

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.03.04

可搬运光钟研究进展及展望

潘多, 刘天宇, 陈景标

(北京大学电子学院, 北京 100871)

摘要: 将可搬运光钟划分为高精度可搬运光钟、便携式可搬运光钟以及均衡性可搬运光钟三类, 分别介绍了三类可搬运光钟的工作原理及国内外研究进展, 并从稳定度、不确定度、系统集成度等角度分析了它们的性能优势和发展局限性。在此基础上, 展望了可搬运光钟在机动守时授时、测地学、空间探测、微型定位等场景中的应用前景, 并提出应通过降低核心激光部件的环境敏感性、提高激光部件与真空系统的稳健性等方式提升高精度可搬运光钟系统的机动性能; 应结合真空技术、人工智能等手段提高便携式可搬运光钟的长期稳定性; 应通过实验方案的迭代进一步提升均衡性可搬运光钟的精度。

关键词: 精密计量; 光频原子钟; 可搬运性; 研究进展

中图分类号: TB939; O59 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795(2023)03-0043-10

Research progress and prospect of transportable optical clocks

PAN Duo, LIU Tianyu, CHEN Jingbiao

(School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Transportable optical clocks are divided into three categories: high-precision transportable optical clocks, portable optical clocks, and balanced optical clocks. The working principles and research progress of these three types of transportable optical clocks are introduced, and their performance advantages and development limitations are analyzed from the perspectives of stability, uncertainty, and system integration. On this basis, the application prospect of transportable optical clock in mobile time service, geodesy, space exploration, micro positioning and other scenarios is prospected. It is proposed that the mobile performance of the high-precision transportable optical clock system should be improved by reducing the environmental sensitivity of the core laser components and improving the robustness of the laser components and vacuum system, the long-term stability of portable optical clocks should be improved by combining vacuum technology, artificial intelligence and other means, and the accuracy of the balanced portable optical clock should be further improved through the iteration of experimental schemes.

Key words: precision metrology; optical clocks; transportability; research progress

0 引言

人类对时间频率概念的认知历史悠久, 从茹毛饮血的日出而作日落而息, 到使用日晷、水钟等简易装置计量时间, 至近现代机械钟、电子钟

走进千家万户, 其精度对于人们的日常生活而言已然足够。但科技日新月异, 精密测量与前沿物理学的研究对计量工具的精度要求永无止境, 当宏观频率标准无法满足高精度应用需求时, 科学家们便把目光转向微观领域。原子内部电子态间发生

收稿日期: 2023-03-07; 修回日期: 2023-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(91436210)

引用格式: 潘多, 刘天宇, 陈景标. 可搬运光钟研究进展及展望[J]. 计测技术, 2023, 43(3): 43-52.

Citation: PAN D, LIU T Y, CHEN J B. Research progress and prospect of transportable optical clocks[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(3):43-52.



的量子跃迁会吸收或辐射一定能量的电磁波,其频率严格确定且只取决于原子本身的状态,不需依赖其它标准就能够实现频率的再现,为时间频率提供了一种更高级的标准——原子频率标准或原子钟。

世界上第一台原子钟诞生于1949年,随后20世纪50年代,基于铯原子基态超精细能级跃迁的原子钟问世,使时间的计量精度得到重大突破。铯原子钟的成功研制,促进了时间单位“秒”的定义变革。1967年国际计量大会通过审议,将“秒”定义变更为铯原子(^{133}Cs)基态超精细跃迁振荡9192 631 770个周期所需的时间。原子钟的出现,促使人类对时间的计量及与之相关的应用领域步入了新的历史阶段。由于时间频率是目前所有物理量中能够被测量得最精准的量,在计量学中,将其它物理量(如长度、电压等)通过物理关系转化为频率后进行测量已成为重要趋势。原子钟的应用非常广泛,可基于其进行物理常数和微观粒子结构测量、爱因斯坦相对论中时间延缓效应的验证、火山监测、量子模拟、深度绘测、引力测量等;作为全球卫星导航定位系统的核心,原子钟的准确度和稳定度直接影响导航定位系统的定位精度;空间原子钟的发展推动了卫星轨道精确控制、深太空导航以及航天器对接等技术的进步。

本文根据工作特点不同对可搬运光钟进行分类,之后具体阐述各类可搬运光钟的性能优缺点以及研究现状,并对可搬运光钟未来的应用场景和发展方向进行展望。

1 国内外可搬运光钟研究进展

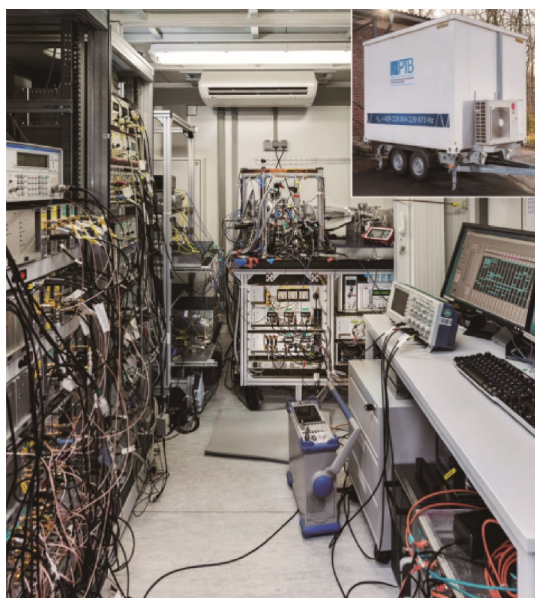
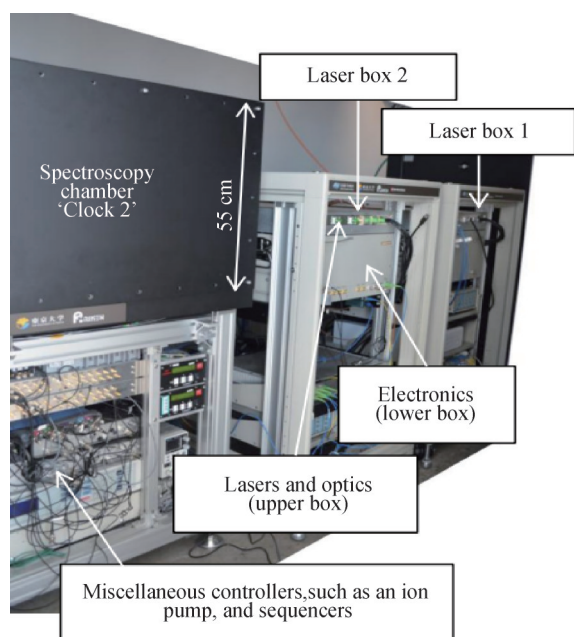
近二十年来,光频原子钟飞速发展,其不确定度已经领先微波原子钟2个量级以上。然而,受限于系统的复杂和体积的庞大,可搬运光钟尚未实现实际工程中的应用。近年来,以欧美国家为首的科研机构逐渐开始探索光钟应用的边界。本文根据目前国内外研究机构所报道的相关资料,将可搬运光钟划分为三类:①高精度可搬运光钟,即通过专门的工程设计将实验室内极为复杂的高精度原子钟进行整体集成保护,并在室外环境中模拟实验室内环境,将光钟搬运至外场完成测试。基于此方式的光钟多为冷原子或离子光钟,主要应用于前沿物理研究及测量,例如验证引力红移、引力波探测、暗物

质探测等。②便携式可搬运光钟,即基于光钟相较微波钟在频率稳定度指标方面的优势,由新方法、新技术和新设计所引导的小型光钟。该类可搬运光钟具有体积小、功耗低等特点,最终可替代现有的小型微波钟。③均衡性可搬运光钟,该类可搬运光钟性能及体积均介于前两者之间,既保留相对较高的稳定度,同时具有较好的机动性能,其对标产品类似于如今的商用氢钟。

1.1 高精度可搬运光钟研究进展

近年来已经有多家国内外单位对其基于高精度可搬运光钟的研究结果进行了报道,所采用原子体系包括中性原子光晶格与单离子体系。德国联邦物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)于2017年首次实现了长距离车载搬运和计量应用的可搬运铯原子光晶格钟,其内外部结构、腔体及稳定度指标如图1所示。车厢的内部尺寸为 $2.2\text{ m}\times 3\text{ m}\times 2.2\text{ m}$,实验装置整体质量为800 kg,系统稳定度为 $1.3\times 10^{-15}/\tau^{1/2}$ (τ 为积分时间),系统不确定度为 7.4×10^{-17} ^[1]。2018年,该研究组通过此可搬运光钟实现了相距90 km两地的重力势能的测量^[2],但由于可搬运原子钟的可靠性问题,其测量准确度低于当前最优的传统测地学方法的测量准确度。2020年,日本理化学研究所(RIKAGAKU KENKYUSHO, RIKEN)将可搬运光晶格钟置于450 m高的东京晴空塔上,并与地面光钟进行比对以测量引力红移,对广义相对论进行了验证。这项工作也证明了光钟在技术上可用于地壳形变、水准面测试等外场应用,分辨力达到厘米量级^[3]。日本RIKEN研制的可搬运铯原子光晶格钟如图2所示。意大利佛罗伦萨大学2014年研制的基于铯原子玻色子光晶格的可搬运光钟系统,不包含电学仪器的物理部分体积小于 2 m^3 ,不确定度为 7.0×10^{-15} ^[4]。德国杜塞尔多夫海因里希-海涅大学(Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, HHUD)、德国PTB、英国伯明翰大学(University of Birmingham, U. B)于2018年联合报道了同样基于铯原子玻色子光晶格的可搬运光钟,该光钟面向空间应用,光学体积小于 1 m^3 ,不确定度达到 2×10^{-17} ^[5]。

目前,国内已有多家单位参与高精度可搬运光钟的研制,包括中国科学院国家授时中心(Na-

图1 德国PTB可搬运锶原子光晶格钟^[1]Fig.1 Transportable optical clock of PTB based on Sr lattice^[1]图2 日本RIKEN可搬运锶原子光晶格钟^[3]Fig.2 Transportable optical clock of RIKEN based on Sr lattice^[3]

tional Time Service Center, NTSC)、武汉物数所(Wuhan Institute of Physics and Mathematics, WIPM)等。中国科学院国家授时中心于2020年在地面锶原子光钟的基础上完成了可搬运⁸⁷Sr光晶格钟的闭环工作,其真空系统尺寸为90 cm×20 cm×42 cm,除电学设备外整体体积为0.65 m³,分时自比对测量的频率稳定度为 $3.2 \times 10^{-15}/\tau^{1/2}$,系统不确定度为 2.3×10^{-16} [6-8]。中国中科院武汉物数所于2016年

报道了两台独立钙离子光钟的评估结果,相对不确定度达到 5.5×10^{-17} ,主要受限于离子微运动造成的频移^[9]。2019年,该团队精确测量并应用了钙离子光钟的“魔幻”射频驱动频率,将微运动所导致的不确定度降至 1×10^{-18} 以下,此时系统总不确定度为 2.2×10^{-17} ,受限于黑体辐射频移^[10]。在该项目组2020年的报道中,钙离子光钟系统的稳定度优化至 $4 \times 10^{-15}/\tau^{1/2}$,系统不确定度达到 1.3×10^{-17} [11-12]。在此基础上,该研究组构建了可搬运的钙离子光钟,因受限于黑体辐射频移,系统不确定度为 1.3×10^{-17} ,20天内正常运行率大于75%。移动超过1200 km后,参考实验室光钟系统,可搬运钙离子光钟测量绝对频率的不确定度为 5.6×10^{-16} 。该光钟在室外被用于测量重力势能,其测量不确定度达到0.33 m^[12]。中科院武汉物数所还开展了小型可搬运钙离子光钟的研究,采用多通道腔实现紧凑、简单的多波长激光稳频系统,从而降低了整个光钟的环境敏感性^[13]。该光钟系统可进行72 h连续闭环锁定,稳定度约为 $2 \times 10^{-14}/\tau^{1/2}$ [13],系统不确定度为 7.8×10^{-17} [14]。在最新报道中,该研究组研制了第二套模块化可搬运光钟^[15],系统不确定度达到 1.1×10^{-17} ,两套光钟比对得到 $1.2 \times 10^{-14}/\tau^{1/2}$ 的稳定度。该光钟的光学体积为0.33 m³,运输1200 km后于24 h内恢复单离子信号,测试35天得到连续运行率高达92%,并通过卫星链路溯源至国际原子时,不确定度为 5.3×10^{-16} 。中科院武汉物数所用于重力势能测试的搬运式光钟如图3所示。

搬运后的恢复时间和系统的连续运行率是衡量光钟机动性的重要指标,高精度可搬运光钟的

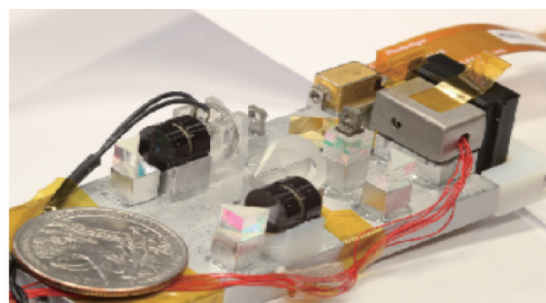
图3 中科院武汉物数所用于重力势能测试的搬运式光钟^[12]Fig.3 Transportable optical clock for Geopotential measurement in Wuhan Institute of Materials and Statistics^[12]

恢复时间可能为几天甚至半个月以上,随着集成化技术的日趋完善,有报道显示系统连续运行率可达92%^[15]。对以上两项性能的持续优化,将极大拓展高精度可搬运光钟的应用范围。

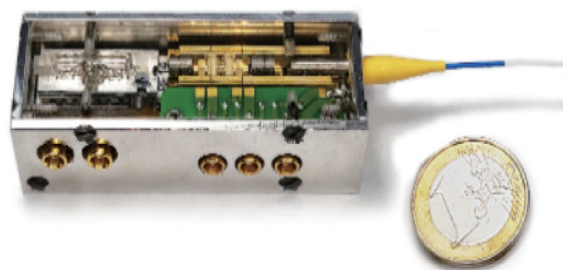
1.2 便携式可搬运光钟的研究进展

便携式可搬运光钟目前的研究方向集中在热原子/分子气室光钟的研究,主要包括基于碘分子及碱金属原子气室稳频的小型光钟研究。碘分子光钟主要由德国柏林洪堡大学(Humboldt-Universität zu Berlin, HUB)研究,2017年该研究组报道了一款光学尺寸为38 cm × 18 cm的小型光频碘分子光钟^[16];2019年,该研究组将光频标工程样机搭载于探测火箭,成功完成了空间应用实验^[17],系统秒级稳定度为 6×10^{-13} ,在100~1 000 s范围内稳定度达到 2×10^{-13} ,但1 000 s后稳定度逐渐恶化。铷原子光钟研究相对广泛,美国国家标准计量研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)于2020年报道了基于铷原子778 nm双光子跃迁的小型可搬运光钟^[18],其光学体积约为35 cm³,功耗为450 mW,稳定度达 $2.9 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$,1 000 s后稳定度明显降低。柏林洪堡大学研究团队于2021年报道了基于铷原子饱和吸收谱的小型光频原子钟,并面向纳米卫星进行在轨测试,该光钟物理系统整体尺寸为76 mm × 26 mm × 19.2 mm,质量73 g,功耗780 mW,系统秒级稳定度为 2×10^{-12} ,并于50 s后明显恶化^[19]。2023年,韩国标准与科学研究院(Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS)和全南大学联合报道了基于调制转移谱的可搬运的小型铷原子光钟,其光学部分整体处于91 mm × 169 mm × 60 mm的小盒子内,1 s前的短期稳定度达到了 $4.5 \times 10^{-14}/\tau^{1/2}$,但受温度等因素的影响,1 s后稳定度开始逐渐恶化^[20-21]。美国NIST铷原子光钟和柏林洪堡大学铷原子光钟如图4所示。

在形态上,便携式光钟已经逐步从集成型向芯片型扩展,应用于微型光钟的芯片型原子气室与芯片型光梳开始投入研制。美国NIST首先提出了采用硅片器件搭建芯片型光钟的重要概念,并于2018~2019年间采用波导结构、微型原子气室和微腔光梳搭建铷原子双光子光钟,微波信号稳定度为 $4.4 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$,持续下降至1 000 s。其中原



(a) 美国NIST铷原子光钟^[18]
(a) Rb optical clock at NIST^[18]



(b) 柏林洪堡大学铷原子光钟^[19]
(b) Rb optical clock at HUR^[19]

图4 微型铷原子光钟

Fig.4 Miniature Rb optical clock

子气室直径3 mm左右,光梳应用直径亚毫米量级的微谐振腔搭建而成^[22-24]。受限于芯片光梳倍频程的实现、荧光收集结构的集成、集成电路精度等因素,全芯片化的光钟系统至今尚无报道。美国NIST微型光钟系统如图5所示。

便携式光钟的研究在国内的相关报道较少,以北京大学最具代表。2017年,北京大学实现了自评估稳定度为 $1.2 \times 10^{-14}/\tau^{1/2}$ 的基于调制转移谱的420 nm小型铷原子光频标,系统光学总体积小于0.05 m³^[25]。2022年,北京大学报道了基于调制转移谱技术的便携式光钟最新研究成果^[26],实现了两套拍频测量稳定度为 $2.1 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$ 的基于459 nm激光的小型光频铯原子钟,如图6所示,锁定后激光线宽由69.6 kHz压窄至10.3 kHz。在芯片型光钟方面,国内还没有相关的研究成果报道。

总体来讲,基于热原子气室的便携式光钟短期稳定度多处于 $10^{-13} \sim 10^{-14}$ 水平,同时最大的局限在于长期稳定度无法保证,其根本原因是热原子气室中存在难以避免的多普勒频移、碰撞频移等,会使得原子跃迁频率受到外界环境中温度、压强等因素的影响而发生漂移。同时,受限于较小的整机尺寸,激光参数波动、磁场波动等因素也将影响光钟性能。

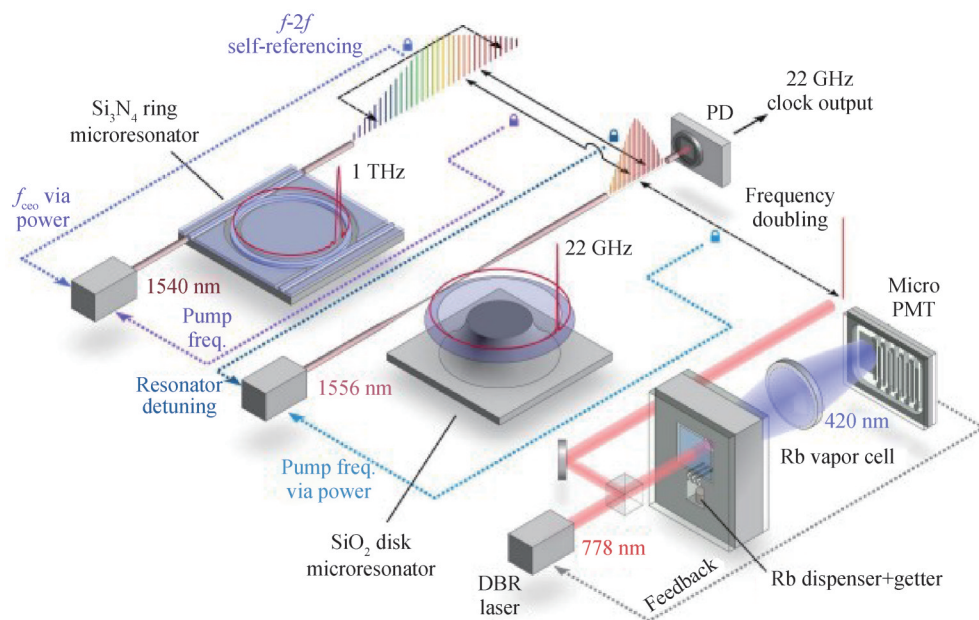


图5 美国NIST微型光钟系统^[23]
Fig.5 Chip-scale optical clock at NIST^[23]

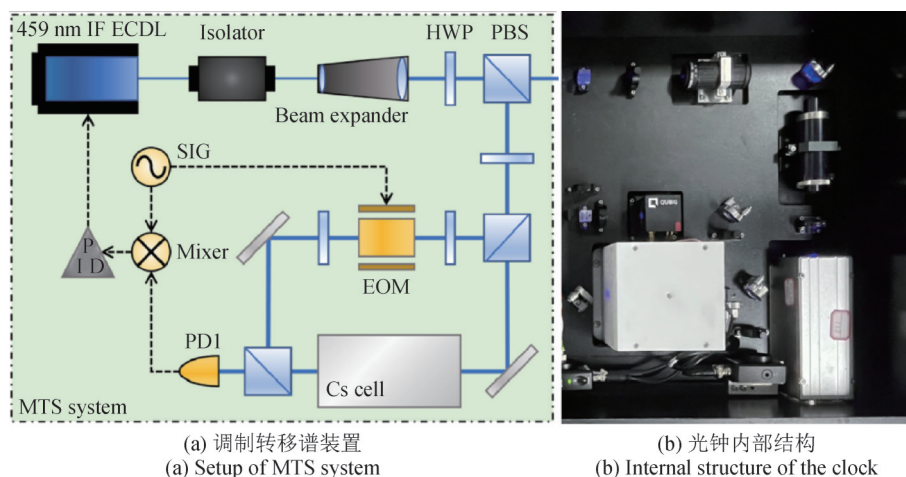


图6 北京大学459 nm小型铯原子光频原子钟^[26]

Fig.6 459 nm compact optical clock based on cesium cell in Peking University^[26]

1.3 均衡性可搬运光钟研究进展

如上所述，高精度可搬运光钟的稳定度较高，但机动性相对较差，便携式可搬运光钟机动性能和稳定度性能相互制约，在实际的应用中需要进行一定的取舍。均衡性可搬运光钟的稳定度性能和机动性能均介于二者之间。虽未有明确的文章或观点指出，但类比于微波钟的发展趋势，均衡性可搬运光钟应基于热原子束体系。目前关于原子束型光钟的研究集中在钙原子束光钟上，德国PTB于1999年率先实现了不确定度 1.3×10^{-12} ，秒级稳定度为 9×10^{-13} 的小型化钙原子束光钟，其频

率稳定度持续下降至1 000 s并达到 8×10^{-14} ，指标受限于光谱信号的信噪比^[27]。2006年，北京大学于国际上首次提出应用于热原子束的能级转移探测方案^[28]，该方案可极大地提高光谱信号的信噪比，从而显著提高小型热原子束光钟的性能指标，成为此后热原子束光钟的关键技术之一。2010年，西澳大学（University of Western Australia, UWA）采用能级转移探测技术，应用423 nm激光探测钟跃迁谱线信号，秒级稳定度达到 9.2×10^{-14} ^[29]。2019年，美国NIST研究组基于优化的能级转移探测方案，通过对激发态 3P_1 的能级探测，实现了高信噪

比的拉姆塞光谱,并测试得到10~1000 s内频率稳定度优于 2×10^{-16} 的钙原子束光频标^[30]。美国NIST钙原子束型光钟系统如图7所示。

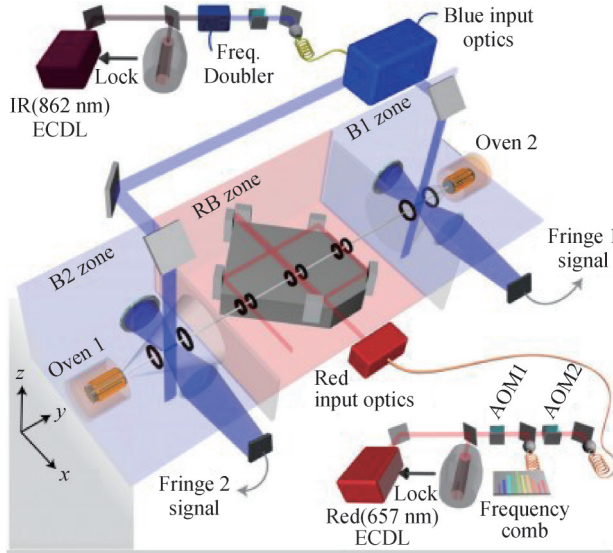
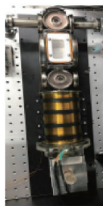


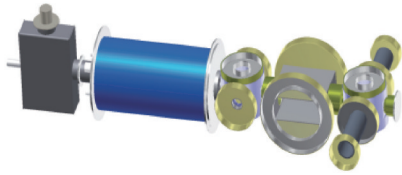
图7 美国NIST钙原子束型光钟系统^[30]

Fig.7 Optical clock based on calcium beam at NIST^[30]

国内研究原子束型光钟的机构主要为北京大学和北京无线电计量测试研究所(简称航天203所),北京大学于2017年实现了基于全密封钙原子束管的小型钙原子束光钟^[31],如图8所示,通过将法兰结构替换为全密封结构,能够避免搬运过程中容易产生的漏气风险,同时减小了真空系统的尺寸,两台光钟同步比对得到稳定度为 $5.5 \times 10^{-14}/\tau^{1/2}$,在1000 s达到 2×10^{-15} 。北京大学和航天203所联合研制的车载型搬运式光钟,目前处于工程化测试阶段。



(a) 实物拍摄图
(a) Real product photo



(b) 三维展示图
(b) 3D display diagram

图8 北京大学全密封钙原子束管^[31]

Fig.8 Fully-sealed calcium beam tube in PKU^[31]

综上所述,在世界范围内,可搬运光钟已经成为重要发展趋势,并在某些场景进行了应用验

证,其中以美国、德国、日本的研究最具代表性。国内的可搬运光钟研究起步相对较晚,但发展迅速,部分系统指标目前已居世界前列。芯片化光钟的研究在国内尚处于起步阶段,预期将在光子芯片集成、芯片级量子参考、微腔光梳等领域形成重要的发展方向与战略技术储备。世界各国可搬运光钟研究现状见表1。

表1 世界各国可搬运光钟研究现状

Tab.1 Current research status of transportable optical clocks around the world

| 国别 | 年份 | 研究机构 | 量子体系 | 稳定度 | 不确定度 |
|------|------|-------|--------------|---|-----------------------|
| 德国 | 1999 | PTB | 钙原子束 | $9 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$ ($\tau < 1000$ s) | 1.3×10^{-12} |
| | 2017 | PTB | 锶光晶格 | $1.3 \times 10^{-15}/\tau^{1/2}$ ($\tau < 1000$ s) | 7.4×10^{-17} |
| | 2019 | HUB | 碘分子 | $6 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$ ($\tau < 100$ s) | - |
| | 2021 | HUB | 铷气室 | $2 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$ ($\tau < 50$ s) | - |
| 美国 | 2019 | NIST | 铷气室 (芯片型) | $4.4 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$ ($\tau < 1000$ s) | - |
| | 2020 | NIST | 铷气室 | $2.9 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$ ($\tau < 1000$ s) | - |
| | 2019 | NIST | 钙原子束 | $6 \times 10^{-16}/\tau^{1/2}$ ($\tau < 10$ s) | - |
| 澳大利亚 | 2010 | UWA | 钙原子束 | $9.2 \times 10^{-14}/\tau^{1/2}$ ($\tau < 250$ s) | - |
| 日本 | 2020 | RIKEN | 锶光晶格 | - | 5.7×10^{-18} |
| 韩国 | 2022 | KRIS | 铷气室 | $4.5 \times 10^{-14}/\tau^{1/2}$ ($\tau < 1$ s) | - |
| 中国 | 2017 | PKU | 钙原子束 | $5.5 \times 10^{-14}/\tau^{1/2}$ ($\tau < 1000$ s) | 1.6×10^{-12} |
| | 2020 | WIPM | 钙离子 | $1 \times 10^{-14}/\tau^{1/2}$ ($\tau < 10000$ s) | 1.3×10^{-17} |
| | 2020 | NTSC | 锶光晶格 | $3.6 \times 10^{-15}/\tau^{1/2}$ ($\tau < 1000$ s) | - |
| | 2022 | WIPM | 钙离子 | $1.2 \times 10^{-14}/\tau^{1/2}$ ($\tau < 30000$ s) | 1.1×10^{-17} |
| | 2022 | PKU | 铯气室 | $2.1 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$ ($\tau < 100$ s) | - |

2 可搬运光钟发展趋势及应用展望

目前,商业化微波原子钟被广泛应用于通信、导航、时间同步等领域,但由于其量子体系本身的局限性,稳定度及准确度已经达到瓶颈,难以进行更高精度的计量,在此背景下,光钟已成为未来发展的重要方向。而克服庞大的实验系统,走出实验室,将是光钟向实际应用所迈出的第一步。

2.1 可搬运光钟发展趋势

光钟的可搬运性对于测地学、光钟守时等领域发展具有重要意义。更进一步,研究小体积、高稳定性、能够抵御外界冲击的光钟,将对于未来的光钟空间应用(如广义相对论验证、全球定位系统、深空宇宙探测等)研究提供关键技术保障。因此,可搬运光钟将持续追求更高的机动性及更高的精度。

高精度可搬运光钟的重要趋势为进一步提升系统的机动性能,主要包括:①提升激光器及超稳腔(Pound-Drever-Hall, PDH)系统的稳定性。作为光钟最脆弱的部分,激光器和超稳腔的可搬运性在某种程度上决定了光钟的机动性能。一方面应通过物理隔振、激光器及超腔的机械几何学设计、一体化加固等,避免搬运过程中对部件的冲击损伤,另一方面应简化冷却光、离化光、重泵光等激光的锁定系统,通过多面谐振腔或多波段稳频波长计进行各激光的锁定参考,从而提高稳频系统的稳健性。同时,对于真空系统,应通过密封型设计减少法兰等连接件的使用,避免搬运过程中由于松动脱落等原因造成系统损坏。②提升系统运行的自动化程度,包括激光锁频、时序控制、失锁后自动恢复锁定等,以缩短系统的恢复时间,并有效提升连续运行率。

便携式可搬运光钟的发展趋势为优化长期稳定度以及降低功耗成本,主要包括:①通过对原子气室的真空封装等手段,降低外界温度变化带来的频率漂移,或通过机器学习等手段对外界因素影响光钟频率的特性进行预测和消除,从而提升光钟的长期稳定性。②片上器件的研制,包括窄线宽激光器、隔离器、探测器,片上量子体系(如气室、冷原子、原子束)以及片上光梳等。与

此同时,发展基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Arrays, FPGA)、系统级封装(System In a Package, SIP)等技术的低功耗集成电路芯片,形成由分立元器件向全固态光钟芯片的进化。③便携式光钟适用于小体积、低功耗的机动平台,得以大规模应用的前提是实现足够的产能和成本的降低,因此实现便携式光钟的技术固化、大批量生产以及成本压缩是重要发展趋势。

均衡型可搬运光钟的主要发展方向为在保证均衡性能的情况下不断提升精度和集成性,包括:①在现有结构的基础上,通过引入速度光栅谱等新方案^[32],提升原子束的利用率,从而优化光钟的信噪比和稳定度。②在不损失稳定度的前提下,提高系统的集成性和稳定性,在车载等环境下连续工作。③保证系统长期连续运行的同时保持较好的稳定度,通过基准钟进行驾驭,实现光频守时授时。

2.2 可搬运光钟应用场景

2.2.1 机动守时授时

原子钟目前最重要的应用体现在计量标准,即计量单位的定义上。现在使用最普遍的单位制是标准度量衡单位(第十一届国际计量大会讨论通过),即国际单位制。该单位制中7个基本单位为长度单位米(m)、质量单位千克(kg)、时间单位秒(s)、电流单位安培(A)、热力学温度单位开尔文(K)、物质的量单位摩尔(mol)、发光强度单位坎德拉(cd)。其中秒定义在铯原子基态的超精细分裂能级上,具有最高精度。2018年11月,第二十六届国际计量大会通过了关于修订国际单位制的决议,将对千克、安培、开尔文和摩尔采用更加精确的量子化定义。由此可见,秒定义的准确度直接影响整个计量体系的准确度。目前,光频的测量准确度已超越目前用于秒定义的铯原子频率基准的准确度,提供了将秒定义在光频域原子钟的可能。2006年起时间频率委员会基于当前与主要铯频率标准的比对数据陆续选择了9种原子的跃迁频率作为“二级频率标准”^[33],推进秒的重新定义。随着光频原子钟性能的不提高,将秒定义在光频原子钟上也已成为一种必然趋势^[33-34],光钟秒定义精度将比现在的秒定义精度提高近3个数量级,从而提高目前与秒相关的基本

单位的精度,这也将促进其他单位回溯到频率或时间的量子化。一旦秒定义落在光频段,对于实现光钟之间的比对、完成某个地方的守时任务、建立地面的光钟网络而言,光钟的可搬运性将必不可少。

以GPS为代表的卫星定位导航系统是目前应用最为广泛的导航定位与授时手段,随着信息化、智能化设备的大量应用,现代化生产与战争对导航卫星的依赖日益提高,若卫星导航系统被干扰,将会带来难以估量的损失。以美国为首的诸多国家围绕GPS拒止环境下的导航定位技术展开了大量研究,可搬运光钟的研制则为此环境下实现机动性高精度时基及光钟网络的构建创造了条件。可搬运光钟可以通过更长时间的保持和使用抗干扰的光信号,在更少依赖定位导航系统的情况下实现更具弹性的计时能力。研究可连续运行且稳定性较好的机动守时光钟,通过基准光钟进行驾驭,为一定范围内的通信网络提供时基信号,从而全面提升测距、协同、导航等应用的时间精度。

2.2.2 大地精密测量及广义相对论验证

爱因斯坦的广义相对论理论曾预言时间膨胀效应:在引力场的作用下,时间的流逝快慢将受引力场大小的影响,引力越大,时间越慢。比较不同地点的原子钟,可以得到由于地球转动和相对高度导致的相对时间流逝变慢效应,并给出不同地方的高度差,凸显了可搬运光钟在测地学上潜在的应用前景。在地球上,当原子钟的高度每升高1 cm,钟的主频也将会升高 1.1×10^{-18} [35]。由于当前光钟的频率不确定度已经达到 10^{-18} 量级,采用光钟进行测试将能够分辨厘米量级的高度变化,从而得到地球信息(如质量变化、地下水位变化、冰川融化、海平面上升等),相较传统的测地学方法,“相对论测地学”能够显著提高大地测绘精度。爱因斯坦广义相对论的重要组成部分局部位置不变性表明,任何局域非引力实验的结果都与该实验进行的时间和地点无关。如果这一原理成立,那么非引力的基本物理常数随时间变化应保持不变。这一结论可通过引力红移来验证,即通过空间原子钟和地面原子钟的频率比对实现。因此,构建可搬运至地球表面不同位置、不同高

度的光频原子钟,对于迭代传统测绘技术、提高测绘精度以及提高相对论的验证精度具有重要意义。

2.2.3 空间光钟

随着太空技术逐渐成为各国争相发展的核心技术,原子钟作为其中定位导航应用的基础核心部件,在世界范围内得到广泛布局。目前在轨运行的空间原子钟中,精度最高的是中国科学院上海光机所在中国载人航天计划支持下所研制的空间冷原子钟,此成果证实了冷原子钟在空间运行的可行性 [36]。欧盟空间光钟项目为欧盟的七个组织于2006年起草拟并实施的空间探索计划,该计划在国际空间站及在轨卫星上放置多台光钟,通过与地面光钟比对,验证局部洛伦兹不变性与局部位置不变性,同时可以检验基本常数的变化。该计划得到欧洲航天局的资助,预计在2023年实现光钟的在轨运行 [37]。

在国际范围内,与空间光钟相关的计划还包括美国深空原子钟计划等,但目前尚无在轨运行的空间光钟,相关研究多处于地面原理样机的研制及测试阶段。德国相关机构针对欧空局(European Space Agency, ESA)提出的一系列空间计划展开工作,其中包括空间引力波探测、地球观测、气候探测等,这些任务需要高稳定性和低噪声的超稳激光源。此外,欧空局正在筹备验证的Kepler导航增强计划将在地球低轨道和中轨道部署导航增强卫星,卫星搭载光频原子钟,通过激光链路实现卫星间的时间同步和信号传输。

2.2.4 微型定位授时

便携式光钟可以应用于无卫星导航系统时的自主导航、守时授时和无人机群、单兵等协同作战场景,以及5G通信、敌我识别、自组织网、保密通信、电网同步等需要高精度时钟的场合。在军事应用方面,便携式乃至芯片级光钟可用于各种便携式单兵设备,使移动作战单元之间,以及移动作战单元与指挥系统之间保持时间同步。通过安装在导弹等武器上,可提高打击精度和弹间协同精度,从而完成精确打击或目标拦截任务。此外,便携式光钟还可应用于潜艇等水下设备的守时定位。

3 总结与展望

随着实验室光频原子钟准确度和稳定度的不断提升,光钟已经具有了超越所有传统测量手段的测量精度,在精密测量、卫星导航定位等领域的迫切应用需求下,可搬运光频原子钟已成为发展的必然趋势。基于各自的特点,高精度可搬运光钟、便携式可搬运光钟、均衡性可搬运光钟将在未来的发展和应用中承担不同使命。对于高精度可搬运光钟,需进一步提升系统的机动性能,包括降低核心激光部件的环境敏感性、提高激光部件与真空系统的稳健性、提升系统的自动化程度与连续运行率。便携式可搬运光钟的发展趋势在于结合真空技术、人工智能等手段提升长期稳定性,同时进一步降低功耗及成本,并进行芯片级技术攻关。而均衡性可搬运光钟将通过实验方案的迭代实现精度的大幅提升,同时扩展车载、机载等应用场景以实现机动守时。虽然前路困难重重,但光钟精度提高、可搬运性增强、稳定性提升已然是大势所趋。

参考文献

- [1] KOLLER S B, GROTTI J, VOGT S, et al. Transportable optical lattice clock with 7×10^{-17} uncertainty[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(7).
- [2] GROTTI, KOLLER S, VOGT S, et al. Geodesy and metrology with a transportable optical clock[J]. *Nature Physics*, 2018, 14(5): 437 – 441.
- [3] TAKAMOTO M, USHIJIMA I, OHMAE N, et al. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(7): 411 – 415.
- [4] POLI N, SCHIOPPO M, VOGT S, et al. A transportable strontium optical lattice clock [J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(4): 1107 – 1116.
- [5] ORIGLIA S, PRAMOD S, SCHILLER S et al. Towards an optical clock for space: compact, high-performance optical lattice clock based on bosonic atoms[J]. *Physical Review A*, 2018, 98.
- [6] WANG Y B, YIN M, REN J, et al. Strontium optical lattice clock at the National Time Service Center [J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(2).
- [7] LU X, YIN M, LI T, et al. Demonstration of the frequency-drift-induced self-comparison measurement error in optical lattice clocks [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2020, 59(7).
- [8] KONG D H, WANG Z H, GUO F, et al. A transportable optical lattice clock at the National Time Service Center [J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(7).
- [9] HUANG Y, GUAN H, LIU P, et al. Frequency comparison of two $^{40}\text{Ca}^+$ optical clocks with an uncertainty at the 10^{-17} Level[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(1).
- [10] HUANG Y, GUAN H, ZENG M, et al. $^{40}\text{Ca}^+$ ion optical clock with micromotion-induced shifts below 1×10^{-18} [J]. *Physical Review A*, 2019, 99(1).
- [11] GAO K L. The $^{40}\text{Ca}^+$ ion optical clock [J]. *National Science Review*, 2020, 7(12): 1799 – 1801.
- [12] HUANG Y, ZHANG H, ZHANG B, et al. Geopotential measurement with a robust, transportable Ca^+ optical clock [J]. *Physical Review A*, 2020, 102(5).
- [13] WANNG S, CAO J, YUAN J, et al. Integrated multiple wavelength stabilization on a multi-channel cavity for a transportable optical clock [J]. *Opt Express*, 2020, 28(8): 11852 – 11860.
- [14] CAO J, ZHANG P, SHANG J, et al. A compact, transportable single-ion optical clock with 7.8×10^{-17} systematic uncertainty [J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(4).
- [15] CAO J, YUAN H, WANG S, et al. A compact, transportable optical clock with 1×10^{-17} uncertainty and its absolute frequency measurement [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120.
- [16] DOTINGSHOFF K, SCHULDT T, KOVALCHUK E V, et al. A flight-like absolute optical frequency reference based on iodine for laser systems at 1064 nm [J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(6).
- [17] DOTINGSHOFF K, GUTSCH F B, SCHKOLNIK V, et al. Iodine frequency reference on a sounding rocket [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(5).
- [18] MAURICE V, NEWMAN Z, DICKERSON S, et al. Miniaturized optical frequency reference for next-generation portable optical clocks [J]. *Optical Express*, 2020, 28(17): 24708 – 24720.
- [19] STRANGFELD A, KANTHAK S, SCHIEMANGK M, et al. Prototype of a compact rubidium-based optical frequency reference for operation on nanosatellites [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 38(6): 1885 – 1981.
- [20] LEE S, LEE S B, PARK S E, et al. Compact modulation transfer spectroscopy module for highly stable laser frequency [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 146.
- [21] LEE S, MOON G, PARK S E, et al. Laser frequency sta-

- bilization in the 10^{-14} range via optimized modulation transfer spectroscopy on the ^{87}Rb D_2 line [J]. *Optics Letters*, 2023, 48: 1020 – 1023.
- [22] HUMMON M, KANG S, BOPP D, et al. Photonic chip for laser stabilization to an atomic vapor with 10^{-11} instability[J]. *Optica*, 2018, 5: 443 – 449.
- [23] NEWMAN Z L, MAURICE V, DRAKE T, et al. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock[J]. *Optica*, 2019, 6(5): 680 – 685.
- [24] SPENCER D T, DRAKE T, BRILES T C, et al. An optical-frequency synthesizer using integrated photonics [J]. *Nature*, 2018, 557(7703): 81 – 85.
- [25] ZHANG S N, ZHANG X G, CUI J Z, et al. Compact Rb optical frequency standard with 10^{-15} stability[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(10).
- [26] MIAO J, SHI T, ZHANG J, et al. Compact 459 nm Cs cell term stability[J]. *Physical Review Applied*, 2022, 18(2).
- [27] KERSTEN P, MENSING F, STERR U, et al. A transportable optical calcium frequency standard [J]. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 1999, 68(1): 27 – 38.
- [28] HUANG K K, ZHANG J W, YU D S, et al. Application of electron-shelving detection via 423 nm transition in calcium-beam optical frequency standard[J]. *Chinese Physics Letters*, 2006, 23(12): 3198 – 3201.
- [29] MCFERRAN J J, LUITER A N. Fractional frequency instability in the 10^{-14} range with a thermal beam optical frequency reference [J]. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 2010, 27(2): 277 – 285.
- [30] OLSON J, FOX R W, FORTIER T M, et al. Ramsey-Borde matter-wave interferometry for laser frequency stabilization at 10^{-16} frequency instability and below[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(7).
- [31] SHANG H S, ZHANG X G, ZHANG S N, et al. Miniaturized calcium beam optical frequency standard using fully-sealed vacuum tube with 10^{-15} instability [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 30459 – 30467.
- [32] SHANG H, PAN D, ZHANG X, et al. Ultra laser referenced on velocity-grating atom interferometry[J]. *Physical Review A*, 2022, 105.
- [33] RIEHLE F, GILL P, ARIAS F, et al. The CIPM list of recommended frequency standard values: guidelines and procedures[J]. *Metrologia*, 2018, 55(2): 188 – 200.
- [34] RIEHLE F. Towards a redefinition of the second based on optical atomic clocks [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2015, 16(5): 506 – 515.
- [35] TAKANO T, TAKAMOTO M, USHIJIMA I, et al. Geopotential measurements with synchronously linked optical lattice clocks[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(10): 662–666.
- [36] LIU L, LV D S, CHEN W B, et al. In-orbit operation of an atomic clock based on laser-cooled ^{87}Rb atoms[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1).
- [37] BONGS K, SINGH Y, SMITH L, et al. Development of a strontium optical lattice clock for the SOC mission on the ISS [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2015, 16 (5) : 553 – 564.

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 潘多 (1990—), 女, 助理研究员, 理学博士, 主要研究方向为新型原子钟。