

国外原子时频最新进展

潘 峰¹ 翟造成²

(1. 北京 5128 信箱 北京 100094)

(2. 中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

概述了传统原子频标的现状, 以及新型原子频标和国际原子时的研究进展。介绍了为适应高精度新型频标和国际原子时的比对需要而开展的远程时频传递技术。

关键词 原子 — 时间 — 频率

分类号 P127.12, TH714.1

1 引 言

19 世纪 50 年代初原子钟被发明, 随后在 60~70 年代, 不同机理、不同工作元素和不同结构的原子频标研究象雨后春笋般应运而生。然而, 几十年的实验和实用表明, 只有三种原子频标——铯、氢、铷经过一二十年的精炼和精工细琢后, 先后形成商品, 广泛应用于各个领域。这种状况一直持续至今。几年前, 一类准确度性能比传统原子频标高得多的新型频标——冷原子钟研制成功, 成为当前原子频标研究领域的又一个热点。冷原子钟在国际原子时系统的实际使用对国际原子时 (TAI) 产生了重要影响, 使 TAI 归算的取权方法得到了改变, 突出了优秀原子钟的性能。同时, 高性能原子频标的诞生和实际使用对高精度的时频比对手段提出了挑战, 几种新的地面远程和星-地远程时频传递技术进入了设想和实用研究阶段。

2 传统原子频标的现状

目前, 最为成熟、实用的传统原子频标仍为铯、氢、铷三种。几十年来, 巨大的技术改进不仅使这些频标的性能有了显著的提高, 而且在体积、重量及商品化程度也有十分惊人的改善和发展。

2.1 实验室型铯束频标

这种频标目前仍作为时频基准。20 世纪 80 年代以来, 美国、加拿大、德国、日本、法

国、意大利、俄罗斯以及中国在传统时频基准的研究和改进方面取得了很大成绩。尤其是德国技术物理研究院 (PTB)、加拿大国家研究院 (NRC) 和美国国家标准技术研究院 (NIST) 的铯基准准确度最高, 达 $(2\sim 0.8)\times 10^{-14}$, 它们的稳定度也都在 1×10^{-14} 以上。目前, 这三家的铯基准向国际权度局 (BIPM) 定向发送数据, 而且 PTB 和 NRC 的铯基准是作为钟连续运转的。这些铯基准的主要功能是提供准确的秒长。其它国家的铯基准的准确度也在 1×10^{-13} 左右。造成铯基准不准确度的因素仍是黑体辐射、邻线牵引和 Majorana 跃迁引起的频移。

2.2 小型商品铯束频标 (小铯钟)

小型商品小铯钟是目前国际上广泛使用的原子频标。老型号的小铯钟, 其准确度在 $(0.7\sim 1)\times 10^{-11}$ 。美国已不再生产该类小铯钟。1991 年, 美国 HP 公司推出了一种 HP5071A 新型小铯钟, 其准确度达 $(1\sim 2)\times 10^{-12}$, 20~40d 取样时间的稳定度可达 6×10^{-15} ^[1,2], 这种小铯钟广泛用于各国的原子时系统。目前, 世界上只有美国、瑞士、法国和俄罗斯等国能生产商品小铯钟。

2.3 铷原子频标

铷原子频标也是一种传统的实用型原子频标。尽管其性能指标较差, 但因这类频标体积小、价格低、预热快、功耗小等特点, 应用最为广泛。其稳定度在 10^{-12} 量级。前些年这种频标的改进方向主要在于扩大其在恶劣环境下的适应性、提高其可靠性和寿命。铷原子频标小型化的程度也十分惊人, 倾向于模块插件功能, 用于机载、导弹头、星载及其它战术武器上。体积在 10cm 见方的铷振荡器产品已不再稀奇。当然, 铷原子钟应用最广泛的领域还属通信系统, 据保守估计每年全球上百万台铷原子钟应用于该系统。因此, 铷原子钟的生产大多以流水线形式进行。

2.4 氢原子频标

氢原子频标是目前传统原子频标中稳定度最高的频标。其一天的稳定度为 10^{-16} 量级, 准确度为 $(3\sim 5)\times 10^{-13}$ 。几年前腔频自动调谐技术引入氢频标后, 氢频标的频率漂移大为改善, 每天 10^{-16} 量级的小漂移率使氢频标大量参加 TAI 守时工作。近年来, 主动型氢频标的主要努力方向在于制造既高性能又方便实用的小型化装置。此外, 经过多年的努力, 最近几年又出现了一种氢频标新产品——被动机理的小型氢原子频标, 其一月的长期稳定度可达 10^{-16} 量级, 漂移率为 $10^{-16}/d$ 。

目前, 保持氢频标商品生产的单位主要有美国的 Datum 公司、俄罗斯的 Quartzlock 公司、瑞士的 Neuchatel 天文台和中国的上海天文台等。

表 1 列出了商品型传统原子频标的主要性能特征。

表 1 常用商品型原子频标的主要性能特征

	商品铯钟		商品氢钟		商品铷钟		
	标准型	新 (优质) 型	主动型	被动型	普通型	极小型	
频率稳定度 (1s)	5×10^{-11}	5×10^{-12}	3×10^{-13}	1×10^{-12}	5×10^{-12}	1×10^{-11}	
	(1h)	4×10^{-13}	1×10^{-13}	1×10^{-14}	3×10^{-14}	2×10^{-13}	
	(1d)	7×10^{-14}	4×10^{-14}	5×10^{-15}	1×10^{-14}	3×10^{-12}	1×10^{-12}
	(10d)	6×10^{-14}	4×10^{-14}	2×10^{-15}	3×10^{-15}	3×10^{-12}	3×10^{-12}
频率准确度	3×10^{-12}	1.5×10^{-12}	3×10^{-13}	5×10^{-13}	1×10^{-11}	1×10^{-11}	
频率再现性	5×10^{-13}	5×10^{-13}	3×10^{-14}	1×10^{-13}	5×10^{-11}	5×10^{-11}	
频率漂移率	$1\times 10^{-15}/d$	$1\times 10^{-15}/d$	$1\times 10^{-15}/d$	$1\times 10^{-15}/d$	$1\times 10^{-11}/\text{month}$	$1\times 10^{-11}/\text{month}$	

3 新型原子频标

电磁囚禁技术的出现以及激光冷却、囚禁技术、激光抽运——荧光探测等技术的应用，对原子频标技术的发展产生了重要的影响。最近几年出现了准确度比最准确的传统热束铯基准还要好得多的冷原子装置——冷原子钟。

3.1 光抽运铯束频标^[3]

自从 1980 年法国原子钟实验室首次发表光抽运铯束频标实验成功后，光抽运铯束频标得到了重视。在这类原子频标中，用调谐于 D_2 线的两束激光来取代传统的选态磁铁进行能态选择；用荧光探测输出光信号来取代传统原子的热丝检测器；而微波相互作用范围保持不变。在抽运区，激光感应跃迁把几乎所有的原子抽运到所希望的 $F = 4$ ， $m_F = 0$ 能态。经过与微波腔相互作用后，产生超精细能级微波跃迁。检测是否产生了微波跃迁，然后再使用激光把产生微波跃迁回到 $F = 3$ ， $m_F = 0$ 能态的原子再抽运到高能级，诱发荧光。有没有产生这种跃迁就看是否产生荧光。荧光信号实现对压控晶振的频率锁定。

这种激光技术除改善束利用率外，也改善铯束频标的信噪比，大大提高其稳定度。同时，也消除和大大减小在传统磁态选择型铯频标中，由于原子在磁场中运动而受磁场大小和方向的突然变化所产生的能级跃迁（称 Majorana 跃迁）引起的频移以及二级 Doppler 频率修正的不确定性。

目前还有一种正在研制中的光抽运铯原子频标，称为弥漫激光抽运斜入射光检测铯原子频标。它是利用弥漫激光场对铯原子束进行光抽运以制备特定的原子态，并与斜入射光检测结合起来，实现用一个激光器同时获得抽运和检测两个不同的激光频率的效果，建立弥漫激光抽运斜入射光检测铯原子束频标系统。

弥漫激光抽运斜入射激光检测铯原子束频标这一新方案的提出，目的是要提高光抽运铯原子束频标的性能，尤其是长期稳定工作性能。弥漫激光场抽运能消除抽运激光频率噪声对频标信号的影响。这种激光场在与场中的运动原子相互作用时，如果激光频率有所变化，原子束中具有一定速率的原子将被来自某个适当角度的激光实现抽运，从而避免了激光频率噪声对频标信号的影响。另外，在此方案中只要用一只激光器就可以同时满足抽运和循环检测的要求而不需要另加光学移频装置（例如 AOM），简化了激光系统，十分有利铯束频标的长期稳定工作和其实用性。

美国 NIST 研制的光抽运铯束频标在实用中的准确度已达 1×10^{-14} 。法国时间频率研究所 (LPTF) 和日本综合通信研究所 (CRL) 的光抽运型铯基准多次评定的准确度都在 10^{-15} 量级。另外，加拿大的 NRC、英国的国家物理实验室 (NPL) 和中国北京大学都在积极开展这方面的研究。

3.2 原子喷泉钟

原子喷泉是科学家早年提出的设想，它以一个单微波腔来实现 Ramsey 分隔场的作用。原子束向上运动时通过腔一次，下落时再通过腔一次，从而完成 Ramsey 跃迁。由于当时热运动原子束中慢原子的缺乏和对原子束难于实现有效的减速，这种设想一直未能构成实用装置。20 世纪 80 年代后期和 90 年代以来，激光冷却与囚禁中性原子技术得到了发展，重新引发了人们对原子喷泉的兴趣。此后，应用激光冷却和囚禁技术的原子喷泉的研究在世界各国蓬勃

开展。由于这种频标原子速度的降低,极大地减小了所有与原子速度有关的各项不确定性,使其有着更高的性能,成为目前原子频标的研究热点。

3.2.1 铯原子喷泉钟^[4~6]

喷泉钟与传统原子钟的最大差异在于原子样品的制备。传统铯原子钟所用原子样品是由加热铯炉到 $90^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ 铯汽化经准直器扩散出来形成的铯原子束,相应原子热运动均方根速度为 $312\sim 336\text{m/s}$;而喷泉钟所用原子样品则是应用激光冷却和囚禁技术制备的线度 $\leq 1\text{cm}$ 的原子云,原子云温度控制在几个 μK ,相应原子热运动速度在 cm/s 量级(对铯原子而言)。根据制备的原子样品的差异,喷泉钟又称冷原子钟,确切地说,属冷原子钟一类。

铯原子喷泉钟所有部件处于一个超高真空容器中(真空度在 10^{-7}Pa 量级)。用磁光阱(MOT,即利用磁场和光场建立的原子阱)或光学粘团(OM)方法将铯汽泡扩散过来的极稀薄的铯原子冷却和囚禁于一段容器中心,形成温度极低($\approx 5\mu\text{K}$)、直径约 1cm 的冷原子云,然后用垂直激光(或垂直激光分量)移动该原子云。当原子云获得一定向上运动速度后关断水平和垂直激光,令原子处于自由运动状态,此后原子将在重力场作用下作弹道飞行,先后两次穿过微波谐振腔并落经一个探测激光束,最后获得与 Ramsey 钟跃迁相应的荧光信号。应用该荧光信号即可完成对实用频标(晶振)的频率锁定。这种喷泉型铯频标,由于用一个腔实现传统的 Ramsey 分离振荡场(两腔)的作用,所以 Ramsey 腔相位差大大减小,而且激光冷却使原子速度比传统装置中的原子速度降低了两个量级以上,从而大大削弱了影响铯基准准确度的主要因素。铯原子喷泉钟的准确度潜力很大,预期可达 10^{-16} 。

法国 LPTF 最早研制成功铯喷泉钟,其准确度为 3×10^{-15} 。德国 PTB 的铯喷泉钟 CsF1 从 1999 年开始运转,并向 TAI 提供数据。CsF1 的不确定度为 $1.4 \times 10^{-15}(1\sigma)$,频率稳定度为 $(3 \sim 5) \times 10^{-13}(\tau)^{-1/2}$ 。美国 NIST 的铯喷泉钟 NISF-F1 差不多与德国 PTB 的 CsF1 同时工作。为了比较不同结构的铯喷泉钟的性能,德国的 PTB-CsF1 和美国的 NIST-F1 两个喷泉钟,在 2000 年 8 月和 9 月期间进行了远程比对。使用卫星双向时频传递(TWSTFT)技术测得的两个喷泉钟的频差为 0.4×10^{-15} ,比对不确定度为 0.6×10^{-15} ;使用 GPS 载波相位法测得的频差为 0.2×10^{-15} ,比对不确定度为 0.7×10^{-15} ;使用 GPS 共视法测得的频差为 1.6×10^{-15} ,比对不确定度为 2×10^{-15} 。美国海军天文台(USNO)第一台铯喷泉钟目前的短期稳定度为 $2 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$ 。USNO 正在把喷泉钟加入守时钟组,以增强 USNO 主时钟组的稳定度,优化长期稳定度。

除了上述已研制成功铯喷泉钟的这些实验室外,目前,加拿大、我国北大、国家计量院和台湾大学等单位也正在积极进行铯原子喷泉频标的研究。

3.2.2 铷原子喷泉钟^[7~9]

铷原子喷泉与铯原子喷泉类似,也是采用激光冷却-囚禁和抛射技术。经过磁光阱的 ^{87}Rb 在 $1.85\mu\text{K}$ 温度下以 $3\sim 4\text{m/s}$ 的速度抛射。磁光阱中全固态激光器发射的 6 束囚禁激光在抛射以后,首先用调谐在 $6S_{1/2}F=2 \rightarrow 6P_{3/2}F'=1'$ 的光将原子抽运到 $F=1$ 态,在第一个腔中将原子从 $|F=1, m_F=0\rangle$ 切换到 $|2,0\rangle$ 态。调谐在 $6S_{1/2}F=2 \rightarrow 6P_{3/2}F'=2'$ 的光抽运仍保持在 $F=1$ 态的原子以提高 $|2,0\rangle$ 态的原子数量,在第二个腔中将原子从 $|2,0\rangle$ 切换到 $|1,0\rangle$ 态。

近期,美国的耶鲁大学、喷气推进实验室(JPL)、NIST,法国的 LPTF 以及 Paris-

Nord 大学等单位都在开展激光冷却的铷原子喷泉钟的研究。耶鲁大学的铷原子喷泉钟实现了 $2.1 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$ 的短期稳定度, 目前的工作重心放在新的态检测器和微波谐振腔的设计上, 以提高信噪比, 减小腔相移。喷泉钟性能的主要限制是冷原子碰撞频移。耶鲁大学的实验表明, 铷原子喷泉钟的冷碰撞频移比铯原子喷泉钟的冷碰撞频移小 30 倍。法国的 LPTF 实验发现, ^{87}Rb 喷泉钟比 ^{133}Cs 喷泉钟的冷碰撞频移至少小 70 倍。因此, 即使在铷喷泉钟中应用比铯喷泉钟密 100 倍的原子云也不会降低其准确度, 频率稳定度还可以提高一个量级。美国 NIST 的铷原子喷泉钟的一个主要特点就是应用超低速、高密度的原子云。铷原子喷泉钟预期的频率稳定度为 $10^{-14}/\sqrt{\tau}$ 。

3.3 离子阱频标^[10]

离子阱频标是将作为工作物质的离子(如 $^{199}\text{Hg}^+$, $^{171}\text{Yb}^+$, $^{87}\text{Sr}^+$ 等), 通过加在特定构型电极上的静电、磁场或射频场构成的离子阱的作用, 约束在超高真空的甚小尺度范围内, 然后利用此离子跃迁产生的鉴频信号, 将实用频标频率锁定在频率非常稳定、谱线 Q 值极高的离子跃迁谱线上。由于离子处于几乎不受干扰和外部参数十分稳定的环境下, 与探测场的作用时间很长, 因此比传统的原子钟具有更高的性能。

世界上第一台离子阱频标是 1981 年用 $^{199}\text{Hg}^+$ 离子在法国的原子钟研究所(LHA)研制成功的。用射频阱囚禁离子, 离子由电子束轰击汞蒸汽产生。用 $^{202}\text{Hg}^+$ 放电灯的 192nm 谱线进行光抽运, 使基态超精细结构 $F=1$ 态抽空。钟跃迁发生在 $F=1, m_F=0$ 与 $F=0, m_F=0$ 超精细子能级之间, 其频率为 40.507348GHz, 用荧光探测共振。早期的实验表明, 二级多普勒效应是影响该频标准确度和长期稳定度的主要原因。这需要降低离子的温度, 有两种方法: 激光冷却; 用低气压的缓冲气体(如氦气)与离子碰撞来降温。离子冷却后, 多普勒频移和加宽大为减小, 存贮时间可很长, 谱线 Q 值极高。但离子阱频标信噪比较低, 碰撞频移较大, 需要进一步解决。这也正是该频标自发明后几十年来未形成热点和进展不很显著的主要原因之一。

在实用频标方面, 1981 年法国 LHA 第一个汞离子频标取得成功后, 美国 HP 公司在使该种频标商品化方面作了大量的工作, 其产品的准确度已达 $(1 \sim 2) \times 10^{-13}$, 稳定度达 $(3 \sim 4) \times 10^{-11}/\sqrt{\tau}$ 。美国 NIST 正在进行 $^9\text{B}^+$ 离子频标的研究, 其准确度为 1×10^{-13} 。其它国家, 如日本 CRL、英国 NPL、法国 LHA 和我国中国科学院湖北物理所等单位都在积极开展这方面的研究。

3.4 光频标^[11,12]

像离子阱频标那样, 利用射频阱把离子储存与激光冷却方法相结合, 可以制成准确度为 10^{-15} 的光频标。光频标也属冷原子钟之列。

光频标是利用囚禁在射频阱的单离子(或原子)被激光冷却到几百 μK 的温度后, 由另一激光, 如 Nd: YAG 或 dye 激光频率数倍的光辐射信号去激励离子某个处于光频段的钟跃迁。具有很好不确定度的钟跃迁光学频率通过倍频链与微波频率连接起来, 能够转换成时间标准且具有相同的相对不准确度。利用频率梳能够与汞离子频标比对测量其性能。

光频标的跃迁频率由于很少受多普勒偏移、跃迁时间偏移、碰撞偏移以及电磁场偏移的影响, 因此准确度预期达 10^{-18} 。美国 NIST 建造了两台光频标: 一台是囚禁单离子 $^{199}\text{Hg}^+$, 使用 $^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$ 跃迁, 波长为 282nm; 另一台是激光冷却 ^{40}Ca 原子, 使用 $^1S_0 - ^3P_1$ 跃迁, 波

长 657nm。目前 Ca 频标的相对不准确度为 5×10^{-14} ，秒级频率稳定度已达 10^{-15} 量级，大大优于其它频标的短期稳定度。德国 Max-Planck 量子光学研究所和 Ludwig-Maximilians 大学物理系正在研制射频囚禁激光冷却铯离子光频标，使用 $^1S_0 - ^3P_3$ 跃迁，波长 236.5nm，测量的不准确度为 3×10^{-13} 。美国华盛顿大学物理系也在进行该种频标的研究，并且分析了激光冷却铯离子作光频标的优势，他们预期此种光频标的不确定度为 1×10^{-18} 。

3.5 组合原子频标

在原子频标研究领域，人们正在实现早已有过的动意，即整合不同种类原子频标的各自优势，组合成一个全性能、各项指标都较好的单一频标系统。

3.5.1 冷喷泉 - 氢脉泽组合频标^[13]

美国 NIST/JPL 正在进行一项计划，称为 PARCS (Primary Atomic Reference Clock in Space)。该计划的鉴频器是一个铯喷泉鉴频器，它的准确度为 5×10^{-16} ，稳定度为 $5 \times 10^{-16}/d$ 。该计划的本机振荡器(即飞轮振荡器)将用步进调节分辨率为 10^{-17} 的氢脉泽。也就是说，稳定度和频率调节精度优秀的氢脉泽被锁定在频率准确度优秀的铯原子喷泉上。这个组合原子频标将于 2007 年载于国际空间站 (ISS) 上，作为全球共享的高精度的国际时频标准。铯喷泉鉴频器由美国 NIST 研制提供，氢脉泽本机振荡器由美国史密松天体物理天文台 (SAO) 研制提供。美国耶鲁大学的空间铷喷泉频标也在研制之中。

类似地，在欧洲空间中心也正在实施一项称为 ACES (Atomic Clock Ensemble in Space)^[14] 的计划。该计划将为 ISS 的早期运行提供服务。

3.5.2 铷和铯双喷泉系统^[15]

喷泉频标具有很好的频率不确定度，将它们相互比较可以进行原子精细结构常数等基础物理测试，以及探索在相同物理实验条件下它们所能实现的极限性能指标。法国的 LPTF 正在建立一个铷和铯同时工作的双喷泉系统。该系统利用铷喷泉碰撞频移低的优势，并将具有优秀短期稳定度的超导蓝宝石振荡器 (SCO) 作为本振。另外，LPTF 的科研人员还理论分析和仿真讨论了原子反冲对频率的影响，初步结果表明原子反冲对频率漂移的影响为 $(1 \sim 2) \times 10^{-15}$ 。

3.5.3 氢脉泽钟组超稳系统^[16]

美国的 NIST 建立了一个由 5 台氢脉泽组成的钟组作为超稳时频标准。这个组合钟系统用于建立实时原子时 (ATI) 和用来产生精处理纸面原子时尺度 (ATIE)。它使 ATIE 在 4h~100 d 的稳定度优于 1×10^{-15} ，10d 取样时间的最好稳定度为 3×10^{-16} ，每年的频率漂移为 3×10^{-15} 。这个组合钟组比任何一个单个脉泽频标都优秀和可靠。

表 2 列出了新型原子频标的主要性能特征。

表 2 新型原子频标目前的主要性能特征

	光抽运铯钟	离子阱频标	铯原子喷泉钟	铷原子喷泉钟	光频标
稳定度	$6 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$	$1 \times 10^{-12}/\sqrt{\tau}$	$2 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$	$2.1 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$	$10^{-14}/\sqrt{\tau}$
准确度	$< 1 \times 10^{-14}$	$(1 \sim 2) \times 10^{-13}$	$(0.5 \sim 1) \times 10^{-15}$	1×10^{-15}	10^{-15}

4 国际原子时新进展^[17~19]

国际原子时 (TAI) 从 1973 年开始直接由原子钟时间比对数据计算得到。目前, 分布在世界上 30 多个国家近 60 个时间实验室的 200 多台原子钟的时间比对数据 (通过 GPS 共视法或 TWSTFT 法来获得), 定时传送到 BIPM 时间部, 由原子时算法进行加权平均计算得到 TAI, 然后变换得到实用的协调世界时 (UTC)。

根据 2000 年 BIPM 时间年报介绍, 目前 TAI 的准确度优于 1×10^{-14} ; 不确定度为 4×10^{-15} ; 平时时间 (20~40d) 的频率稳定度优于 1×10^{-15} 。

原子钟权重的大小是 TAI 归算时衡量原子钟长期性能的标志。从 1998 年 1 月开始, TAI 归算的取权方法有了改进, 由绝对权改为相对权, 即单台钟的相对权等于单台钟的绝对权除以所有参加钟的绝对权总和, 并规定最大相对权满权为 0.7%。但后来发现, 参加 TAI 计算的原子钟有 80% 都达满权, 这种情况的出现不利于突出优秀钟的作用。目前, 取权上限改为每月一次, 且不固定, 由当月参加计算的钟的数量决定。2000 年参加 TAI 归算的原子钟约 280 台, 其中高性能的 HP5071A 约 140 台, 氢钟 (具有自动调谐) 约 40 台。这两种原子钟贡献的权重分别为参加 TAI 归算的 14 种原子钟的第一位和第二位, 其权重合计占总权重的 86%。

世界上称得上独立原子时的实验室中, 水平最好的当属美国的 NIST、USNO、备用主钟站 (AMC), 日本的 CRL 和德国的 PTB 等, 它们的平均时间 (30d) 的稳定度在 $(1 \sim 3) \times 10^{-15}$ 之间。2000 年参加 TAI 校准的频率基准钟有: 日本 CRL-01 光抽运型铯基准, 准确度为 $(0.3 \sim 0.5) \times 10^{-14}$; 美国 NIST-7 光抽运铯基准, 准确度为 $(0.5 \sim 1) \times 10^{-14}$; 美国 NIST-F1 铯喷泉基准, 准确度为 1×10^{-15} ; 日本 NRLM-4 光抽运铯基准, 准确度为 3×10^{-14} ; 德国 PTB-Cs1、Cs2、Cs3 典型的磁选态型铯基准, 准确度为 $(0.8 \sim 1.4) \times 10^{-14}$; 德国 PTBCsF1 铯喷泉基准, 准确度为 $(1 \sim 2) \times 10^{-15}$; 法国 LPTF-JPO 光抽运铯基准, 准确度为 6×10^{-15} 。

2000 年 BIPM 统计表明, 每年参加 TAI 归算的 280 台钟中, 美国 USNO 就占 60 台, 其贡献的权重占 TAI 总权重的 27%; 德国 PTB 和加拿大 NRC 的铯基准是作为钟连续运转的; 俄罗斯全部用氢钟; 其它大多数的时间实验室用 HP5071A 和氢钟组建的联合钟系统。

值得一提的是, 原子钟的频率漂移率对钟性能权重的影响越来越显得重要。原子钟的长期稳定度和漂移率是原子钟长期性能的重要指标。在经典原子时算法取权方法中, 频率漂移率对钟权重的影响不可忽视。从 1998 年开始, TAI 的归算由原来双月速率方差取权方法改为月速率方差取权方法。这种取权方法对原子钟频率漂移率提出了更高的要求: 要求获满权的原子钟频率漂移率为 $1 \times 10^{-16}/d$ 或 $3.65 \times 10^{-14}/yr$ 。因此, 对于原子钟不能只重视稳定度而忽视其漂移率。

5 远程时、频传递技术进展

随着冷原子钟的诞生和应用, 原子钟的准确度和稳定度指标远优于它们之间远距离时频比对的技术指标, 这促进了高精度时频传递技术的不断发展。

5.1 地面远程时频传递

双向卫星时间传递 (TWSTFT)、GPS 共视以及 GPS 载波相位等技术是目前国际上高精度时频同步的实用手段。由 BIPM 公布的实测数据的统计分析表明, 这些远程时频传递技术用于时间同步的精度为 $2\sim 3\text{ns}$, 平均时间 (30d) 的频率稳定度为 10^{-16} [20,21]。

随着冷喷泉原子钟走向实用, 不同实验室频标之间的一致性需要比对验证。为此, 美国 NIST 的铯喷泉钟 NIST-F1 与德国 PTB 的铯喷泉钟 PTB-CSF1 采用上述三种时频传递技术进行了远程比对 [6]。这次比对, 也可说是用高精度的铯喷泉频标验证三种时频传递技术的比对能力。GPS 共视比对是用 BIPM Circular T 的数据修正精密轨道和电离层数据来进行的。TWSTFT 比对与采用 BIPM 的数据进行比对的方法相同。GPS 载波相位比对是用放在 NIST 和 PTB 两实验室的两个 Turborogue 接收机进行的。据保守估计, TWSTFT 和 GPS 载波相位技术给出的频率传输链的不确定度分别为 0.6×10^{-15} 和 0.7×10^{-15} , 而 GPS 共视链的不确定度约为 2×10^{-15} 。

为了进一步验证比对技术和铯喷泉钟的性能, NIST-F1 和 PTB-CsF1 又与 NIST 的组合氢脉泽钟组超稳频标进行了比对, 其估计的不确定度为 0.4×10^{-15} 。两个铯喷泉钟的不确定度为 1.5×10^{-15} , 综合的 (系统的和统计的) 不确定度为 1.7×10^{-15} 。可见, 铯喷泉钟的远程比对证实了 TWSTFT、GPS 共视和 GPS 载波相位时频传递技术的比对能力。

5.2 地面 - 空间时频传递 [13,22]

一些现有的空间系统, 如 GPS 和已建议或正在进行的空间计划, 如 PARCS、GESNS (Galileo European Satellite Navigation System)、CNGPS (Chinese Navigation GPS) 都需要地面钟和空间钟时间同步及频率比对。多链微波系统和脉冲激光技术是能满足星 - 地 T/F 传递要求的最精确的方法。在高精度的星 - 地 T/F 传递中需要对相对运动效应、对流层和电离层干扰, 以及相对论和重力效应进行修正。对信号传输干扰和相对运动效应进行处理的最有效的方法, 是测量这些干扰效应并实时地从传输数据过程中系统地消除它们。

5.2.1 微波 T/F 传递系统

该系统由地面站和空间站之间采用三链 (或四链) 微波线路来传输信息。应用微波频率比定时, 星 - 地钟的短期稳定度可在每次通过时段中由地面站连续测量, 单次通过时段的比对精度可达 1×10^{-14} , 多次通过的平均比对精度可达 10^{-16} 量级。长期稳定度可由时间传递方法测量。

空间钟产生的 X 带和 S 带的两个一路信号, 携带着 PRN 码调制的时间信息和载波相位的频率信息被送到地面站, 由地面站测量同一信号通过 X 带和 S 带同时传播的差分延迟和差分多普勒, 进而得到实际的电离层延迟和多普勒数据。随后地面站上的相干应答器返回信号到空间站, 这个信号同样携带时码调制时间信息和载波相位频率信息。空间站接收并处理信号后产生一路延迟和一路多普勒数据, 分别与二路延迟的 $1/2$ 和二路多普勒的 $1/2$ 作比较, 最终得到一路延迟和多普勒数据, 通过常轨数据通道实时地传送到地面站。这个方法可消除电离层中瞬时变化比传播时间长的电波传播效应。

5.2.2 激光时间传递系统

激光时间传递是远程钟时间同步比对的最准确的方法。地面激光站发射短激光脉冲到空间飞行体, 再由空间飞行体的角反射器阵反射回地面站。激光脉冲的发射时间 t_{e1} 和回到地面的时间 t_{e2} 由地面站的时间尺度记录下来。 $t_{e2} - t_{e1}$ 的 $1/2$ 提供激光脉冲到飞行体的时间延

迟。激光脉冲到达飞行体的时刻 t_s 由飞行体上时间尺度记录。比较 $(t_{e2} - t_{e1})/2$ 和 t_s 两个时刻之差便是星 - 地钟的时间差。激光时间传递系统的精度可达 20ps。

激光时间传递系统的唯一限制条件是气候, 因此它通常不作为常规的时频比对手段, 而是在星 - 地时间同步比对中用来作为校准系统。

参 考 文 献

- 1 Hp company, "Hp5071A primary Frequency standard" manual, 1991
- 2 CCDS, Annual Report of the BIPM Time section, 1996
- 3 王义道. 计量学报, 1993, 14(1): 76
- 4 Weyers S, Sohroderand R, Bauch A. In: John Vig ed. Proc. of 2001 IEEE International Frequency Control Symposium, Danvers: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2001: 46
- 5 Ekstrom C R, Burt E A, Swanson T B et al. In: John Vig ed. Proc. of 2001 IEEE International Frequency Control Symposium, Danvers: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2001: 53
- 6 Parker T, Jefferts S, Nelson L et al. In: John Vig ed. Proc. of 2001 IEEE International Frequency Control Symposium, Danvers: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2001: 63
- 7 Fertig C, Legere R, Suptitz W et al. In: John Vig ed. Proc. of 1998 IEEE International Frequency Control Symposium, Danvers: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1998: 18
- 8 Kuzundzic D, Jefferts S R, Heavner T P et al. In: John Vig ed. Proc. of 2001 IEEE International Frequency Control Symposium, Danvers: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2001: 33
- 9 Gibble K. In: John Vig ed. Proc. of 1998 IEEE International Frequency Control Symposium, Danvers: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1998: 41
- 10 董太乾. 计量学报, 1995, 16(4): 308
- 11 Drullinger R E, Diddams S A, Oates C W et al. In: John Vig ed. Proc. of 2001 IEEE International Frequency Control Symposium, Danvers: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2001: 69
- 12 Becker Th, Eichenseer M, Neusky A Y et al. In: John Vig ed. Proc. of 2001 IEEE International Frequency Control Symposium, Danvers: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2001: 76
- 13 Vessot R F C, Mattison M. In: John Vig ed. Proc. of 1998 IEEE International Frequency Control Symposium, Danvers: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1998: 336
- 14 Salomon R. In: John Vig ed. Proc. of 1998 IEEE International Frequency Control Symposium, Danvers: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1998: 305
- 15 Sortais Y, Bize S, Nicolas C et al. In: John Vig ed. Proc. of 2001 IEEE International Frequency Control Symposium, Danvers: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2001: 22
- 16 Parker T E. In: John Vig ed. Proc. of 2001 IEEE International Frequency Control Symposium, Danvers: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2001: 57
- 17 胡锦涛. 个人资料, 中国科学院上海天文台, 2002-02
- 18 高小珣. 见窦忠, 刘建荣等编. 全国时间频率学术报告论文集, 临潼: 国家授时中心, 2001: XIV
- 19 BIPM Annual Report, 2000
- 20 BIPM TWSTFT Manthly Report, 2000
- 21 BIPM Circular T, 2000
- 22 Vessot R F C, Mattison E M. In: Sydnor R L ed. Proc. of 23rd Annual PTTI Planning and Applicions Meeting, Colifornia: USNO and NASA, 1991: 401

Recent Progress in Atomic Time and Frequency

Pan Feng¹ Zhai Zaocheng²

(1. P.O.Box 5128, Beijing 100094)

(2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

The current status of traditional atomic frequency standards, and recent researches of new atomic frequency standards and horizontal of international atomic time (TAI), are reviewed. The progress of long-distance time and frequency standards for the comparison between TAI and new precise frequency standards is presented.

Key words atom—time—frequency

* * * * *

2003 年征订启事

《天文学进展》2003 年征订事宜委托天津市全国非邮发报刊联订服务部全权办理。刊物为季刊，每年的 3、6、9、12 月下旬出版，每期定价 10 元，全年 40 元（含邮寄费和包装费）。凡需订阅者请将订刊款通过邮局或银行直接按以下地址汇出即可：

邮政编码：300381

地 址：天津市大寺泉集北里别墅 17 号

户头全称：天津市河西区联合征订服务部

帐 号：605248-1046196

开户银行：工商银行天津市尖山分理处

电 话：(022) 23973378; (022) 23962479 **传真：**(022) 23973378

网 址：www.lhzd.com **E-mail:** lhzd@public.tpt.tj.cn

汇款时请注明“订阅 2003 年《天文学进展》(编号 5155)”字样和订阅份数、订户名称、收件人姓名、地址、邮政编码。联合征订部收到订刊款后即会奉上发票。本编辑部在刊物出版时即及时奉寄。凡在 2003 年中订阅者均能及时收到本刊。凡非通过上述渠道订阅本刊者，如有延误或寄失，本编辑部概不负责，敬请谅解。

欢迎订阅，谢谢支持！

《天文学进展》编辑部

2002 年 9 月 1 日