

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311850

长期稳定度 2.6×10^{-16} 的工程化高可靠铷原子喷泉钟*

陈伟亮^{1,2}, 刘 昆^{1,2}, 郑发松^{1,2}, 戴少阳^{1,2}, 房 芳^{1,2}

(1. 中国计量科学研究院 北京 100029; 2. 国家市场监督管理总局重点实验室(时间频率与重力计量基准) 北京 100029)

摘 要:随着喷泉钟运行可靠性的提升和激光技术的日趋成熟,喷泉钟不仅可以作为基准钟驾驭原子时标,提升原子时标的长期稳定度和准确度指标,还可以紧驾驭氢钟作为复合守时钟使用。铷原子的基态超精细能级跃迁作为次级秒定义,具有碰撞截面小,冷却激光运行可靠性高的优势,更加适合工程化。中国计量科学研究院研制的工程化铷原子喷泉钟采用双金属微波真空一体腔提升系统温度适应性,采用小型化光学系统和笼式结构探测光系统提升了运行可靠性,实现了铷喷泉钟长期准连续运行,年运行率达到 97.5%。通过 1 年的比对测试,铷喷泉钟与 NIM5 铯喷泉钟频率比对的长期稳定度优于 3.7×10^{-16} ,单台喷泉钟的长期频率稳定度优于 2.6×10^{-16} 。

关键词: 铷; 喷泉钟; 长期稳定度; 准连续运行

中图分类号: TH714 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 410.55

Engineering highly reliable Rb fountain clock with a long-term instability of 2.6×10^{-16}

Chen Weiliang^{1,2}, Liu Kun^{1,2}, Zheng Fasong^{1,2}, Dai Shaoyang^{1,2}, Fang Fang^{1,2}

(1. National Institute of Metrology of China, Beijing 100029, China; 2. Key Laboratory of State Administration for Market Regulation (Time Frequency and Gravity Primary Standard), Beijing 100029, China)

Abstract: With the advancements in laser technology and improvements of the operation robustness, the fountain clocks can not only be used as frequency standards to calibrate atomic time scales, and improve the long-term stability and accuracy, but also be used to steer a hydrogen maser as a time-keeping clock. The ground state hyperfine transition of rubidium atoms, as a secondary representation of the second definition, has the advantages of small collision cross-sections and highly robust cooling lasers. It is a better candidate for commercial clocks. The prototype of a commercial rubidium fountain clock developed at the National Institute of Metrology (NIM) with a bi-metal microwave-vacuum integrated Ramsey cavity to increase the temperature adaptability of the system. A miniaturized optical system and a cage structure detection light system to improve operational reliability. A long-term quasi-continuous operation with an operation rate of 97.5% in a year is realized. Though the one-year comparison test, the long-term fractional frequency instability achieves 3.7×10^{-16} for the comparisons between the Rb fountain clock and NIM5 cesium fountain clock. The frequency instability of a single fountain clock is better than 2.6×10^{-16} .

Keywords: Rb; fountain clock; long-term instability; quasi-continuous operation

0 引 言

冷原子喷泉钟采用激光冷却和原子上抛等技术加长相干时间压窄钟跃迁谱线线宽,并利用同一微波腔实现 Ramsey 激励大幅降低不确定度。现行秒定义将铯原子的基态超精细结构能级跃迁频率定义为常数

$9\ 192\ 631\ 770\ \text{Hz}^{[1-2]}$,铷原子喷泉钟成为直接复现秒定义的实验装置。1995 年,法国巴黎天文台(Observatoire de Paris,OP)研制出世界上第 1 台铷原子喷泉钟^[3]。随后,美国的国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology,NIST)、英国的国家物理实验室(National Physical Laboratory,NPL)、德国的国家物理技术研究所(Physikalisch-Technische Bundesanstalt,PTB)等

收稿日期:2023-08-29 Received Date: 2023-08-29

* 基金项目:中国计量科学研究院基本科研业务费重点领域项目子课题(AKYZD2201-2)项目资助

多国开展原子喷泉钟的研究^[4-6]。目前,全世界有10个国家15台喷泉钟参与“驾驭”国际原子时,包括法国SYRTE-FO1、FO2、FOM和FORB^[7],德国PTB-CSF1和CSF2^[8],英国NPL-CsF2^[9],加拿大NRC-FCs2^[10],中国NIM5^[11],俄罗斯SU-CsF2^[12],意大利IT-CsF2^[13],日本NMIJ-F2^[14],瑞士METAS-FOC2^[15]以及美国NIST-F1^[16]和F2^[17]等。为提升喷泉钟不确定度和稳定度指标,各国计量院不断推进喷泉钟技术研究。法国的SYRTE-FO2喷泉钟通过采用绝热快通过技术,减小了冷原子碰撞频移不确定度。同时采用超稳低温蓝宝石振荡器作本地晶振,使得频率稳定度达到了 $1.6 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$,频率不确定度是 2.1×10^{-16} ^[18]。德国的PTB-CsF2喷泉钟通过采用利用光生超稳微波术,频率稳定度达到了 $2.5 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$,频率B类不确定度达到 1.7×10^{-16} ^[19]。意大利国家计量研究院(National Metrology Institute of Italy, INRIM)的IT-CsF2和美国NIST的NIST-F2喷泉钟,采用液氮冷却技术对激励腔和漂移区周围进行控温(80 K),极大地降低了黑体辐射频移引入的不确定度,综合B类不确定度分别达到 2.3×10^{-16} 和 1.1×10^{-16} ^[17,20]。加拿大国家研究委员会(National Research Council of Canada, NRC)的NRC-FCs2和英国NPL-CsF2喷泉钟采用水冷控温、光选态、激励腔的四端馈入技术^[9-10],实现了原子数目和密度的增加,冷原子碰撞频移和黑体辐射频移的不确定度均有减小,B类不确定度达到 2.3×10^{-16} 。中国科学院国家授时中心(National Time Service Center of CAS, NTSC)也开展了铯喷泉钟研制^[21],完成了不确定度评定,同时开展驾驭本地原子时的应用研究。

铷喷泉钟的研究相比铯喷泉钟起步较晚,但因为铷原子比铯原子更轻,其碰撞截面更小,相同条件下,铷喷泉钟的碰撞频移相比铯喷泉钟小1~2个数量级^[22-23],可实现更好的不确定度指标。而且铷喷泉钟实现激光冷却的工作波长为780 nm,是光通信1560 nm激光的倍频波段,激光技术成熟,易于实现更稳定可靠的激光输出,满足喷泉钟可靠运行的基本要求,因此具有更好的应用前景。法国SYRTE研制的铷原子喷泉钟作为次级基准钟参与驾驭产生国际原子时^[24],不确定度达到 4.4×10^{-16} 。美国海军天文台研制的4台铷原子喷泉钟直接紧驾驭氢钟^[25],最优的相对频率漂移率达到 $1.2 \times 10^{-18}/d$,长稳达到 5×10^{-17} ,并作为复合守时钟参与国际原子时TAI的计算,其中3台由于其优异的性能,在TAI计算中达到最大权。俄罗斯VNIIFTRI也在研制铷原子喷泉钟^[26],天稳定度优于 7×10^{-16} 。英国NPL的铷喷泉钟采用超高Q值激励微波腔以抑制分布腔相位差频移^[27],实现了频率不确定度 2.4×10^{-16} 。上海光机所研制的可搬运铷喷泉原子钟,该喷泉钟经过上海-北京长距离运输后,仍保持 8×10^{-16} 的频率天稳定度^[28]。NTSC研制了用于守时的

铷原子喷泉钟^[29],天漂移率优于 $2 \times 10^{-17}/d$,作为守时钟参与国际原子时TAI的计算。

中国计量科学研究院(以下简称计量院)从1997年在李天初院士的带领下开始了喷泉钟的研究。先后研制了NIM4、NIM5和NIM6共3台铷原子喷泉钟^[10,30-31]。目前,计量院的NIM5铷喷泉钟频率不确定度为 9×10^{-16} ,作为国家秒长计量基准同时参与驾驭产生国际原子时^[10]。NIM6铷喷泉钟在NIM5的基础上,利用磁光阱(magneto-optical trap, MOT)装载光学黏胶(optical molasses, OM)技术提升原子云分布均匀性,降低了碰撞频移,利用4端馈入Ramsey微波腔,进一步降低了微波腔相位差的不确定度^[31]。

计量院2018年开始铷喷泉钟研究^[32]。铷喷泉钟频率可以溯源到国家秒长基准,其频率稳定度和工作可靠性是主要关心的指标,因此计量院铷喷泉钟在主要设计与NIM5铷喷泉钟保持一致的基础上,对微波系统、光学系统和微波电控系统结构进行了优化设计,采用了低温度敏感率的双金属真空微波一体腔、小型化光学系统和笼式结构探测等技术,使其更易于维护,保证了铷喷泉钟的频率稳定度和工作可靠性。本文首先介绍喷泉钟工作原理,之后给出新的铷喷泉钟优化设计,并与NIM5铷喷泉钟频率进行比对,得到扣除氢钟漂移的频率稳定度,最后分析了影响和限制喷泉钟长期稳定性的可能因素,以期进一步提升铷喷泉钟指标。

1 喷泉钟工作原理

喷泉钟采用激光冷却技术和量子操控技术将量子参考系统的温度降低到几个 μK 并实现量子选态,不仅消除了一阶多普勒频移,延长了原子自由演化的时间,提升了原子探测的信噪比,进而大幅提升了稳定度,并且由于上升下落中与同一微波场作用两次完成Ramsey跃迁,相比于热铯束钟,降低了微波腔相位差频移,提升了频率不确定度指标。喷泉钟一般由4个系统组成,包括物理系统、光学系统、微波系统和电控系统。物理系统提供原子与激光、微波等相互作用的真空、电磁环境;光学系统提供激光冷却、囚禁、探测等操控原子所需的特定频率、幅度、偏振的激光;微波系统提供原子跃迁所需的微波信号;电控系统实现对激光、微波的时序控制以及数据的采集处理。

当喷泉钟的噪声主要来自于量子投影噪声时,喷泉钟的频率稳定度可以用Allan方差平方根表示为:

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{\pi Q_{aa}} \sqrt{\frac{T_c}{\tau}} \frac{1}{SNR} \quad (1)$$

其中, τ 为平均时间, T_c 为一个喷泉周期持续时间, $Q_{aa} = \nu_0 / \Delta\nu$ 为原子钟跃迁的品质因子, ν_0 为原子钟跃迁频率, $\Delta\nu$ 为Ramsey花样中心条纹的线宽(一般1 Hz左

右), SNR 为信噪比。当喷泉钟进入频率闭环锁定工作状态时,原子的上抛高度固定不变,所以喷泉周期 T_c 和品质因子 Q_m 也固定不变,一般分别为 $1 \sim 1.5$ s 和 9.2×10^9 (铯)/ 6.8×10^9 (铷),对喷泉钟长期稳定性的影响不大。短期的信噪比 SNR 主要受限于本振源的相位噪声和原子数的量子投影噪声及探测噪声。由式(1)可知,稳定度随着测量时间的加长,按照 $\sqrt{\tau}$ 下降。但是长期环境的变化,如环境温度和压力、磁场、探测光的变化等,将引起 SNR 长期的变化,主要有以下两方面:1)长期的温度波动导致微波腔的谐振系数的波动,改变相同微波频率和功率条件下原子的跃迁几率;2)长期的温度、压力的变化,导致激光功率的抖动,进而引起冷却囚禁原子数的波动,同时 C 场及温度的变化引进二阶塞曼频移和黑体辐射频移的变化。在喷泉钟的设计中,一般将关键的激励微波腔放置在真空系统中,降低外部温度变化的影响,但这样不仅使得系统复杂,同时不利于安装调试,尤其无法微调 Ramsey 腔的共振频率,可能会产生较大的失谐进而引起较大的腔牵引频移。为了提升铷喷泉钟长期稳定性和可靠性并易于装调,计量院铷喷泉钟采用了低温度敏感率的双金属微波真空一体化设计,利用双金属的不同温度系数,通过参数优化设计,降低了微波腔谐振系统的温度敏感性,并利用真空系统和微波腔本身的截止波导来隔离微波泄漏,极大的降低了微波泄漏的影响;计量院铷喷泉钟也通过降低光学系统光高,减少光程和弹性机械元件,优化光路等方法,实现了激光光路的小型化,结合笼式结构探测,降低了激光系统受温度波动的影响。

2 工程化高可靠铷喷泉钟

铷喷泉钟设计与 NIM5 铯喷泉钟基本一致,采用(111)MOT 布局冷却囚禁原子,向上向下各 3 束冷却光,配合一束重泵激光,制备铷原子到 $|F=2\rangle$ 态,原子上抛后依次:1)通过选态微波腔,选出 $|F=2, m_f=0\rangle$ 态原子到 $|F=1, m_f=0\rangle$ 态;2)经探测区,利用推光,推掉留在 $|F=2\rangle$ 态原子,实现选态;3) $|F=1, m_f=0\rangle$ 态原子继续上升,经过激励微波腔与微波作用,到达上抛顶点,下落后再次经过激励微波腔后与激励微波作用完成 Ramsey 激励;4)到达探测区,分别在上下探测区探测原子在 $|F=2\rangle$ 和 $|F=1\rangle$ 态的分布,归一化计算原子跃迁几率 $p = N_2 / (N_1 + N_2)$, N_1 、 N_2 分别是探测得到的原子在 $|F=1\rangle$ 和 $|F=2\rangle$ 态上的相对原子数。下面结合对铷喷泉钟的各系统介绍,给出 NIM 为实现工程化和高可靠铷喷泉钟,提升铷喷泉钟长期稳定性,在微波腔和光学系统等设计上做出的改进。

2.1 铷喷泉钟物理真空系统

铷喷泉钟物理真空系统如图 1 所示,分为上下两个部分。下方为长方体结构的可移动可调节水平的型材支架,采用软铁屏蔽(图中未给出)降低外界磁场对原子冷却和探测的影响,保证此区域内剩磁小于 100 nT。维持真空的两台离子泵对称分布在软铁屏蔽之外,固定在型材支架上。对称分布不仅降低了离子泵自身磁场对系统的影响,同时保证了真空工作的可靠性。软铁屏蔽上方板为加厚铝板,提供整个物理真空系统支撑。软铁屏蔽之内则为物理真空系统的 MOT 部分、选态微波腔、探测腔;冷却囚禁原子所需的地磁补偿线圈, MOT 磁场所需反亥姆霍兹线圈以及提供量子轴所需的轴向场线圈。MOT 区上按(111)布局安装有 3 对相互垂直的个冷却光注入光筒和 1 个重泵光光筒,导入准直的冷却/重泵光。一个包含 5 g 铷原子的铷泡放置在一个铜柱内,通过长管与 MOT 区相连,夹破铷泡并加热铜柱可以向 MOT 区注入铷原子。探测区则安装有笼式探测光系统,并在探测光垂直方向安装荧光收集系统,采集原子荧光信号。选态微波腔位于 MOT 区和探测区之间,采用铝制圆柱形腔,单端馈入微波,上下端盖上的截止波导长为 1 cm。真空系统上方是由 3 层坡莫合金围成圆柱形磁屏蔽空间,轴心位置为低温度敏感率双金属微波真空一体化腔,其下端连接探测区,上端为漂移区。漂移区上端连接有复合泵,包含吸气剂泵和离子泵,保证漂移区真空度优于 10^{-7} Pa。在内层磁屏蔽与真空腔体之间,有一个包裹整个漂移区及微波真空一体化腔的 C 场线圈,提供 Ramsey 作用期间的轴向场。C 场线圈采用双绕方式缠绕在一个铝制筒体上,并在其上下端口各绕有端口补偿线圈,提升轴向 C 场均匀性和均匀区长度。

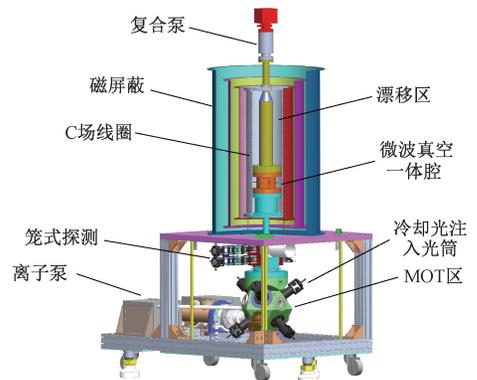


图 1 物理真空系统设计

Fig. 1 Design of the physic and vacuum system

2.2 低温度敏感率双金属微波真空一体化腔

低温度敏感率双金属微波真空一体化腔的设计如图 2 所示。上下端盖及截止波导采用无氧铜材质;腔体则采

用钛金属材质,为增加电导率,腔体表面镀铜+金;微波馈入矩形副腔采用无氧铜材质。两个微波馈入口在腔体中间对称分布,直径为5 mm,采用陶瓷密封,以保证真空。端盖与腔体之间采用钢丝密封,减少微波腔内部向外泄露微波的可能。腔体上下各有开孔连接上方漂移区和下方探测区,均采用钢丝密封方式保证真空要求。作为连接上下的关键部件,微波腔体必须采用强度足够且无磁的金属,纯钛金属是相对比较可靠和经济的选择。该腔的品质因子为17 000,利用控温测试其温度系数表明,在温度变化范围22.48 ℃~37.48 ℃内,其频率变化的温度系数为0.73 kHz/℃,比通用的单一无氧铜腔小约150倍^[33]。

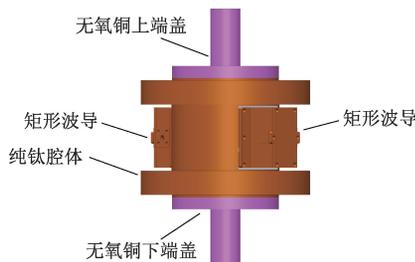


图2 微波真空一体腔

Fig. 2 Combiner cavity for microwave and vacuum

2.3 小型化光学系统

铷喷泉钟的光学系统设计如图3所示,图中HP代表半波片旋转偏振分光镜组合,AOM为声光调制器,M为反射镜,FC为光纤耦合器(各相同器件在图中只标注了一个)。该系统包括稳频主激光源、稳频重泵激光源和小型化光学系统。主激光采用自带稳频模块的倍频光纤激光器,提供频率锁定在 ^{87}Rb 原子 $|F=2\rangle \rightarrow |F'=1 \times 3\rangle$ 的交叉线上,线宽约为250 kHz的激光。重泵激光则采用DFB激光器,输出频率锁定在 $|F=1\rangle \rightarrow |F'=1 \times 2\rangle$ 交叉线上的激光。两台稳频激光源都上架安装,激光分别通过保偏光纤传输到小型化光学系统。小型化光学系统需要对激光的频率、偏振和功率控制,以实现原子的冷却、上抛和探测等功能。主激光光纤后输出功率为1 W,经过第1个HP组合调节功率固定偏振方向后,依次通过第2个、第3个HP组合分出探测光部分、向上冷却光部分和向下冷却光部分。各部分光均通过相应的AOM进行二次通过移频。AOM移频之后的探测光直接耦合进保偏光纤,传输到笼式探测光系统用作探测光;AOM移频之后的向上和向下冷却光则各自通过相应的HP组合再分为3部分,分别耦合进6根保偏光纤,传输到MOT腔上的冷却光注入光筒,用作向上和向下冷却光。重泵激光光纤输出功率为10 mW,经HP组合分光固定偏振方向之后,单次通过AOM移频78.5 MHz到 $|F=1\rangle \rightarrow$

$|F'=2\rangle$ 线,分为两部分耦合进光纤,一部分用作冷却重泵光,一部分则通过保偏光纤传输到笼式探测光系统,用过探测重泵光。

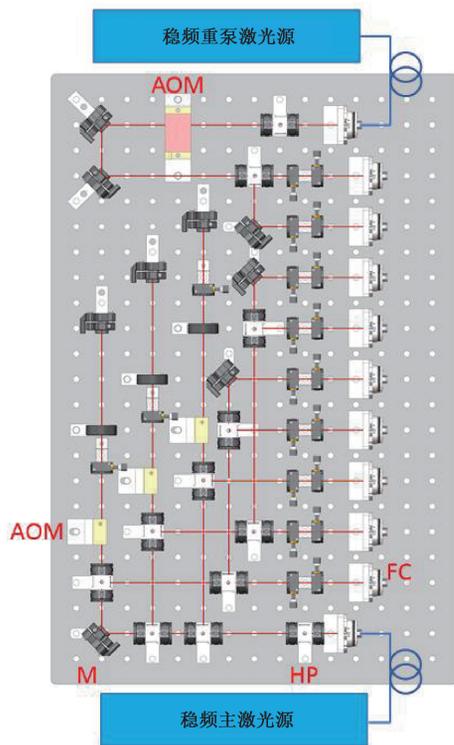


图3 小型化光学系统

Fig. 3 Compact optical system

为提升光路稳定性,小型化光学系统在控制成本,保证可调性的同时,对光路布局、光高、光程、调整架等方面都做了优化设计。小型化光学系统采用标准25 mm孔距的光学面包板和通用的光学元件安装架,以控制成本;其光路的光高根据通用安装架匹配相应定制转接件优化到27 mm;其光路设计按标准安装孔中心连线横平竖直布局,光路走向固定,不用大范围的俯仰和水平方向调节,减少光路中弹性调节架的需求;其必要的俯仰和水平方向调节通过HP实现;其中向上、向下、探测AOM采用竖置方式固定,相对于图中水平放置的重泵光AOM,在保证AOM效率优化功能的同时实现光路紧凑;其采用猫眼二次通过AOM方式调整激光频率和功率,缩短了激光光路,使个小型化光路尺寸缩小到0.6 m×0.4 m。通过将整个小型化光学系统包裹并加热测试其中最长的光纤耦合光路的耦合效率随温度的变化情况^[32],表明在系统温度从23 ℃上升到30.4 ℃并重新冷却到23 ℃的3 h实验过程中,该光纤耦合光功率的波动小于10%。

2.4 笼式结构探测

探测光和探测重泵光通过保偏光纤传输到笼式结构探测光系统,形成上探测光和下探测光,分别用于探测铷

原子在基态超精细能级 $|F=1\rangle$ 和 $F=2\rangle$ 上的原子分布。如图4所示,笼式结构探测光系统由两套30 mm 笼式构成,上探测和下探测中心间距45 mm,各有两部分,通过转接件固定探测区的两侧,形成上、下探测光两个驻波场。上探测光由探测光光纤法兰盘引出探测光,通过PBS固定偏振方向后由透镜准直,经矩形窗口截取宽16 mm,高8 mm 矩形光束,通过一个50:50非偏分光镜分光,透射部分通过光阑和半波片之后经过探测区达到反射镜,之后形成上探测光驻波场。50:50非偏分光镜分光的反射部分垂直向下反射到下探测笼式结构的10:90非偏分光镜,90%的反射光依次通过光阑、半波片、探测区之后由下探测的反射镜反射形成下探测光驻波场。探测重泵光则由安装在下探测笼式结构上的光纤法兰盘引出,经PBS固定偏振方向、透镜准直、矩形截取之后,通过10:90非偏分光镜透射,与下探测光重合,用于重泵浦 $|F=1\rangle$ 原子。笼式结构探测光系统通过转接件直接固定在探测区两端,缩短了探测光光程,提升了光路稳定性。

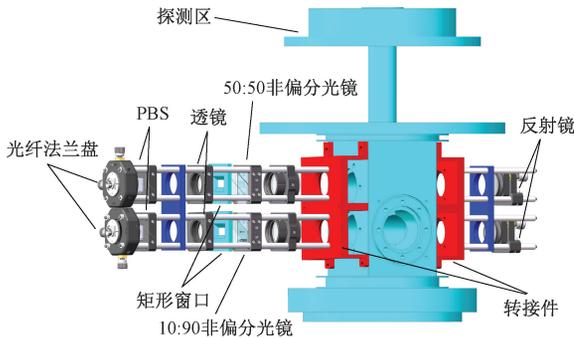


图4 笼式结构探测光

Fig. 4 Detection light based on the cage system

2.5 微波和电控系统

铷喷泉钟的微波系统由选态微波源、激励微波源及微波相位控制箱。选态微波源基本构成成为一个6.8 GHz 介质振荡器(dielectric resonator oscillator, DRO) 和一个34 MHz 直接数字综合器(direct digital synthesizer, DDS), DRO 和 DDS 都直接参考到氢钟输出100 MHz 信号,输出6.8 GHz 和34 MHz 信号单边带混频得到6.834 GHz 选态微波信号,其功率衰减和开关设置在34 MHz 信号上。激励微波源则由1个6.9 GHz DRO 和1个34 MHz DDS 混频得到6.934 GHz 微波信号,再与1个100 MHz 干涉开关混频,得到激励原子跃迁所需的6.834 GHz 激励微波。激励微波信号的开关由100 MHz 干涉开关实现,幅度扫描控制则由加在34 MHz 信号的电调衰减器控制。微波相位控制箱将激励微波源输出的激励微波信号分为两束,通过匹配控制两束微波信号的相位和功率,供给物理系统上双端馈入激励微波腔相位和幅度匹配的微波信号。

铷喷泉钟电控系统基于NI公司的软硬件实现时序控制与数据采集处理。其中磁场补偿场的控制采用压控电流源实现,可以在ms量级实现磁场的调节控制,满足补偿场与轴向场在原子运动不同高度时的方向和大小需要,有效抑制了Majorana跃迁。时序控制周期的调节精度可以达到0.01 ms,实现了对后冷却参数的精确调节。

3 铷喷泉钟长期稳定度

3.1 铷喷泉钟长期稳定度

铷喷泉钟工作时以氢钟输出100 MHz 信号为本振源,测量铷喷泉钟与氢钟信号的频率差值。经过10天连续频率锁定测试,铷喷泉钟的100 s 稳定度和天稳定度分别达到了 1.5×10^{-14} 和 4.1×10^{-16} [28]。之后铷喷泉钟保持频率闭环锁定工作,每天给出一个平均频率值和对应平均原子信号大小(原子数)。喷泉钟锁定长期频率变化如图5所示,其中圆点为铷喷泉钟(RbF2)频率数据,方块为同期运行的铯喷泉钟(NIM5)频率数据,数据起止日期为2022年5月20日~2023年5月20日,对应为MJD 59 719~MJD 60 084。期间因为激光器失锁,AOM 功放烧坏、光开光遮光片脱落等因素造成等因素,造成RbF2无数据的时段按点数计除,实际RbF2准连续运行1年的运行率到达97.5%。两台钟以同一个氢钟输出的100 MHz 信号作为参考,数据显示了两台喷泉钟由氢钟引入的同步漂移。对两台喷泉钟频率数据做差,扣除氢钟频率漂移影响后,两台喷泉钟频率的长期稳定度如图6所示。图中圆点为RbF2的频率稳定度,其天稳定度为 6.5×10^{-16} ,16天稳定度为 3.8×10^{-16} ,32天稳定度为 7.9×10^{-16} ,长时间的稳定度向上漂移主要是氢钟的自身频率漂移引进。方块数据为NIM5与RbF2做差后的频率稳定度,其中天稳定度为 8×10^{-16} ,16天稳定度为 3.8×10^{-16} ,32天稳定度为 3.7×10^{-16} 。考虑到该频率稳定度为两台喷泉钟频率比对的结果,评估铷喷泉钟的长期频率稳定度可以除以 $\sqrt{2}$,单台喷泉钟的长期频率稳定度达到 2.6×10^{-16} 。

3.2 长期温度变化对稳定度的影响

铷喷泉钟和NIM5处于同一恒温恒湿实验环境内,实验室温度长期处于23℃,因温控的温度记录最大容量为20天,如图7所示为连续监测20天的实验室温度波动情况。最后两天温度出现了跳变,最大温度波动范围小于2℃,但相应时间的铷喷泉数据未显示相应的变化。根据文献[33]数据,考虑1年之内的温度波动小于2℃,可以得到采用低温温度敏感率微波真空一体腔的铷喷泉钟受温度变化引起的频率变化小于 $4.2 \times 10^{-18} \tau^{-1/2}$,在长期稳定度上带入的影响很小,可以忽略。

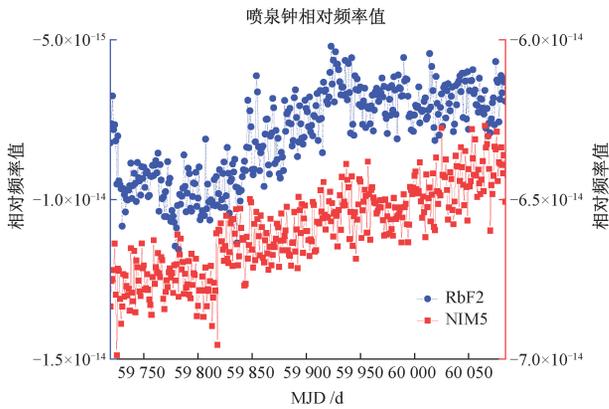


图5 喷泉钟长期频率值

Fig. 5 Long-term fractional frequency of fountain clocks

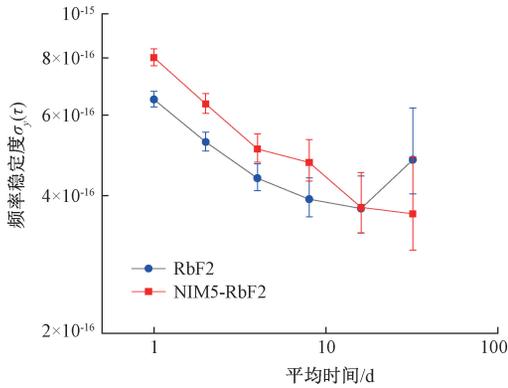


图6 喷泉钟长期频率稳定度

Fig. 6 Long-term frequency stability of fountain clocks

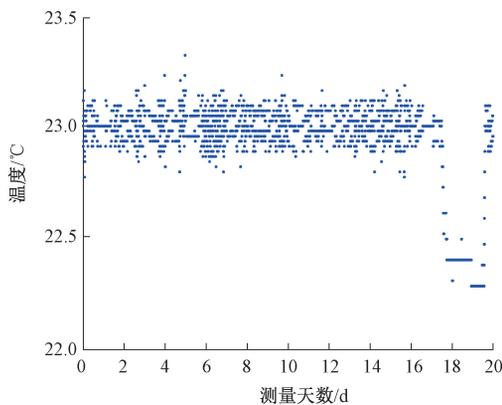


图7 温度波动

Fig. 7 Temperature fluctuation

3.3 长期原子数波动对稳定度的影响

铷原子碰撞频移比铯原子小很多,经实验测定, RbF2 的碰撞频移相对斜率为 $-2.6 \times 10^{-24} / N_{\text{atom}}$, N_{atom} 为原子数。2023 年 1 月 1 日 ~ 5 月 20 日 (MJD 59 945 ~

MJD 60 084) 的日平均原子数波动情况如图 8 所示,原子数波动的峰峰值超过 2.5×10^7 ,其引起的相对频率变化为 6.5×10^{-17} ,将制约喷泉钟的长期稳定度。这种长周期的原子数的波动主要受重泵光稳频漂移和 AOM 功放功率变化等因素的影响,可以通过定期重锁和自动稳定激光功率等技术进一步稳定激光频移和功率从而降低原子数波动,将原子数长期波动控制在 10% 以内,从而使得碰撞频移引起的长期稳定度变化小于 1×10^{-17} 以内。

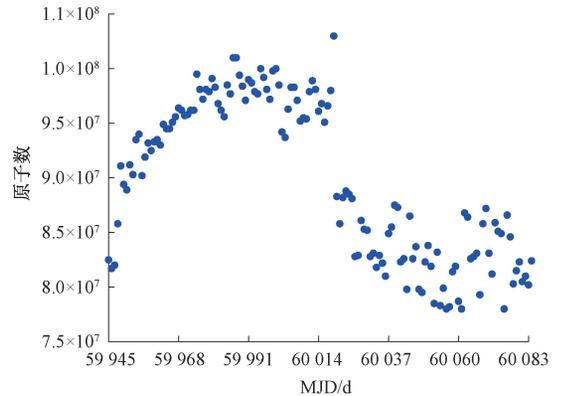


图8 原子信号波动

Fig. 8 Atomic signal fluctuation

4 结 论

铷喷泉钟由于其原子操控探测激光系统的可靠性,非常适用于工程化并可以通过紧驾驭氢钟作为复合守时钟使用。计量院研究的铷喷泉钟 RbF2 在李天初院士团队喷泉钟研究成果基础上,以工程化高可靠为设计理念,引入低温敏感率双金属微波真空一体腔、小型化激光系统和笼式结构探测等新技术,较好的控制了环境温度变化引发微波腔谐振频率、原子数抖动等长期波动因素,提升了喷泉钟的长期稳定工作性能,实现了 1 年时间的准连续运行,32 天长期稳定度优于 2.6×10^{-16} 。目前系统的长期稳定度受探测光和冷却光稳定度影响,将来可以通过引入定期重锁和自动稳定激光功率等技术,降低冷原子碰撞和探测效率变化引起的频率长期波动,进一步提升喷泉钟的长期频率稳定度。

致谢

此文感怀李天初院士在时频领域特别是喷泉钟研究中的卓越贡献,以及他为铷喷泉钟实现高可靠高稳定工程化做出的方向指引和总体指导;感谢左娅妮等同事在研究和实验中的有益讨论和帮助。

参考文献

- [1] Bureau International des Poids et Mesures. The international system of units (SI) [M]. Meas. Tech., 2019, 62:472.
- [2] 宋明顺, 方兴华, 马爱文, 等. 论新国际单位制 (SI) 的“秒制”特征及其未来发展[J]. 计量学报, 2019, 40(4):541.
- SONG M SH, FANG X H, MA AI W, et al. The characteristics of the new SI base on “Second System” and its future development[J]. Acta Metrologica Sinica, 2019, 40(4):541.
- [3] CLAIRON A, GHEZALI S, SANTARELLI G, et al. Preliminary accuracy evaluation of a cesium fountain frequency standard[C]. Fifth Symposium on Frequency Standards and Metrology, 1996:49-59.
- [4] JEFFERTS S, MEEKHOF D, HOLLBERG L, et al. NIST cesium fountain frequency standard: Preliminary results[C]. IEEE Frequency Control Symposium, 1998: 2-5.
- [5] WEYERS S, BAUCH A, HUBNER U, et al. First performance results of PTB's atomic cesium fountain and a study of contributions to its frequency instability[C]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2000, 47(2):432-437.
- [6] SZYMANIEC K, CHALUPCZAK W, HENDERSON D. Initial evaluation of the NPL cesium fountain frequency standard [C]. IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum, 2003. Proceedings of the 2003, Tampa, FL, USA, 2003: 112-114.
- [7] ROVERA G, BIZE S, CHUPIN B, et al. UTC (OP) based on LNE-SYRTE atomic fountain primary frequency standards[J]. Metrologia, 2016, 53:S81-S88.
- [8] WEYERS S, GERGINOV V, KAZDA M, et al. Advances in the accuracy, stability, and reliability of the PTB primary fountain clocks[J]. Metrologia, 2018, 55: 789-805.
- [9] SZYMANIEC K, PARK S, MARRA G, et al. First accuracy evaluation of the NPL-CsF2 primary frequency standard[J]. Metrologia, 2010, 47:363-376.
- [10] BEATTIE S, JIAN B, ALCOCK J, et al. First accuracy evaluation of the NRC-FCs2 primary frequency standard[J]. Metrologia, 2020, 57: 035010.
- [11] FANG F, LI M, LIN P, et al. NIM5 Cs fountain clock and its evaluation[J]. Metrologia, 2015, 52: 454-468.
- [12] BLINOV I, BOIKO A, DOMNIN Y, et al. Budget of uncertainties in the cesium frequency frame of fountain type[J]. Measurement Techniques, 2017, 60(1): 31-36.
- [13] LEVI F, CALONICO D, CALOSSO C, et al. Accuracy evaluation of ITCsF2: A nitrogen cooled cesium fountain[J]. Metrologia, 2014, 51(3):270-284.
- [14] AKIFUMI T, SHINYA Y, KEN H. First uncertainty evaluation of the cesium fountain primary frequency standard NMIJ-F2[J]. Metrologia, 2022, 59:035004.
- [15] JALLAGEAS A, DEVENOGES L, PETERSEN M, et al. First uncertainty evaluation of the FoCS-2 primary frequency standard[J]. Metrologia, 2018, 55:366-385.
- [16] PARKER T, JEFFERTS S, HEAVNER T, et al. Operation of the NIST-F1 caesium fountain primary frequency standard with a maser ensemble, including the impact of frequency transfer noise[J]. Metrologia, 2005, 42(5):423-430.
- [17] THOMAS P, DONLEY E, LEVI F, et al. First accuracy evaluation of NIST-CsF2[J]. Metrologia, 2011, 51(3): 174-182.
- [18] SANTARELLI G, LAURENT P, LEMONDE P, et al. Quantum projection noise in an atomic fountain: A high stability cesium frequency standard[J]. Physical Review Letters, 1999, 82(23): 4619.
- [19] WYNADNDS R, WEYERS S, Atomic fountain clocks[J]. Metrologia, 2005, 42(3):S64.
- [20] FILIPPO L, CLAUDIO C, DAVIDE C, et al. The cryogenic fountain ITCsF2[C]. 2009 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 22nd European Frequency and Time forum, Besancon, France, 2009: 769-773.
- [21] LIU D, RUAN J, FAN S, et al. Comparison with TAI of NTSC-F1 [C]. 2020 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IFCS-ISAF), Keystone, CO, USA, 2020: 1-2.
- [22] SORTAIS Y, BIZE S, NICOLAS C, et al. Cold collision frequency shifts in a 87Rb atomic fountain[J]. Physical Review Letters, 2000, 85(15):3117-3120.
- [23] FERTIG C, GIBBLE K. Measurement and cancellation of the cold collision frequency shift in an 87Rb fountain clock [J]. Physical Review Letters, 2000, 85(8): 1622-1625.
- [24] GUENA J, ABGRALL M, CLAIRON A, et al. Contributing to TAI with a secondary representation of the SI second[J]. Metrologia, 2014, 51:108-120.
- [25] PEIL S, CRANE S, SWANSON T, et al. Rubidium-Fountain characterization using the USNO clock ensemble[C]. 2007 IEEE International Frequency

- Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum, Geneva, Switzerland, 2007: 473-476.
- [26] KUPALOV D, BARYSHEV V, BLINOV I, et al. Uncertainty budget of rubidium fountain: Preliminary results[J]. *Measurement Techniques*, 2022, 64: 817-823.
- [27] OVCHINNIKOV Y, MARRA G. Accurate rubidium atomic fountain frequency standard [J]. *Metrologia*, 2011, 48(3): 87-100.
- [28] CHENG H, ZHANG Z, DENG S, et al. Design and operation of a transportable 87Rb atomic fountain clock[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92: 054702.
- [29] ZHANG H, RUAN J, LIU D, et al. Development and preliminary operation of 87Rb continuously running atomic fountain clock at NTSC[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71, 1008312.
- [30] LI T, LI M, LIN P, et al. Improvements and news evaluation of NIM4 caesium fountain clock at NIM in 2005-2006[J]. *Chinese Physics Letters*, 2007, 24(5): 1177.
- [31] FANG F, CHEN W, LIU K, et al. The preliminary evaluation of the new fountain clock NIM6 [C]. 2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC), New Delhi, India, 2019.
- [32] CHEN W, FANG F, LIU K, et al. Development of Rb fountain clock for time keeping[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 956452.

- [33] ZHENG F, FANG F, CHEN W, et al. Bimetal temperature-compensated Ramsey cavity for atomic fountain frequency standards [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2023, 71(4): 1752-1760.

作者简介



陈伟亮, 1999年和2002年分别于北方交通大学获得学士学位和硕士学位, 现为中国计量科学研究院副研究员, 主要研究方向为量子频标及时间频率计量。

E-mail: E-chenwl@nim.ac.cn

Chen Weiliang received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Beijing Jiaotong University in 1999 and 2002, respectively. He is currently an associate researcher at National Institute of Metrology. His main research interests include the frequency standard and time and frequency metrology.



房芳(通信作者), 1993年和1996年分别于南开大学获得学士和硕士学位, 2007年于美国宾州州立大学获得博士学位, 现为中国计量科学院时频所所长/研究员, 主要研究方向为量子频标及时间频率计量。

E-mail: fangf@nim.ac.cn

Fang Fang (Corresponding author) received her B. Sc. and M. Sc. degrees both from Nankai University in 1993 and 1997, respectively, and received her Ph. D. degree from Penn State University in 2007. She is currently the head and senior scientist of the time and frequency division at National Institute of Metrology. Her main research interests include frequency standards and time and frequency metrology.