

时间频率基准装置的研制现状

阮军 王叶兵 常宏 姜海峰 刘涛 董瑞芳 张首刚

Progress towards primary frequency standard

Ruan Jun Wang Ye-Bing Chang Hong Jiang Hai-Feng Liu Tao Dong Rui-Fang Zhang Shou-Gang

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 160308 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.160308

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.160308>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I16>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于互组跃迁谱测量的窄线宽激光系统

[Narrow linewidth laser system used for the intercombination transition spectrum measurement](#)

物理学报.2014, 63(14): 140704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.140704>

应用于铯原子喷泉钟的二维磁光阱研制

[A two-dimensional magneto-optical trap for a cesium fountain clock](#)

物理学报.2013, 62(6): 063201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.063201>

铯原子气室中相干布居俘获的参数依赖关系研究

[Investigation of experimental parameters of coherent population trapping with cesium vapor cell](#)

物理学报.2012, 61(23): 233201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.233201>

专题: 量子精密计量与操控

## 时间频率基准装置的研制现状\*

阮军 王叶兵 常宏 姜海峰 刘涛 董瑞芳 张首刚†

(中国科学院国家授时中心, 西安 710600)

(中国科学院时间频率基准重点实验室, 西安 710600)

(2015年7月11日收到; 2015年8月13日收到修改稿)

时间频率基准装置——铯原子喷泉钟, 在标准时间产生和保持、基础物理研究中发挥了重要的作用. 介绍了铯原子喷泉钟的工作原理, 对影响其性能的各项噪声源和频移项给出了分析, 影响频率稳定度性能的主要因素为 Dick 效应相关的原子团装载时间、微波激励源相位噪声和探测激光的频率噪声, 影响频率不确定性能主要频移项为: 黑体辐射频移、冷原子碰撞频移、腔相位分布频移和微波泄露频移; 总结和比较了当前具有先进性能的铯原子喷泉钟采用的技术; 介绍了铯原子喷泉钟的主要应用方向、空间冷原子铯钟的研制情况和光学频率原子钟进展.

**关键词:** 铯原子喷泉钟, 频率稳定度, 频率不确定度, 光学频率原子钟

**PACS:** 03.75.Dg, 32.70.Jz, 07.77.Gx, 06.30.Ft

**DOI:** 10.7498/aps.64.160308

## 1 引言

作为表征物质运动的最基本物理量, “时间”的单位是以物质运动的周期进行定义的. 1967年, 国际计量大会通过了新的时间单位“秒”的决议, 以原子微观的能级跃迁周期度量时间, 取代了原来的基于天体的宏观周期运动(地球自转). 至今, 时间单位“秒”定义为“海平面上、无干扰铯( $^{133}\text{Cs}$ )原子基态两个超精细能级间跃迁所产生电磁波连续振荡9, 192, 631, 770个周期所持续的时间”<sup>[1]</sup>. 能够实现上述“秒”定义相应频率的装置称为时间频率基准装置. 从1955年第一台铯原子钟诞生, 时间频率基准装置从铯束原子钟发展到了铯原子喷泉钟, 其性能从 $10^{-9}$ 量级提高到了 $10^{-16}$ 量级, 在守时、导航、基础物理研究中发挥了重要的作用<sup>[2,3]</sup>. 本文首先介绍了铯原子喷泉钟的工作原理, 对影响其性能的各项噪声源和频移项给出了分析, 总结了当前铯原子喷泉钟的研制现状, 比较了各国在提高钟性能发展的新方法和技术, 同时也总

结了铯喷泉钟的发展方向, 给出光学频率原子钟的进展.

## 2 铯原子喷泉钟的工作原理

铯原子钟以 $|F=4, m_F=0\rangle \rightarrow |F=3, m_F=0\rangle$ 的跃迁能级频率作为参考, 以电磁场与冷原子的 Ramsey 作用方式获得原子钟鉴频信号, 从而伺服控制晶体振荡器输出信号的频率, 获得了标准频率信号. Ramsey 作用方式是指原子依次被两个振荡场激励的方式, 原子在两个能级之间的跃迁几率为<sup>[4]</sup>

$$P(\nu) = \frac{1}{2} \sin^2(b\tau[1 + \cos(2\pi(\nu - \nu_{\text{atom}})T)]), \quad (1)$$

其中,  $b$ 为振荡场的 Rabi 频率,  $\tau$ 为振荡场与原子发生作用的时间,  $T$ 为两次激励之间的时间,  $\nu_{\text{atom}}$ 为能级间的跃迁频率. 铯束原子钟在原子束飞行路径上安放两个微波谐振腔实现 Ramsey 作用, 由于两个微波谐振腔不可能完全相同, 腔内的微波腔总是存在一定相位差, 导致鉴频信号的中心偏离原

\* 国家自然科学基金(批准号: 61127901, 91336101, 11074252, 11273024, 11174282)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: szhang@ntsc.ac.cn

子跃迁能级的频率, 这种腔相位差频移很难被精确测量和评定, 是限制铯束原子钟性能提高的最主要因素. 铯原子喷泉钟利用冷原子样品进行喷泉式的上升下落运行, 两次通过同一微波场, 从根本上消除了限制铯束原子钟不确定度性能的最主要因素; 同时, 受控的冷原子团的运动速度较热原子束低两个量级, 通常冷原子与电磁场相互作用时间约为 0.5 s, 跃迁谱线的线宽仅为 1 Hz, 使得铯原子钟的频率不确定度、频率稳定度性能提高了近两个量级, 成为现今的时间频率基准装置.

铯原子喷泉钟的一次完整的周期如图 1 所示, 每两个完整的周期可以实现一次频率反馈控制. 1) 冷却阶段. 在这一阶段, 通过磁光阱技术或光学黏团技术降低铯原子的热运动速度, 获得低温的冷原子团. 通过改变磁光阱或光学黏团作用的时间, 可以获得原子数目  $10^5$ — $10^8$  量级的冷原子团, 其多普勒冷却极限温度为 124  $\mu\text{K}$ , 对应的原子热运动速度为 8.8 cm/s. 2) 上抛阶段. 通过控制激光的频率参量, 使静止的原子样品获得垂直向上的速度, 飞离六束激光交汇区, 上升至最高点后自由下落, 形成原子喷泉. 上三束激光的频率减小为  $\nu_L - \Delta\nu_L$ , 下三束激光的频率增加为  $\nu_L + \Delta\nu_L$ , 在竖直方向上产生一个以  $v_{111} = \sqrt{3}\lambda\Delta\nu_L$  速度运动的驻波场. 3) 偏振梯度冷却阶段. 为了获得更低温度的原子样品, 通过偏振梯度冷却, 把原子黏团降到更低的温度. 偏振梯度冷却所能达到的极限温度与激光光强成正比, 与频率失谐量成反比, 在上抛阶段结束后, 紧接着在约 1.5 ms 的时间里把激光失谐量从原来的 -10 MHz 变化为 -70 MHz, 光强依照指数的规律衰减至零. 经过偏振梯度冷

却, 原子样品能够降低到低于 2  $\mu\text{K}$  的温度. 4) 选态阶段. 处于  $|F = 4\rangle$  态的原子经过选态腔, 与调谐在基态超精细能级  $|F = 4, m_F = 0\rangle \rightarrow |F = 3, m_F = 0\rangle$  频率上的微波场相互作用, 使原子跃迁从  $|F = 4, m_F = 0\rangle$  态跃迁到  $|F = 3, m_F = 0\rangle$  态, 而  $|F = 4, m_F \neq 0\rangle$  和  $|F = 3, m_F = 0\rangle$  态的原子受到与基态  $|F = 4\rangle$  到激发态  $|F' = 5\rangle$  共振激光照射,  $|F = 4, m_F \neq 0\rangle$  态的原子偏离了竖直方向, 而留存  $|F = 3, m_F = 0\rangle$  原子继续保持竖直运动方向向上运动, 实现了纯  $|m_F = 0\rangle$  态的原子被选择出来. 5) 激励阶段. 经过选态阶段后, 仅有处于  $|F = 3, m_F = 0\rangle$  态的原子到达激励腔, 受到其中的微波场作用发生能级跃迁. 随后, 原子样品继续上升至最高点, 在重力的作用下再次与激励腔的微波场发生作用, 完成一次完整的 Ramsey 跃迁过程. 6) 检测阶段. 采用原子荧光法检测微波激励跃迁的概率大小. 在谐振激光的作用下, 原子发出的荧光强度正比于原子数目, 利用跃迁到  $|F = 4, m_F = 0\rangle$  态的原子数目与总原子数目之比, 即可获得跃迁几率. 具体过程是调谐在负失谐  $|F = 4\rangle \rightarrow |F' = 5\rangle$  能级 -2 MHz 的圆偏振驻波光束激发跃迁到  $|F = 4, m_F = 0\rangle$  态原子, 利用荧光收集器获得原子团的飞行时间信号  $S_4$ ; 如同选态阶段一样, 已被检测的  $|F = 4, m_F = 0\rangle$  态的原子用一束与  $|F = 4\rangle \rightarrow |F' = 5\rangle$  共振的行波激光照射, 使其偏离垂直运动方向, 不再被探测. 而对余下的  $|F = 3, m_F = 0\rangle$  态的非跃迁原子, 则利用调谐于  $|F = 3\rangle \rightarrow |F' = 4\rangle$  跃迁频率的激光把原子抽运至  $|F = 4\rangle$  态, 再利用上述检测  $|F = 4\rangle$  的方法获得  $|F = 3, m_F = 0\rangle$  态原子团的飞行时间信号  $S_3$ .

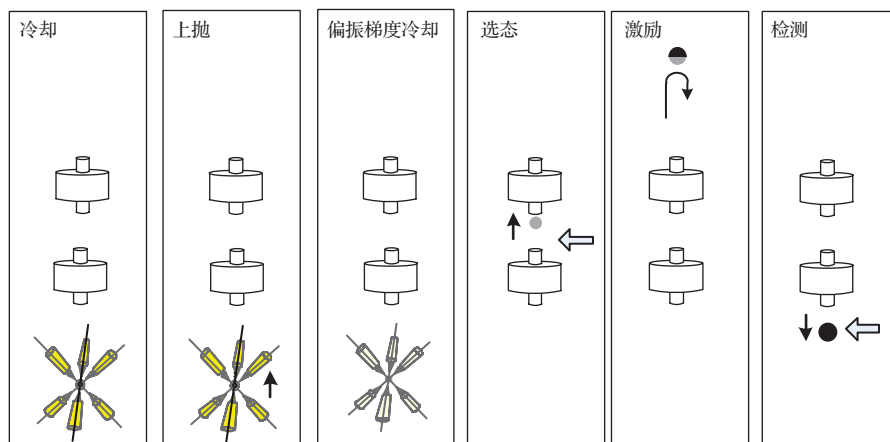


图 1 铯原子喷泉钟的工作原理

Fig. 1. Principle of operation of the atomic fountain clock.

利用归一化算法获得跃迁几率  $P = S_4 / (S_4 + S_3)$ ,  $S_4, S_3$  分别是代表  $F = 4, F = 3$  态的原子数目的荧光积分信号. 图 2 为国家授时中心铯原子喷泉钟 NTSC-F1 的 Ramsey 信号.

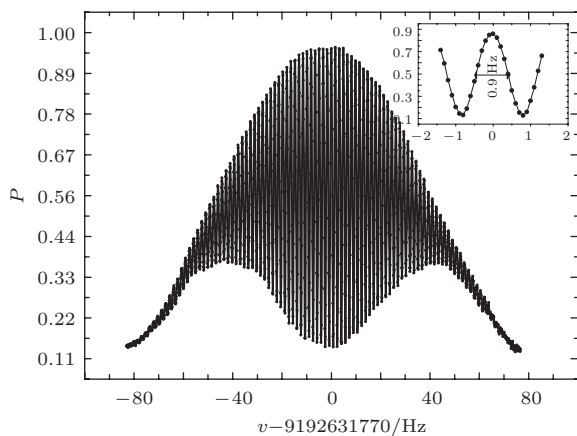


图 2 NTSC-F1 铯原子喷泉钟 Ramsey 谐振信号  
Fig. 2. Measured Ramsey fringe pattern for NTSC-F1 fountain clock.

### 3 铯原子喷泉钟的性能

原子钟输出信号的瞬时频率  $\nu(t)$  由 (2) 式表述:

$$\nu(t) = \nu_{\text{atom}}(1 + \varepsilon + y(t)), \quad (2)$$

其中,  $\nu_{\text{atom}}$  为无干扰的原子谐振频率,  $\varepsilon$  为在各种物理效应所引起的原子频率的移动, 对  $\varepsilon$  测量的准确程度反映了原子钟的不确定度性能,  $y(t)$  是瞬时的相对频率起伏, 其方差则体现了原子钟频率的稳定度. 频率不确定度和频率稳定度是衡量原子钟性能的两个最重要的指标. 频率不确定度表征为原子钟实际输出信号与标称频率差值的符合程度, 频率稳定度标称的是某一时间段内平均频率随时间的波动程度.

#### 3.1 频率稳定度

铯原子喷泉钟以脉冲方式工作, 频率稳定度很大程度上受到 Dick 效应的影响; 同时, 原子的跃迁几率通过探测原子的布居数获得, 原子数目的起伏也影响了钟的频率稳定度.

##### 3.1.1 Dick 效应

本地振荡器  $1/(2T_c)$  ( $T_c$  为钟的运行周期) 或其谐波分量的噪声分量转化为钟的低频噪声, 降

低钟的稳定度. 这一现象首先被 Dick 解释, 又称 Dick 效应 [5]. 喷泉钟频率稳定度极限

$$\sigma_{y \text{ lim}}(\tau) \approx \frac{\sigma_y^{\text{LO}}}{\sqrt{2 \ln(2)}} \left| \frac{\sin(\pi d)}{\pi d} \right| \sqrt{\frac{T_c}{\tau}}, \quad (3)$$

其中,  $d = T/T_c$ , 表示 Ramsey 作用时间与整个喷泉钟工作周期的比值,  $\sigma_y^{\text{LO}}$  为本地振荡器的频率阿仑方差. 提高铯原子喷泉钟频率稳定度最有效的方法是改善本地振荡器的相位噪声性能和缩短喷泉钟的工作周期, 这些方法都是为了减小 Dick 效应对钟频率稳定度的影响. 缩短喷泉钟的工作周期是提高冷原子团的装载率, 即不直接从铯蒸汽囚禁和冷却原子, 而是通过慢速原子束中获得冷原子实现光学黏团. 此方法不但提高了原子样品的装载速率, 可以在较短时间内获得更大数目的原子, 降低了 Dick 效应对稳定度的不利影响; 还降低了在飞行路径上背景铯原子的影响, 降低了探测信号的噪声; 可以获得密度较小的原子黏团, 从而减小冷原子碰撞频移. 法国 LNE-SYRTE-FO1, FO2 [6] 和 PTB-CsF2 [7] 的喷泉钟通过慢速原子束制备光学黏团, 其频率稳定度性能和冷原子碰撞频移不确定性均有相应提高, 中国科学院国家授时中心也采用了 2D MOT 慢速原子束装载获得光学黏团的方式 [8], 实现的束流为  $2.1 \times 10^9$  atoms/s.

降低本地振荡器的噪声可以采用液氮冷却的蓝宝石振荡器来实现, 这种振荡器具有超低的相位噪声 ( $-97 \text{ dB} \cdot \text{rad}^2/\text{Hz}@1 \text{ Hz}$ ), 巴黎天文台的喷泉钟频率稳定度性能为  $1.6 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ , 达到了量子噪声极限 [9]. 利用飞秒光梳将超稳激光的频率稳定度指标下转换为微波频率是另一种更实用的方法, PTB 实现了 9.6 GHz 的微波振荡器通过飞秒光梳锁定到超稳激光器上 [10], 短期稳定度达到了  $1.2 \times 10^{-14}$ . 法国巴黎天文台的 LNE-SYRTE 采用将光纤飞秒激光器锁定到超稳腔稳频激光器上 [11], 再由光梳产生铯原子喷泉钟所需要的 9.2 GHz 微波信号, 相位噪声为  $-90 \text{ dB} \cdot \text{rad}^2/\text{Hz}$  (1 Hz 频偏处) 和  $-120 \text{ dB} \cdot \text{rad}^2/\text{Hz}$  (1 kHz 频偏处), 而铯原子喷泉钟的频率不稳定性达到了  $3.5 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ , 同样达到了原子喷泉钟的量子噪声极限.

中国科学院国家授时中心开展了超低相噪光生微波源的研制, 该微波源主要由超稳单频激光器和高性能飞秒光梳两部分组成. 研制的超稳单频激光器已实现运行工作, 秒级频率稳定度优于  $2 \times 10^{-15}$ . 研制了国内第一套带有腔内 EOM 的掺铒光纤光梳系统, 实现了宽带重复频

率  $f_r$  控制<sup>[12]</sup>, 频率控制精度为  $< 1 \times 10^{-16}/s$  和  $< 2 \times 10^{-20}/10000 s$ , 对应时间抖动在阿秒量级. 系统的频率控制带宽、频率控制稳定度、可靠运行能力(连续运行时间  $> 7 d$ )、载波相位包络偏频 CEO 探测信号噪声比 ( $> 40 \text{ dB}@1 \text{ MHz res}$ ) 等主要指标均达到了国外领先水平.

### 3.1.2 探测激光的频率和强度噪声

铯原子喷泉钟的能级布居数通过探测共振荧光强度来获得, 而荧光强度不但与被探测原子团的数目成正比, 而且与激光的频率、强度存在一定的函数关系. Leveque 等<sup>[13]</sup> 详细分析了激光频率、强度噪声对钟频率稳定度的影响. 结果认为对于下落速度为  $3.54 \text{ m/s}$  冷原子黏团, 应用频率失谐  $\Gamma/2$  ( $\Gamma$  为原子的自然线宽), 频率噪声  $10^6 \text{ Hz}^2/\text{Hz}@1 \text{ Hz}$  和强度噪声  $10^{-8}/\text{Hz}@1 \text{ Hz}$  的探测激光, 噪声对喷泉钟的频率稳定度影响分别为  $6.4 \times 10^{-14}$ ,  $6.7 \times 10^{-16}$ .

降低激光器频率噪声的方法是采用新型外腔结构的半导体激光器, 相比于通常的 Littrow 结构和 Littman 结构的光栅外腔半导体激光器, 采用干涉滤光片选模、“猫眼”结构外腔压窄线宽具有更好的机械稳定性, 能更好地抑制  $1 \text{ Hz}$  处激光的频率噪声. 这一新型结构的激光器也被选为工作国际空间站 (ISS) 的冷铯原子空间钟的光源<sup>[14]</sup>. 国家授时中心也进行了这一激光器的研制<sup>[15]</sup>, 其  $3 \text{ dB}$  洛仑兹和高斯线宽分别为  $112.5$  和  $57 \text{ kHz}$ , 也应用在铯原子喷泉钟 NTSC-F1.

## 3.2 频率不确定度

频率不确定度表征频标的输出频率与其标称频率的符合程度. 而所谓的标称频率即是“秒”单位中所定义的频率, 为海平面上的无干扰下  $^{133}\text{Cs}$  原子基态两个超精细能级之间的跃迁频率  $9192631770 \text{ Hz}$ . 对于基准频标而言, 是通过自身评定的方法来获得其不确定度指标. 通过对所有可能引起输出频率偏离定义值的所有误差源进行精确测量, 获得每项误差源引起的与定义频率  $9192631770 \text{ Hz}$  的偏移量  $\Delta f_i$ , 并且评定测量各项偏移量的不确定度  $u_i$ , 利用平方和的方法合成为总的 uncertainty, 以总的 uncertainty  $\sqrt{\sum u_i^2}$  来表征基准频标的准确度性能. 所以, 基准频标的输出频率  $f = f_0 + \sum \Delta f_i \pm \sqrt{\sum u_i^2}$ , 其中  $f_0$  为定义频率. 通常用相对 uncertainty  $\sqrt{\sum u_i^2}/f_0$  来描述基准频标

的不确定度. 基准频标的不确定度虽然是通过自身评定的方式获得的, 但是评定的可信度却可以通过两台同类型的基准频标对比来评估. 两台独立的基准装置对比之前通过自身评定给出了各自偏离定义频率的量值和 uncertainty:  $\Delta v_A$ ,  $u_A$  和  $\Delta v_B$ ,  $u_B$ , 直接对比得到的频差为  $\Delta v_{AB}$ , 若该频差值处在  $\Delta v_A - \Delta v_B \pm \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$  的区间内, 则可以认为自我评定的方法是合理的. 不同地点的喷泉钟可通过卫星双向或光纤进行频率对比验证其性能指标<sup>[16]</sup>.

从铯原子喷泉钟的工作原理可以看出, 铯喷泉钟以冷原子样品为鉴频介质, 通过原子样品上抛、自由下落两次与微波场相互作用的方式获得误差控制信号, 伺服控制晶体振荡器信号的频率在冷原子样品的谐振频率上. 冷原子样品的谐振频率与“秒”单位所定义的频率值并不相等, 在外部环境(如引力场、电磁场等)作用和内部原子相互作用下(如碰撞), 原子样品的跃迁频率偏离了定义值, 这些偏离量称为“频移”. 对铯原子喷泉钟进行准确度评定, 需要全面研究所有可能的干扰效应和频移机制, 对各种频移从理论上加以估算、从实验上加以测量, 其测量的 uncertainty 反映了对频移机制的认识深度和测试水平. 在  $10^{-16}$  量级水平, 限制喷泉钟 uncertainty 性能主要误差源有四项.

### 3.2.1 黑体辐射频移

降低原子环境温度可以显著减小黑体辐射频移的影响及其敏感性, 因此, 减小黑体辐射频移 uncertainty 最有效的方法可以通过降低原子飞行路径周围的温度来实现. 美国标准与技术研究院 (NIST) 和意大利计量院 (INRIM) 把喷泉钟的激励微波腔及漂移区放置在液氮的环境下<sup>[17,18]</sup>, 对应的工作温度为  $80 \text{ K}$ , 温度敏感系数为  $5 \times 10^{-18}/\text{K}$ , 对应的黑体辐射频移为  $0.87 \times 10^{-16}$ , uncertainty 为  $5 \times 10^{-18}$ , 主要是原子飞行路径上温度不均匀引起的.

### 3.2.2 冷原子碰撞频移

冷原子碰撞频移是影响喷泉钟 uncertainty 的主要误差项, 各国都在发展新方法和技术减小冷原子碰撞频移及其 uncertainty. 通常有两种方法来实现这一目标: 一是减小冷原子碰撞频移; 另一种方法是保持冷原子碰撞频移稳定, 精确测量其频移量. NPL 研制的喷泉钟 NPL-CsF2<sup>[19]</sup> 采用前一种方法, 通过制备体积

较小 ( $0.3 \text{ mm}^3$ )、温度较低 ( $1 \text{ } \mu\text{K}$ ) 的冷原子团, 调整馈入激励腔的微波偏离通常的  $\pi/2$  功率处获得  $|F = 4, m_F = 0\rangle$  态、 $|F = 3, m_F = 0\rangle$  态数目不等的原子团. 在此量子态下, 原子团中  $|F = 4, m_F = 0\rangle$  态、 $|F = 3, m_F = 0\rangle$  态的原子具有符号相反的碰撞系数, 总体冷原子碰撞频移为零. 巴黎天文台 [20] 采用绝热跃迁技术精确测量冷原子碰撞频移. 绝热跃迁技术是指在绝热条件下利用电磁场或光场实现量子态之间跃迁, 制备出密度和原子数均严格成倍数关系的不同原子样品. 在绝热条件下, 原子样品的速度分布、位置和碰撞能量没有改变, 避免了通过改变装载时间、选态腔微波功率测量碰撞频移带来的较大的不确定度. 并且, 这种方法对于实验参数 (如原子样品的形状大小、温度和馈入选态腔的微波功率) 不敏感, 可以稳定地产生成倍数关系的不同密度的原子样品, 从而在  $10^{-16}$  量级精确测量碰撞频移和腔牵引频移.

### 3.2.3 腔相位分布频移

由于微波腔中电磁场存在相位空间分布, 当不断膨胀的原子样品两次与不同相位的微波场相互作用时, 原子钟输出频率发生移动, 即腔相位频移, 是影响钟准确度性能的主要误差源之一. 根据 Li 和 Gibble [21] 发展的激励腔相位分布理论, 腔相位分布可以展开为一系列傅里叶分量来描述. 其中低阶项起主要作用, 一阶项表征的是微波能量从腔中截面放射状流向端盖产生的相位差, 二阶项表征的是微波能量从馈入端流向激励腔侧壁产生的相位差, 三阶项表征的是两端馈入源相互流动的能量四极化分量. 在实验中, 可以通过改变双端馈入激励腔的功率、相位以及喷泉钟的倾斜角来验证理论模型的正确性, 从而获得在正常工作条件下铯喷泉钟的腔相位频移不确定度. 减小这一频

移的另一方法是采用相位分布均匀的新型微波腔. NPL CSF3 [22], KRIS F1 [23] 采用了椭球型的微波腔, 在中截面上, 4 个矩形波导通过 8 个圆孔馈入微波, 通过独立调节馈入微波的强度和相位, 减小二阶项; 而 8 个馈入孔偏离中截面馈入减小了一阶项, 圆锥形的截止波导减小了三阶项, 综合上述激励腔的结构特点, 腔内微波场的相位梯度将降低一个量级.

### 3.2.4 微波泄露频移

原子与微波场以 Ramsey 方式发生相互作用, 在自由飞行阶段, 泄漏的微波与原子相互作用, 引起钟输出频率移动. 在飞行阶段通过无相位突变地关断微波场是减小甚至消除此项频移的有效方法. 法国巴黎天文台研制的微波开关采用 Mach-Zehnder 干涉仪结构 [24], 应用干涉相消原理, 利用另一路相位相反的微波信号实现关断, 关断该路信号实现微波信号的开启, 利用该技术可实现微波信号的完全关断, 并且不引起相位突变, 其不确定度为  $0.5 \times 10^{-16}$ . 国家授时中心也采用了 Mach-Zehnder 开关来消除微波泄露频移, 此开关控制与  $8.9 \text{ GHz}$  信号混频的  $200 \text{ MHz}$  信号, 从而实现  $9.2 \text{ GHz}$  信号无相位突变的开关. 在关断  $9.2 \text{ GHz}$  信号的同时, 使微波频率偏离原子跃迁谱线  $200 \text{ MHz}$ , 使得微波泄露频率显著降低.

### 3.2.5 各主要时间频率实验室铯原子喷泉钟性能

表 1 给出了各主要时间频率实验室铯原子喷泉钟的性能分析, 列出了各主要频率项评定的不确定度. 国际上频率稳定度最高的铯原子喷泉钟为法国 LNE-SYRTE 实验室研制的, 指标为  $1.6 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ , 图 3 (a) 为其阿仑方差图; 频率不确定度最高的是美国标准与技术研究所研制的, 指

表 1 主要时间频率实验室的铯原子喷泉钟性能 ( $10^{-16}$ )

Table 1. Performance of cesium fountain clock in leading time frequency laboratory.

频移不确定度项	LNE-SYRTE-FO2 [25]	NIST-F2 [26]	PTB-CSF2 [27]	IT-CsF2 [28]	NPL-CsF2 [29]	NIM5 [30]	NTSC-F1
二阶塞曼频移	0.4	0.2	0.6	0.8	0.8	2.0	3.1
引力红移	0.6	0.3	0.06	1.0	0.5	1.0	1.0
冷原子碰撞频移	1.2	0.2	3.4	1.3	0.4	2.0	40
黑体辐射频移	0.6	0.05	0.57	0.12	1.1	1	3
腔相位频移	0.9	0.3	1.3	0.2	1.1	4	5
微波泄漏频移	0.7	0.8	1.0	1.5	0.6	12	5
频率总不确定度	2.1	1.1	4.4	2.3	2.0	16	41
秒级频率稳定度	160	1700	1600	2000	1700	3000	2000
日频率稳定度	2.0	3.0	9.0	8.0	15	40	42

标为  $2.1 \times 10^{-16}$ . 在国内, 中国计量研究院研制的铯原子喷泉钟频率稳定度为  $3 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ , 频率不确定度为  $1.6 \times 10^{-15}$ . 国家授时中心研制的铯原子喷泉钟频率稳定度为  $2 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ , 图 3 (b) 为其阿仑方差图, 初步评定的频率不确定度为  $4.3 \times 10^{-15}$ , 其连续运行 10 d 以上, 具有国家先进性.

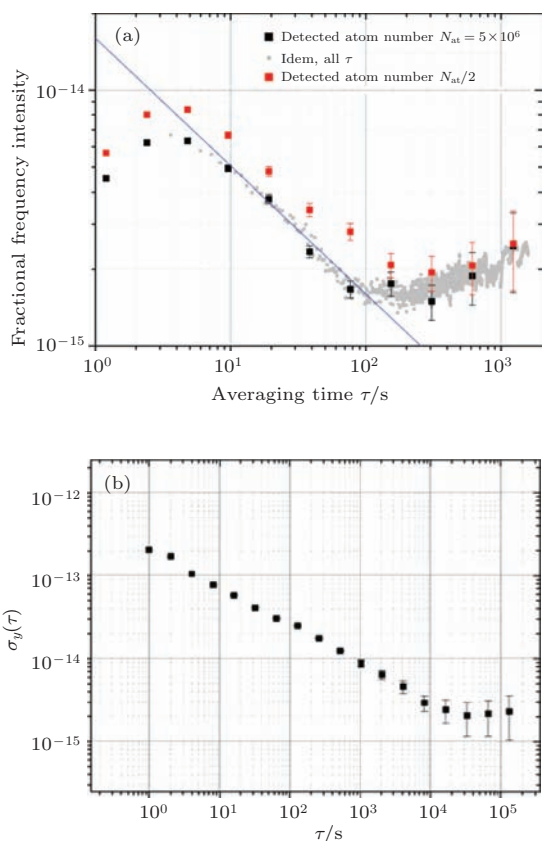


图3 铯原子喷泉钟频率稳定度 (a) LNE-SYRTE-FO2 [25]; (b) NTSC-F1

Fig. 3. Allen deviation of cesium fountain clock frequency stability: (a) LNE-SYRTE-FO2 [25]; (b) NTSC-F1.

## 4 铯原子喷泉钟的应用

### 4.1 标准时间的产生和保持

现行通用标准时间称为协调世界时 UTC. 国际计量局 BIPM 利用全世界的 74 个守时实验室, 逾 400 台连续运转的守时原子钟产生的时间频率信号数据, 采用 ALGOS 计算方法经加权平均得到稳定的时间尺度, 即自由原子时 EAL, 自由原子时 EAL 再经过 14 台基准钟 (11 台铯原子喷泉钟、3 台铯束原子钟) 校准后, 给出既稳定又准确的时间尺度——国际原子时 TAI. 为了保持天文时与原子时的统一, 当原子时与世界时 UT1 时刻差接近 0.9

后, 对协调世界时实施一个整秒的加减调整 (闰秒). 铯原子喷泉钟在整个标准时间产生过程中保证了产生的时间间隔符合“秒”定义.

### 4.2 基础物理研究

利用铯原子喷泉钟可以提高物理常数 (里德堡常数  $R_\infty$ 、朗德因子  $g$  等) 的测量准确度. 德国 Hansch 小组 [31] 应用法国铯原子喷泉钟 LNE-SYRTE-FOM, 通过测量氢原子 1S—2S 跃迁谱线频率, 实现了对  $R_\infty$  的精密测量, 不确定度为精度  $6.6 \times 10^{-12}$ , 因此,  $R_\infty$  是测量不确定度最高的物理常数之一 [32].

利用铯原子喷泉钟可以对现代物理的基本理论进行研究. 大统一理论 [33] 以及类星体吸收谱测量结果 [34] 认为精细结构常数是变化的, 而广义相对论则认为精细结构常数不随时间变化, 利用铯原子与铷原子喷泉钟 [35,36] 或氢钟 [37] 输出的高稳定性和准确度的频率信号进行长时间比对, 可以检验精细结构常数是否随时间变化. 利用喷泉钟测量铯原子磁敏能级, 可以验证洛仑兹不变性 [36,38], 进而对相对论进行验证. 应用铯原子喷泉钟, 可以对相关物理现象进行研究. 如通过在原子喷泉区设置不同的温度, 研究黑体辐射现象 [39]; 通过改变上抛原子团的密度与钟输出频率的关系, 研究冷原子碰撞的规律 [40]; 通过制备不同量子态的铯原子团, 研究与量子态相关的 Feshbach 共振现象和规律 [41].

## 5 时间频率基准钟的发展

铯原子喷泉钟的鉴频线宽反比于原子与微波的作用时间, 而在重力作用下, 在微波激励腔上方的自由飞行时间正比于上抛高度的方根. 也就是说, 要增加自由飞行时间, 必须按平方关系增大上抛高度, 要达到 0.1 Hz 线宽, 则上抛高度须为 31 m, 这样庞大的系统在地面上是无法实现的. 而在微重力环境下, 则可以通过降低冷原子团的运动速度, 增加冷原子团在两个微波激励腔的飞行时间, 获得更窄线宽的鉴频信号, 从而实现不确定度在  $10^{-16}$  的空间铯原子钟, 在更高精度上验证广义相对论. 欧空局 (ESA) 开展了微重力冷原子铯钟的研制, 目前了完成了飞行阶段的测试, 计划在 2016 年发射到国际空间站运行, 拟定的目标为频率稳定度  $1.0 \times 10^{-13}/s$ , 不确定为  $1.0 \times 10^{-16}$ , 以更高精

度验证引力红移, 光速各向均匀性, 精细结构常数变化等<sup>[14]</sup>. 中国科学院上海光学精密机械研究所开展了空间冷原子铯钟的研制. 中国科学院国家授时中心也开展着将运行于中国空间站实验舱2、为相关基础研究提供实验平台的高性能原子钟系统和时间频率传递系统.

近年来, 应用原子或离子很窄的光学频率跃迁谱线实现的光钟取得了飞速发展, 其中原子光钟的稳定度和不确定度都达到了  $10^{-18}$  量级, 是目前国际上研究最多、发展潜力更大的前瞻性原子钟, 将用来对目前基于铯原子跃迁谱线定义的时间单位“秒”重新定义和复现.

2013年, 美国NIST的小组实现了镱原子光钟<sup>[42]</sup>, 频率稳定度达到了  $1.6 \times 10^{-18}/25000$  s. 2014年, 美国JILA的Ye小组<sup>[43,44]</sup>通过减小原子碰撞频移和黑体辐射频移, 实现频率不确定度为  $6.4 \times 10^{-18}$ , 频率稳定度  $2.0 \times 10^{-18}/10000$  s 的铯原子光钟. 2015年, 日本Tokyo大学的Katori小组<sup>[45]</sup>利用超低温技术和光晶格转移技术来减小铯原子光钟黑体辐射频移, 实现频率不确定度  $1.0 \times 10^{-18}$ , 频率稳定度  $2.3 \times 10^{-18}/6000$  s 的铯原子光钟.

在离子光钟方面, 2010年美国NIST的研究小组实现的两台Al离子光钟<sup>[46]</sup>, 频率不确定度为  $8.6 \times 10^{-18}$ , 频率稳定度达为  $2.8 \times 10^{-15} \tau^{-1/2}$ . 2013年中国科学院武汉物理与数学研究所应用 $^{40}\text{Ca}^+$ 实现了完整的光钟装置<sup>[47]</sup>, 其他可以用来实现光钟的离子还有 $^{171}\text{Yb}^+$ ,  $^{199}\text{Hg}^+$ ,  $^{138}\text{Ba}^+$ ,  $^{115}\text{In}^+$ . 北京大学研究人员创新地提出了主动型光钟的设计思想<sup>[48,49]</sup>.

## 6 结束语

时间频率基准装置——铯原子喷泉钟, 在标准时间产生和基础物理研究中发挥着重要的作用. 提高喷泉钟频率稳定度性能的主要手段包括两个方面: 一是应用2D-MOT原子束技术减小冷原子的装载时间, 应用超稳激光产生低相噪微波激励源, 进而减小Dick效应的影响; 二是应用合理参数的低噪声激光源减小原子跃迁几率的探测噪声. 提高喷泉钟频率不确定度性能的主要手段包括四个方面: 一是降低原子环境温度从而减小黑体辐射频移影响; 二是通过调节原子态分布减小冷原子碰撞频移; 三是应用相位分布均匀的微波腔减小腔相位

频移; 四是应用高隔离度微波开关减小微波泄漏频移. 目前, 铯原子喷泉钟的性能已经接近极限, 为进一步提高冷原子微波钟性能, 科学家利用空间站的微重力环境, 在研制着空间冷原子钟. 提高喷泉钟的连续运行能力也是一个努力方向. 光学频率原子钟的频率稳定度性能和频率不确定度性能均优于喷泉钟2—3个量级, 将来一定会取代铯原子基准钟重新定义和复现时间单位“秒”长.

## 参考文献

- [1] Bureau International des Poids et Mesures *The International System of Units (SI)* (8th ed.) p113
- [2] Wang Z B, Zhao L, Wang S G, et al. 2014 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **57** 1788
- [3] Li H J, Tang G F, He F, et al. 2013 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **56** 1591
- [4] Ramsey N F 1950 *Phys. Rev.* **78** 695
- [5] Dick G J 1987 *Proc. 19th Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting* Redondo Beach, USA, 1987 p133
- [6] Guéna J, Rosenbusch P, Laurent P, et al. 2012 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **57** 647
- [7] Gerginov T V, Nemitz N, Griebisch D, Kazda M, Li R, Gibble K, Wynands R, Weyers S 2010 *24th European Frequency and Time Forum* Noordwijk, Netherlands, 13-16 April, 2010 p222
- [8] Wu C J, Ruan J, Chen J, Zhang H, Zhang S G 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 063201 (in Chinese) [吴长江, 阮军, 陈江, 张辉, 张首刚 2013 物理学报 **62** 063201]
- [9] Chambon D, Lours M, Chapelet F, Bize S, Tobar M E, Clairon A, Santarelli G 2007 *IEEE Trans. Ultrason. Ferr.* **54** 729
- [10] Lipphardt B, Grosche G, Sterr U, Tamm C, Weyers S, Schnatz H 2009 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **58** 1258
- [11] Millo J, Abgrall M, Lours M, English E M L, Jiang H, Guéna J, Clairon A, Tobar M E, Bize S, Coq Y L, Santarelli G 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 141105
- [12] Zhang Y Y, Yan L L, Zhao W Y, Meng S, Fan S T, Zhang L, Guo W G, Zhang S G, Jiang H F 2015 *Chin. Phys. B* **24** 064209
- [13] Leveque T, Faure B, Esnault F X, Delaroche C, Massonnet D, Grosjean O, Buffe F, Torresi P, Bommer T, Pichon A, Beraud P, Lelay J P, Thomassin S, Laurent P 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **86** 033104
- [14] Laurent P, Abgrall M, Jentsch C, et al. 2006 *Appl. Phys. B* **84** 683
- [15] Ruan J, Liu J, Ma J, Du Z J, Wu C J, Zhang S G 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 300
- [16] Liu J, Gao J, Xu G J, et al. 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 120602 (in Chinese) [刘杰, 高静, 许冠军等 2015 物理学报 **64** 120602]

- [17] Levi F, Calosso C, Calonico D, *et al.* 2009 *IEEE International Frequency Control Symposium, Joint with the 22nd European Frequency and Time Forum* Besancon, France, 28 December, 2009 p769
- [18] Levi F, Calosso C, Calonico D, *et al.* 2010 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **57** 600
- [19] Szymaniec K, Park S E, Marra G, Chałupczak W 2010 *Metrologia* **47** 363
- [20] Pereira F, Marion H, Bize S, Sortais Y, Clairon A, Salomon C 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 233004
- [21] Li R, Gibble K 2010 *Metrologia* **47** 534
- [22] Gibble K, Lea S N, Szymaniec K 2015 *Conference on Precision Electromagnetic Measurements* Washington DC, America, 2012 p700
- [23] Park S E, Heo M S, Kwon T Y, *et al.* 2014 *IEEE International Frequency Control Symposium* Taipei, China, 2014, p1
- [24] Santarelli G, Governatori G, Chambon D, Lours M, Rosenbusch P, Guena J, Chapelet F, Bize S, Tobar M E, Laurent P, Potier T, Clairon A 2009 *IEEE Trans. Ultrason. Ferr.* **56** 1319
- [25] Guena J, Abgrall M, Rovera D, Laurent P, Chupin B, Lours M, Santarelli G, Rosenbusch P, Tobar M E, Li R, Gibble K, Clairon A, Bize S 2012 *IEEE Trans. Ultrason. Ferr.* **59** 391
- [26] Heavner P, Donley A, Levi F, Costanzo G, Parker E, Shirley H, Ashby N, Barlow S, Jefferts S 2014 *Metrologia* **51** 174
- [27] Gerginov V, Nemitz N, Weyers S, Schroder R, Griebisch D, Wynands R 2010 *Metrologia* **47** 65
- [28] Levi F, Calonico D, Calosso E, Godone A, Micalizio S, Costanzo A 2014 *Metrologia* **51** 270
- [29] Li R X, Gibble K, Szymaniec K 2011 *Metrologia* **48** 283
- [30] Fang F, Li M S, Lin P W, Chen W L, Liu N F, Lin Y G, Wang P, Liu K, Suo R, Li T C 2015 *Metrologia* **52** 454
- [31] Niering M, Holzwarth R, Reichert J, Pokasov P, Udem T H, Weitz M, Hansch T W, Lemonde P, Santarelli G, Abgrall M, Laurent P, Salomon C, Clairon A 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5496
- [32] Mohr P J, Taylor B N, Newell D B 2012 *Rev. Mod. Phys.* **84** 1527
- [33] Dirac P A M 1937 *Nature* **139** 323
- [34] Srianand R, Chand H, Petitjean P, Aracil B 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 121302
- [35] Bize S, Wolf P, Abgrall M, Cacciapuoti L, Clairon A, Grunert J, Laurent Ph, Lemonde P, Luiten A N, Maksimovic I, Mandache C, Marion H, Pereira Dos Santos F, Rosenbusch P, Salomon C, Santarelli G, Sortais Y, Tobar M E, Vian C, Zhang S 2004 *Lect. Notes Phys.* **648** 189
- [36] Marion H, Pereira Dos Santos F, Abgrall M, Zhang S, Sortais Y, Bize S, Maksimovic I, Calonico D, Grunert J, Mandache C, Lemonde P, Santarelli G, Laurent P H, Clairon A, Salomon C 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 150801
- [37] Ashby N, Heavner T P, Jefferts S R, Parker T E, Radnaev A G, Dudin Y O 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 070802
- [38] Wolf P, Chapelet F, Bize S, Clairon A 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 060801
- [39] Zhang S 2004 *Ph. D. Dissertation* (Paris: Université de Paris VI)
- [40] Sortais Y, Bize S, Nicolas C, Clairon A, Salomon C, Williams C 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3117
- [41] Marion H, Bize S, Cacciapuoti L, *et al.* 2004 *18th European Frequency and Time Forum* Guildford, England, 2004 p49
- [42] Hinkle N, Sherman J A, Phillips N B, Chioppo M S, Lemke N D, Beloy K, Pizzocaro M, Oates C W, Ludlow A D 2013 *Science* **341** 1215
- [43] Hagemann C, Grebing C, Lisdat C, Falke S, Legero T, Sterr U, Riehle F, Michael J, Martin, Ye J 2014 *Opt. Lett.* **39** 5102
- [44] Bloom B J, Nicholson T L, Williams J R, Campbell S L, Bishof M, Zhang X, Zhang W, Bromley S L, Ye J 2014 *Nature* **506** 71
- [45] Ushijima I, Takamoto M, Das M, Ohkubo T, Katori H 2015 *Nat. Photon.* **9** 185
- [46] Chou C W, Hume D B, Koelemeij J C J, Wineland D J, Rosenband T 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 070802
- [47] Gao K L 2013 *Chin. Sci. Bull.* **58** 853
- [48] Zhang T G, Wang Y F, Zang X R, *et al.* 2013 *Chin. Sci. Bull.* **58** 2033
- [49] Wang Y F, Wang D Y, Zhang T G, *et al.* 2013 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **56** 1107

SPECIAL ISSUE — Quantum metrology and control

# Progress towards primary frequency standard\*

Ruan Jun Wang Ye-Bing Chang Hong Jiang Hai-Feng Liu Tao Dong Rui-Fang  
Zhang Shou-Gang<sup>†</sup>

(National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

(Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standard, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

( Received 11 July 2015; revised manuscript received 13 August 2015 )

## Abstract

The cesium fountain clock as primary frequency standard is widely used in the areas, such as time-keeping system, satellite navigation, fundamental physics research, etc. The principle of operation of cesium fountain clock is introduced. The noise source and frequency shift term are analyzed. The major noise source influencing frequency stability are cold atom loading time, microwave phase noise related to Dick effect, and detection laser frequency noise. The major frequency bias influencing frequency uncertainty is blackbody radiation frequency shift, cold atom collision frequency shift, distributed cavity phase frequency shift and microwave leakage frequency shift. The key technique to achieve high-performance cesium fountain clock is summarized. The application of cesium fountain clock is presented. The status of space cesium clock and future primary frequency standard of optical clock are shown.

**Keywords:** cesium fountain clock, frequency stability, frequency uncertainty, optical clock

**PACS:** 03.75.Dg, 32.70.Jz, 07.77.Gx, 06.30.Ft

**DOI:** [10.7498/aps.64.160308](https://doi.org/10.7498/aps.64.160308)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61127901, 91336101, 11074252, 11273024, 11174282).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [szhang@ntsc.ac.cn](mailto:szhang@ntsc.ac.cn)