原子钟的基准钟。国家授时中心研制的我国首台超稳光生微波源,将我国常温微波源短期频率稳定度从 10^{-13} 提升至 10^{-15} 量级,喷泉钟短期频率稳定度提升 3 倍^[21]。发明全光学集成系统保障了国际领先的运行,我国实现了国家标准时间自主校准,无需依赖国际比对结果,仍能保证国家标准时间的准确性。铯喷泉钟通过国际时间频率咨询委员会频率基准工作组的评估,2022 年 8 月起校准国际标准时间。

世界时是国家标准时间的重要组成,从 20 世纪 90 年代开始,我国停止了世界时的自主观测,长期依赖国外数据。近十年,我国开始了自主的世界时测量系统的部署,但我国受版图限制,基线长度不

足,难以实现高精度测量,且单一手段测量的连续性和可靠性较差。国家授时中心设计了宽带甚长基线干涉(VLBI)系统、iGMAS 和数字天顶筒望远镜系统融合的世界时测量方案,构建了 VLBI 高精度的天线指向修正模型等,在我国首次实现了基于国内宽带 VLBI 系统的高精度世界时测量。多系统融合使用,实现了优于 100 ms 的世界时测量。该系统在 2024 年通过技术能力认证,在 2025 年 7 月通过了中国卫星导航定位协会组织的科技成果评价并获得特等奖,是我国目前唯一的世界时测量与服务系统,保障了天问一号、嫦娥五号、嫦娥六号等重大任务。

上述三类新型原子钟及世界时自主测量系统的成功装备应用,自主化能力显著增强的同时,我国在国际标准时间中的权重稳步提高(图 11),从 2021 年的 5.66% 提升到了 2024 年 17.59%,从 2024 年开始,我国的权重超过美国,达到了世界第二。

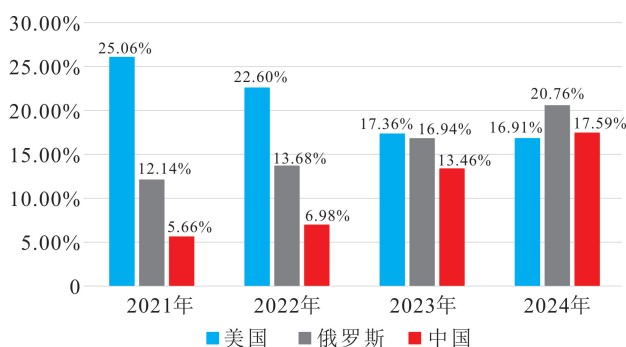


图 11 2021 年至 2024 年中美俄在国际原子时计算中的权重

我国的国家标准时间偏差(准确度)与稳定度也持续提高,近几年均位列世界前二,从 2024 年 1 月至文章完成审稿时(2025 年 11 月),我国国家标准时间的偏差已经小于 1.4 ns,超过了美、俄、德等国家,处于世界第一。

8 结语

协调世界时成为标准时间后,中国的国家标准时间稳步发展。从 20 世纪 70 年代起步,用国产铷原子钟和氢原子钟联合产生,到被国际时间局(1988 年以后的国际权度局)正式采纳,彰显了中国人解决困难的智慧。在改革开放年代,使用引进的设备,国家标准时间性能逐渐增强,跻身国际前五。最近十年,攻克核心关键技术,研制自主的守时设备和算法软件,国家标准时间的性能达到国际前

二,展现了我国科技发展的巨大进步,实现了时间频率领域科技自立自强的目标。

近年来,随着分布式异地联合守时系统建设的推进,国家标准时间的性能将进一步提高,可以预见,我国的标准时间将更加稳定、更加准确、更加安全。

参考文献:

- [1] 魏娜. 协调世界时 UTC: 历史和未来[J]. 测绘科技情报, 2008(4): 20-23.
- [2] 吴贵臣, 张挥. 原子时尺度 TA(CSAO)的建立[J]. 科学通报, 1981, 10: 606-608.
- [3] 苗永瑞. 三年来我国的授时工作[J]. 陕西天文台台刊, 1982, 5(1): 1-4.
- [4] 潘小培, 屠鲁征, 罗定昌. 综合原子时及其结果的分析[J]. 中国科学: A 辑 数学 物理学 天文学 技术科学, 1988(8): 851-860.
- [5] 卫国. 原子钟时间尺度的稳定性分析[J]. 中国科学: A 辑 数学 物理学 天文学 技术科学, 1992(1): 80-86.
- [6] 任燕, 尹学玉, 赵鸿. 氢钟在陕西天文台的运行及在守时工作中的作用[J]. 陕西天文台台刊, 1999, 22(2): 123-127.
- [7] 高俊法. CSAO 时间频率基准升级改造——六台新铯钟 (HP5071a) 运转良好[J]. 时间频率公报, 1998(2): 3.
- [8] 屈俐俐, 刘春侠, 王正明. 1998—2000 年 TA(CSAO) 的保持与 UTC(CSAO) 的控制[J]. 陕西天文台台刊, 2001, 24(1): 53-58.
- [9] 屈俐俐. CSAO 的 TA 与其控制的 UTC 及钟的权重 [C]// 全国时间频率学术报告会, 成都: 全国时间频率学术会议会务组, 2001: 181-185.
- [10] 王正明, 袁海波. 实时 UTC(NTSC) 的监控软件 (英文) [J]. 时间频率学报, 2002, 25(2): 101-109.
- [11] 袁海波, 王正明. UTC(NTSC) 自动监控软件的设计方案及计算机模拟[J]. 宇航计测技术, 2003(3): 1-5.
- [12] 袁海波, 李滚, 王正明. 小波包分解算法及 Kalman 滤波进行原子钟信号消噪的比较[J]. 电子测量与仪器学报, 2005, 19(6): 21-24.
- [13] 董绍武, 王正明. 国家授时中心的守时工作[J]. 时间频率学报, 2006, 29(1): 1-5.
- [14] 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.
- [15] 李变, 陈永奇. 远地时钟比对数据消噪方法研究[J]. 宇航计测技术, 2014, 34(1): 33-36.
- [16] 屈俐俐, 李变. 2014 版 EAL 算法中原子钟的权重分析[J]. 时间频率学报, 2018, 41(4): 333-339.
- [17] 张继海, 武文俊, 广伟, 等. 基于北斗共视的国际时间比对研究[J]. 时间频率学报, 2018, 39(6): 96-103.
- [18] 赵书红, 董绍武, 袁海波, 等. 异地多站联合守时方法研究[J]. 时间频率学报, 2021, 44(4): 288-299.
- [19] 李宗源, 袁海波, 张虹, 等. 基于低通滤波器的原子钟时差测量数据降噪处理及其性能分析[J]. 时间频率学报, 2024, 47(3): 171-179.
- [20] ZHANG H, RUAN J, LIU D D, et al. Development and preliminary operation of ^{87}Rb continuously running atomic fountain clock at NTSC[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022(71): 1008312.
- [21] WANG X L, RUAN J, LIU D D, et al. First evaluation of the primary frequency standard NTSC-CsF2 [J]. Metrologia, 2023, 60(6): 1-15.