



高精度(10^{-15})可搬运铷原子喷泉钟的研制

史春艳^{①②}, 魏荣^{①②*}, 李唐^{①②}, 周子超^{①②}, 王育竹^{①②}

① 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800;

② 中国科学院冷原子物理中心上海基地, 上海 201800

* 联系人, E-mail: weirong@siom.ac.cn

收稿日期: 2011-03-22; 接受日期: 2011-04-11

国家自然科学基金(批准号: 10974215)和华东科技大学精密光谱科学与技术国家重点实验室开放课题资助项目

摘要 原子喷泉钟是目前世界上最准的运行原子钟, 主要包括铯喷泉钟和铷喷泉钟两种. 中国科学院上海光学精密机械研究所于2003年开始开展了可搬运小型喷泉铷钟样机的研制, 它的主要特点是: 以铷原子做工作介质、损耗低、信噪比高、冷原子碰撞频移低; 通过折叠光路设计, 其对激光的功率要求降低2/3, 系统更加紧凑稳定, 更加有利于喷泉钟的工程化. 该原子钟已经获得了微波跃迁的 Ramsey 干涉条纹, 其信噪比约100, 并实现了闭环锁定, 1 s 的稳定度为 8×10^{-13} , 4×10^4 s 稳定度优于 6×10^{-15} . 目前正在进行误差的评估工作及系统的改进, 近期将进行项目验收, 预期总的频率不确定度优于 4×10^{-15} .

关键词 铷原子喷泉钟, 折叠光路, 误差评估, 喷泉钟样机

PACS: 03.65.Ta, 06.20.fb, 32.30.Bv

1 引言

原子喷泉钟是目前世界上参与到国际原子时(UTC)和坐标世界时(TAI)比对中最准的原子钟^[1], 它在全球的共视比对系统中的贡献具有相当大的权重. 目前国际上喷泉钟的相对频率不确定度的误差评估及国际间的喷泉钟比对结果均已经进入 10^{-16} 量级, 并且性能正不断地提高, 有望达到 1×10^{-16} ^[2]. 国内以中国计量科学研究院、中国科学院上海光学精密机械研究所、国家授时中心为代表的科研单位已经研制成功喷泉钟或突破了原子喷泉的关键技术, 并有望将其应用于我国导航系统地面守时钟.

国际上的原子喷泉钟主要以铯(^{133}Cs)原子和铷(^{87}Rb)原子作为工作介质. 由于目前的时间单位秒的定

义是基于 ^{133}Cs 的基态超精细跃迁频率, 因此多数计量机构研制 ^{133}Cs 原子喷泉. 冷 ^{87}Rb 原子以更小的碰撞频移等优势使得国际上越来越多的科研机构开展了 ^{87}Rb 喷泉钟的研究, 其中包括法国 BNM-SYRTE^[3]、美国 USNO^[2]、英国 NPL^[4]和中国科学院上海光学精密机械研究所^[5]. BNM-SYRTE 是第一个开展了 ^{87}Rb 喷泉钟研制的机构. 在2004年第16届国际时频协商会议(CCTF)上, ^{87}Rb 基态超精细跃迁被推荐为秒定义的二级标准频率. 美国 USNO 正在研制的6台 ^{87}Rb 喷泉钟, 不仅在 TAI 和 UTC 比对中的权重超过30%, 更为全球美军和 GPS 系统提供授时服务, 这些工作都说明了铷喷泉钟研究的深远意义.

在原子喷泉钟领域, 原子相对于 ^{133}Cs 原子的特别和优势主要在以下几个方面:

引用格式: 史春艳, 魏荣, 李唐, 等. 高精度(10^{-15})可搬运铷原子喷泉钟的研制. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 611-619

Shi C Y, Wei R, Li T, et al. Working for a mobile high accuracy (10^{-15}) rubidium atomic fountain clock (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2011, 41: 611-619, doi: 10.1360/132011-380

首先, 冷 ^{87}Rb 原子散射截面小, 碰撞频移小, 其碰撞频移比 ^{133}Cs 小 50~100 倍^[6]. 在铷原子喷泉中, 通常要使喷泉钟工作在高密度和低密度两种状态或者用其他的方法来减小这种频率影响, 这给对比对工作带来一定的复杂度. 碰撞频移是影响原子喷泉准确度的重要因素, ^{87}Rb 具有非常明显的优势.

其次, 可置备冷原子数目多. 原子钟的跃迁的冷原子数目是影响原子喷泉钟短期稳定度, 它对原子钟的信噪比和短期稳定度都有直接的影响, 但是存在多个磁子能级, 可用冷原子有限, ^{87}Rb 有 1/5 的冷原子可用, 而 ^{133}Cs 只有 1/9, 故同等俘获条件下 ^{87}Rb 的信号冷原子比 ^{133}Cs 高近一倍, 对应信噪比更好, 短稳更高.

^{87}Rb 的第 3 个优点是其激光冷却的波长为 780 nm, 在这个波段可选择的激光器比 ^{133}Cs (其激光冷却波长为 852 nm)多, 另外 780 nm 可通过 1560 nm 的激光倍频上去, 而 1560 nm 是通讯波段的波长, 选择余地更大. 原子喷泉极有可能成为下一代商业钟, 目前其技术难点就在于可靠性还不能满足故障率小于 1 次/年的要求, 国际上最先进的喷泉钟也没有做到. 产生故障的最重要因素就是由于激光器的相关问题(例如失锁或跳模), 选择和优化的激光器可以解决该问题, 它的前提条件是有大量的候选器件.

由于 ^{87}Rb 的上述特点, 中国科学院上海光学精密机械研究所从 2003 年开展了可搬运铷喷泉钟的研制, 目的就是研制出可用于地面台站的可搬运原子钟, 目前已经实现了闭环锁定, 正在进行误差评估的工作, 详见下文.

2 ^{87}Rb 原子喷泉的结构

原子喷泉包括 4 个部分: 物理系统、光学系统、微波系统和控制系统.

2.1 物理系统

原子喷泉的物理系统如图 1 所示, 它是原子与微波作用的工作区域, 物理系统用两个离子泵维持超高真空. 原子喷泉运行时, 冷原子被俘获-上抛-选态-与微波作用-探测, 控制系统从探测信号中提取出频率偏移信息, 再反馈给晶振, 从而实现整个锁定过程.

物理系统真空腔体主体材料为铝, 自上而下, 采用了“Ramsey 作用区-双能级探测区-选态区-冷原子



图 1 喷泉物理部分装置图

Figure 1 Picture of physics part of atomic fountain.

俘获区”的设计. 在真空腔的顶部和底部各有一台离子泵(分别为 75L/50L), 系统的真空度维持在 2×10^{-7} Pa.

冷原子俘获区为(1,1,1)的结构(若将俘获区看作一个虚拟的立方体, 6 束激光分别垂直于其各个面从这些面的中心射入, 而竖直方向, 也就是冷原子的上抛方向位于该立方体的一条体的对角线上), 采用磁光阱俘获冷原子云, 用光学黏胶作进一步冷却, 最后移动光学黏胶上抛原子团.

选态腔和 Ramsey 作用腔都采用 $D:L=2:1$ 的柱型腔, 模式为 TE₀₁₁ 模, 选态腔为铝腔, Ramsey 作用腔为无氧铜腔, Ramsey 腔的 Q 值为 18000.

原子喷泉对微波作用区的磁场均匀性有非常严格的要求. 在喷泉装置中采用了 3 层波莫合金和 1 层软铁屏蔽用以衰减地磁场或其他杂散磁场的影响, 并用螺线管和多个补偿线圈获得喷泉所要求的均匀磁场. 为了保证腔的共振频率和减小黑体辐射频移, 整个 Ramsey 作用区温度维持在 52°C , 温度起伏由温控系统维持在 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内.

2.2 光学系统

光学系统为原子喷泉提供激光源, 通过对激光频率和功率的时序控制, 实现对原子的俘获、冷却、

上抛、探测. 我们在光学系统的研究方面做了一些有特色的工作, 具体来说, 就是提出并实现了折叠光路(FOP)俘获冷原子的方案, 其基本原理如图 2 所示. 目前国际上其他小组的原子喷泉均采用 6 束激光俘获原子的方案(图 2(a)), 这种方法在光束产生和机械调节方面繁杂度相对较高, 而我们利用 2 束激光多次反射的办法替代了传统的 6 束激光, 通过合理的安排结构, 完全可以实现原子喷泉所要求的全部功能. 我们突破了该结构的一系列技术困难, 在实验上实现了 FOP 型的原子喷泉.

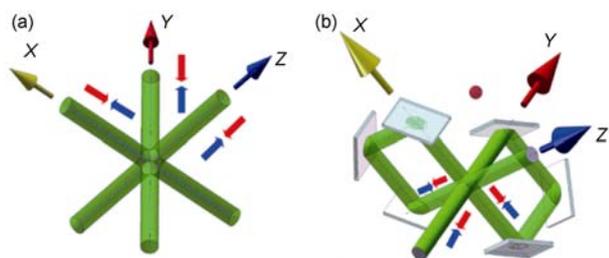


图 2 传统原子喷泉(a)和折叠光路型原子喷泉(b)结构比较
Figure 2 Structures of normal fountain (a) and fold-optical-path style fountain (b).

该结构具有如下优点: (1) 大大降低了原子喷泉对激光功率的要求. 由于喷泉激光功率的 90% 以上用于原子冷却与俘获, 若运用该结构将使总激光功率降低了 60% 以上. 目前我们的系统采用德国 TopTICA 公司的 TA100 半导体激光器, 输出功率为 120 mW, 可以用一台半导体激光器驱动原子喷泉. (2) 省去 4 套光纤及其配套的输入输出耦合系统, 减小了光纤对喷泉系统的影响, 提高了系统的稳定性. (3) 简化了前端的光学系统, 从而使光路更加紧凑、可靠、稳定.

光学系统的结构如图 3 所示. 通过饱和吸收光路将激光频率锁定在一个共振峰上, 利用声光调制器(AOM)实现激光的功率和频率控制. 最终通过 5 根光纤输出 2 束俘获光, 2 束再泵浦光, 1 束探测光, 通过时序控制实现原子喷泉.

喷泉的探测部分采用双能级探测的办法, 这是一项标准技术, 原理详见^[3,7], 每个能级原子数的探测采用激光驻波场探测, 垂直方向用光电管(日本滨松公司 S1337-1010BR)收集荧光, 再由电流放大器(美国 Keithley 公司 428)转化为可探测的电压信号, 由数据采集卡送入计算机.

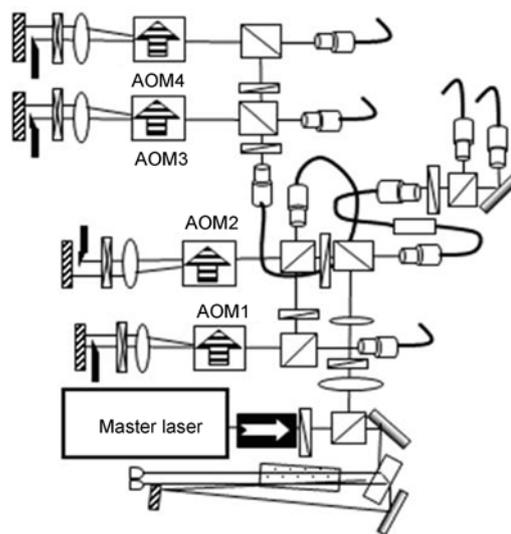


图 3 光路图
Figure 3 Structure of optical path.

2.3 微波系统

由于本实验室的守时系统还不是特别完善, 本系统的微波比对实验主要采用两种方法, 如图 4 所示, 一种是利用原子喷泉锁定晶体振荡器(瑞士 OSA 的 BVA 8607) (图 4(a)), 晶振锁定后的信号和氢钟(俄罗斯 VCH-1003A)的信号进行比对, 另外一种是直接以氢钟的 5MHz 作为微波链路的参考, 经喷泉钟鉴频后将反馈信号加在微波链路的频率偏移上, 这里提到的微波系统主要指图 4 中的微波链路.

原子喷泉采用周期性的工作模式, 它与微波的

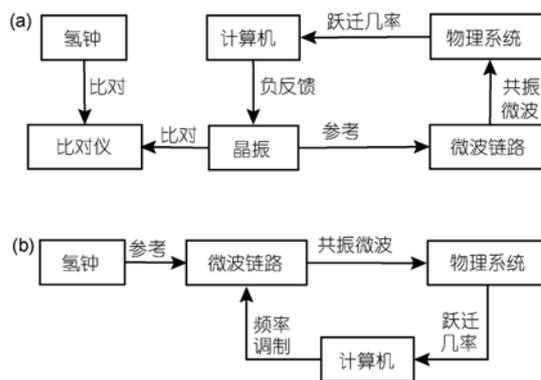


图 4 喷泉锁定的两种方式

(a) 锁定晶振然后与氢钟比对; (b) 直接参考氢钟信号
Figure 4 Two Structures of lock-in of fountain. (a) is locking oscillator and comparing with H-maser, (b) is referring H-maser directly.

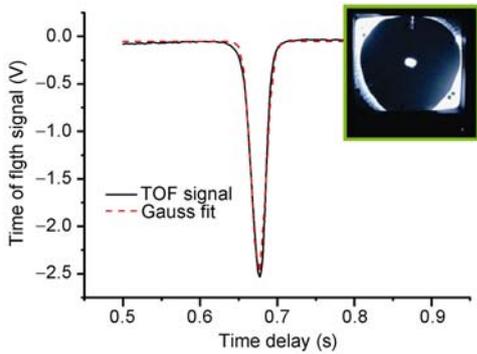


图 7 飞行时间信号(实线)和它的高斯拟合(虚线)结果(右上角的图片是一张 CCD 拍摄的冷原子在磁光阱中的照片)
 Figure 7 Time of flight signal (solid line) and its Gauss-fit (dash line) curves, the picture at upper right is a photo of cold atom cloud at magnetic-optical trap, which taken by a CCD.

满足选态腔 π 跃迁和 Ramsey 腔 $\pi/2$ 跃迁的微波功率, 然后以氢钟的 5 MHz 信号作为参考, 扫描微波链路的频率, 得到 Ramsey 干涉条纹, 如图 8 所示. 测试干涉条纹的频率步进 0.1 Hz, 干涉条纹的谱线宽度为 1 Hz, 信噪比约为 100.

Ramsey 干涉条纹是原子喷泉闭锁的鉴频曲线, 对喷泉具有非常重要的意义, 条纹的品质很大程度上决定喷泉闭环锁定的结果, 根据干涉条纹可以预估喷泉的短期稳定度为 $7 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, 这与前面的预估结果基本一致.

4 原子喷泉的闭环锁定与评估

通过对系统的优化与改进, 我们实现了原子喷

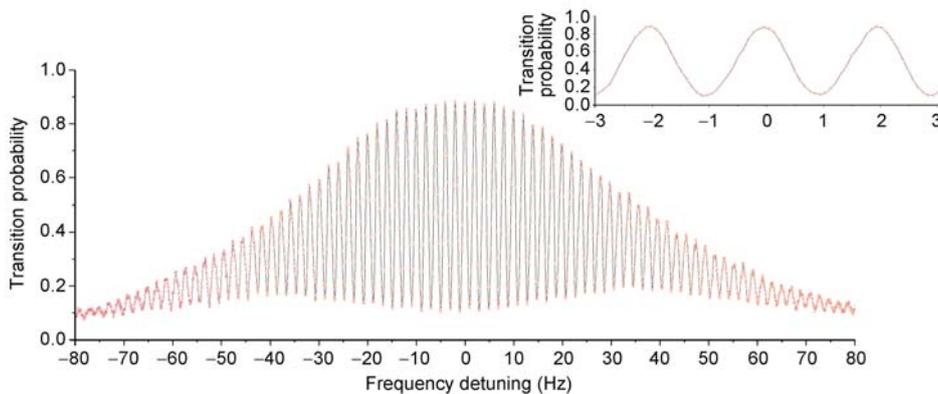


图 8 原子喷泉的干涉条纹(其谱线宽度为 1 Hz, 信噪比为 100, 右上角是曲线在中心附近的展开)
 Figure 8 Ramsey fringes of atomic fountain with line-width of 1 Hz and signal-noise ratio of 100, the upper right one is the expansion of curve nearby the center.

泉的准连续运行, 系统闭锁后可以连续运行 10 d 以上, 更长时间的实验由于受限于目前的各项工作安排没有进行, 预期连续工作时的故障周期在一个月左右. 最可能的故障是激光器失锁, 这部分工作还有进一步改进的空间, 我们正着手准备做相关的工作.

原子钟的评估工作需要守时系统, 目前我们实验室只有一台氢钟(俄罗斯 VCH-1003A), 它具有很好的稳定度(秒稳 2×10^{-13} , 万秒稳定度 $(2 \sim 3) \times 10^{-15}$), 但是其复现性和准确度比较差(约 10^{-11}), 日漂移偏大, 为 7×10^{-15} . 对原子喷泉而言, 其不确定度、长期稳定度均在 10^{-15} 量级, 故实验中原子喷泉的长期稳定度 ($> 1 \times 10^4$ s) 实际包含了氢钟的噪声. 对喷泉钟误差的评估, 我们采用系统误差(type-B uncertainty)自评估的办法, 这也是喷泉钟准确度评估使用的标准方法.

4.1 闭环锁定

我们采用干涉条纹中心谱线半高宽处调制的办法^[7], 让原子喷泉运行两个周期, 工作频率分别在中心条纹的两个半高宽处, 两跃迁几率求差得到误差信号, 再通过反馈控制实现闭环锁定. 原子喷泉的闭环锁定采用图 4 所示的两种方法.

图 9 是一组 3×10^5 s 的喷泉锁定的晶振与氢钟比对的实验结果. 它由 3 部分曲线构成, 0.01~1 s 是晶振与氢钟比对的曲线, 从 1~10 s, 由于喷泉的反馈作用, 晶振的噪声出现恶化, 而 10 s 以后的曲线是喷泉与氢钟的比对结果, 在 4×10^4 s, 比相的结果优于 8×10^{-15} . 从图 9 可以看出, 比对恶化的极值点出现在 10 s, 这实际说明喷泉锁晶振环路带宽为 10 s, 而考

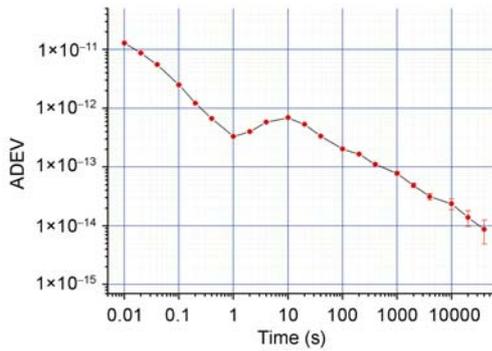


图9 喷泉锁定晶振后与氢钟比对的结果

Figure 9 Comparing curve of oscillator locking to fountain and H-maser.

考虑喷泉的周期为 4 s, 应该有改进的余地. 而环路带宽设置太低的原因实际是由于我们控制系统的一些缺陷, 使反馈信号需要隔一个锁定周期才能反馈到晶振上, 8 s 的时延造成了约 10 s 的带宽, 其结果就是短稳被恶化(图中为 $3 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$), 到达噪底时间大大延长. 下一步我们消除这一缺陷, 则短稳将有所改善, 到达噪底的时间将会降低.

相对而言直接参考氢钟信号会避免这些问题, 图 10 是一组 4×10^5 s 的喷泉相对氢钟闭环频率偏移的实验, 由图 10 可以看出, 系统的短期稳定度可以表

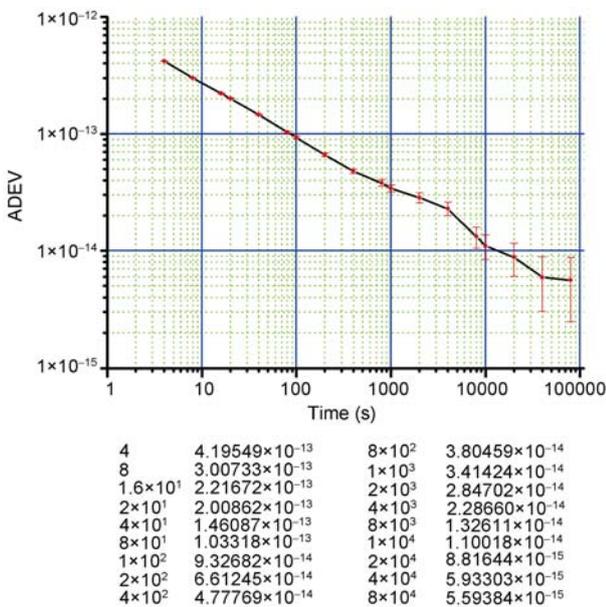


图 10 喷泉与氢钟比对的阿兰方差曲线

Figure 10 Allan deviation curve of fountain comparing with H-maser.

示为 $8 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, 这与我们根据微波系统噪声和 Ramsey 干涉条纹信噪比预测的结果基本一致. 在 2×10^4 s, 系统进入 10^{-15} , 4×10^4 s 和 8×10^4 s 的稳定度分别为 5.9×10^{-15} , 5.6×10^{-15} . 这说明喷泉系统的长期稳定度优于 6×10^{-15} .

目前的实验结果还将会进一步改进, 一方面新的微波链路将很快实现, 微波链路改善后, 预期系统的短期稳定度将进入 $4 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, 这样 1×10^4 s 的稳定度有望达到 4×10^{-15} , 这样氢钟频率漂移的影响可以被有效抑制, 更容易测到喷泉的噪底; 另一方面, 我们需要更长时间(10~30 d)的比对实验, 检测系统的更长期稳定度, 测试氢钟的漂移规律, 并在喷泉的相关评估中修正漂移的影响.

4.2 喷泉钟的误差评估

各种效应对原子喷泉造成影响, 喷泉的频率偏移 ε 和由此带来的不确定度 σ 可以看作各种不相关效应的组合, 表示为

$$\varepsilon = \sum_i \varepsilon_i, \quad \sigma = \sqrt{\sum_i \sigma_i^2}, \quad (1)$$

式中 i 表示各种效应, 包括冷原子碰撞频移、塞曼频移、黑体辐射、腔牵引、腔相移、微波泄漏、Majorana 跃迁等. 经过原子钟和原子喷泉的多年发展, 对这些误差的评估有了一套比较成熟的办法, 其基本原理是改变参数, 将噪声源引起的偏差放大, 测试偏差, 然后根据噪声源的实际大小评估出频差. 表 1 是我们目前误差评估的情况和结果.

喷泉微波作用区的磁场测量是误差评估的重要工作, 塞曼效应和 Majorana 跃迁都与磁场有关, 我们设计了磁屏蔽筒和各种取向线圈以获得喷泉实验所需的磁场. 在装配时用磁强计测量其磁场起伏为 2 nT, 但该区域的磁场受装配过程或磁屏蔽磁化的影响而随时间变化, 故需要测试喷泉实际工作时的磁场. 装置装配好以后, 作用区被封闭在真空腔内无法直接测量, 我们利用了空间辐射法^[8]和激光拉曼跃迁法测试了微波作用区的磁场曲线, 以该曲线为参考, 通过调节各取向线圈, 获得喷泉所需的均匀取向磁场, 图 11 是用拉曼法测得的磁场分布曲线.

由图 11 可知, 微波作用区的平均磁场为 130 nT, 磁场不均匀性小于 5 nT, 但在作用区底部, 从 Ramsey 腔开始磁场有比较大的变化, 这是由于磁屏蔽内的加热带有微弱磁性造成的, 将加热带改装到

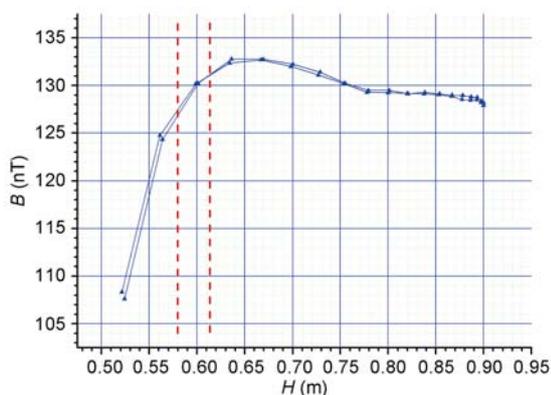


图 11 激光拉曼法测得的微波作用区磁场曲线(两条红色虚线内区域为 Ramsey 腔区)

Figure 11 Magnetic density map of interaction zone of fountain measured by laser-Raman method. Zone between two red dash line is Ramsey cavity.

内层磁屏蔽外部可以消除该磁场梯度.

微波作用区的磁场不均匀性相对塞曼效应而言只是一个偏置的改变, 对不确定度并无影响, 我们通过监视取向线圈电流的变化测试了磁场不确定度为 0.09 nT, 引起的频率不确定度小于 2×10^{-16} . 磁场的空间不均匀性主要通过 Majorana 跃迁改变原子的布居, 通过对布居数的测量, 我们分析了相关的误差, 见表 1.

黑体辐射效应和腔牵引使得喷泉对微波作用区的温控有比较高的要求. 我们采用温控精度为 0.1°C 控制作用区的温度, 并对控制效果进行了测量, 测试探头为 Pt100 铂电阻, 实验结果如图 12 所示. 我们在喷泉作用区等高度距离共安装了 4 个探头, 自上而下分别为 Pt₁~Pt₄, 其中 Pt₂ 作为控制系统监视探测. 在图 12 中, 共有 3 条曲线, 分别是 Pt₁, Pt₃, Pt₄ 的曲线, 可以看出各个探头的温度并不相同, 有最大 2°C 的梯度, 由于喷泉是一个热耗散系统, 这是不可避免的, 而各个探头的温度都控制在 0.1°C , 满足设计要求. 但是同时我们也可以看出, 各控制曲线都有规则的振荡, 说明误差信号提取系统的分辨率不够, 如果提高分辨率, 稳定控制精度可进一步提高. 黑体辐射和腔牵引的评估结果见表 1.

我们通过 GPS 测试了实验室所在地面的海拔, 由此评估了引力红移, 通过改变密度的办法测试了冷原子碰撞频移, 在可测量精度(约 8×10^{-15})范围内未测到相对变化, 于是利用参考文献中的相关参数, 对碰撞频移进行了评估. 微波泄漏、腔相移的测试工作

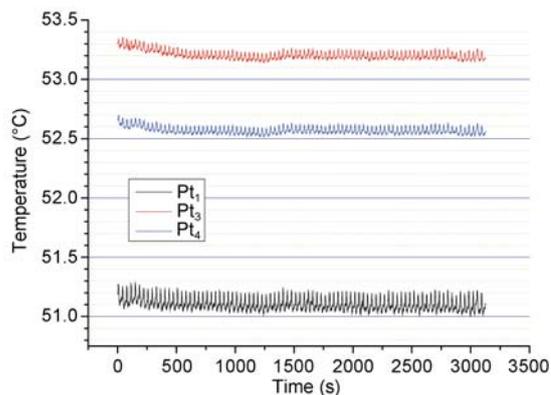


图 12 喷泉的温控曲线

Figure 12 Temperature controlling curves of fountain.

表 1 喷泉的系统频移和他们的附加不确定度

Table 1 Systematic frequency corrections and their associated uncertainties of fountain

误差源	偏移 (10^{-15})	不确定度 (10^{-15})	备注
塞曼频移	142.2	0.2	完成
腔相移	-	-	测试中
黑体辐射	-17.3	0.13	完成
冷原子碰撞	-0.1	0.03	基本完成
Majorana 跃迁	<0.1	<0.1	完成
腔牵引	0	0.06	基本完成
微波泄漏	0	-	测试中
引力红移	0.99	<0.1	完成
汇总		<5	预期

正在进行中. 根据目前的实验结果, 我们喷泉系统预期的不确定度将 5×10^{-15} .

5 小结与展望

中国科学院上海光学精密机械研究所从 2003 年开始开展了可搬运原子喷泉钟的研制, 目前已经得到了 Ramsey 干涉条纹, 实现了闭环锁定, 其短稳为 $8 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, 40000 s 稳定度优于 6×10^{-15} 的实验结果, 已经完成了多项主要误差的评估. 目前正在进行几项关键技术(例如微波链路)的优化和误差评估的工作, 将在 2011 年年内完成上述工作并实现喷泉钟装置的验收, 预期的短稳在 $(4 \times 10^{-13} \sim 5 \times 10^{-13}) \tau^{-1/2}$, 准确度将优于 5×10^{-15} .

在本项研究中, 我们充分考虑了喷泉钟的应用前景和可能遇到的可靠性方面的问题, 提出了折叠光路等方案, 简化了系统, 特别是光学系统, 显著降

低了激光功率要求(减少了 60%以上), 这些都有助于实现喷泉钟的工程化. 接下来, 我们在兼顾提高喷泉钟性能的同时还将继续瞄准工程化商业化的方向进一步改进喷泉钟装置的各个系统. 对于光学系统, 我们计划采用蜂窝型紧凑结构对其进行固化, 并使其具有小型化、低功耗、高稳定性、易搬运等特点. 在冷原子制备方面, 计划增加一个预制备装置, 它一方面可以增加原子数, 提高喷泉钟的信噪比和短稳, 另一方面它还可以减小微波与原子作用的死时间, 减小 Dick 效应对喷泉钟短稳的影响. 在微波系统方面, 新的微波综合链正在研制中. 预期运用新微波综合链

将使喷泉钟的短期稳定度进入 $4 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$. 在控制方面, 我们将做进一步优化以提高系统的稳定性, 如 C 场电流控制、腔体温度控制、反馈环路控制等等.

目前的喷泉装置还处于原理性样机阶段, 距离真正实现可搬运还有一定的困难. 由于缺少经验, 喷泉钟在设计方案上也存在一定的缺陷, 这些都限制了本系统指标的进一步提高. 我们希望在结束本喷泉钟装置的仪器验收后能够开展真正可搬运的工程样机的研制, 结合积累的经验和技术, 使系统更加简化, 性能指标进一步提高, 最终研制成长稳和准确度优于 3×10^{-15} 的高性能可搬运喷泉钟.

致谢 感谢王义道、翟造成、李天初、黄秉英老师、张首钢研究员和徐信业教授对本项研究的长期一贯的关注与支持.

参考文献

- 1 Petit G. Atomic time scales TAI and TT(BIPM) present status and prospects. In: Frequency Standards and Metrology, Proceedings of the 7th symposium. World Scientific Publishing Co., 2009. 475–482
- 2 Matsakis D. Time and Frequency Activities at the U.S. Naval Observatory. Int J Navig Observ, 2008, 2008: 387418, doi: 10.1155/2008/387418
- 3 Lemonde P, Laurent P, Santarelli G, et al. Cold-atom clocks on earth and in space. Frequency Measurement and Control. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. 79: 131–153
- 4 Ovchinnikov Y B. Compact magneto-optical source of slow atoms. Opt Comm, 2005, 249(4): 473–481
- 5 Zhou Z C, Wei R, Shi C Y, et al. Observation of modulation transfer spectroscopy in the deep modulation regime. Chin Phys Lett, 2010, 27(12): 124211
- 6 Fertig C, Gibble K. Measurement and cancellation of the cold collision frequency shift in an ^{87}Rb fountain clock. Phys Rev Lett, 2000, 85: 1622–1625
- 7 Wynands R, Weyer S. Atomic fountain clocks. Metrologia, 2005, 42: S64–S79
- 8 Shi C Y, Wei R, Zhou Z C, et al. Magnetic field measurement on ^{87}Rb atomic fountain clock. Chin Opt Lett, 2010, 8(6): 549–552

Working for a mobile high accuracy (10^{-15}) rubidium atomic fountain clock

SHI ChunYan^{1,2}, WEI Rong^{1,2*}, LI Tang^{1,2}, ZHOU ZiChao^{1,2} & WANG YuZhu^{1,2}

¹ Key laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

² Center for Cold Atom Physics, Shanghai, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Fountain clocks, including cesium fountains and rubidium fountains, are the most accurate running atomic clocks in the world. A mobile rubidium clock prototype has been researching at SIOM since 2003, the unique features of the fountain clocks are: less cold-atom loss, higher SNR and less collision-shift were acquired by operating with rubidium, a fold optical path decreased laser power by 2/3, which also made the whole device be more stable, compact, and easier to manufacture. The Ramsey finger of microwave-transition in the fountain clock has been obtained with its SNR of about 100. The fountain clock has been lock to a H-maser, Allan Deviation calculating had shown that the short-term fractional frequency instability was 8×10^{-15} at 1 s, and long-term fractional frequency instability was better than 6×10^{-15} in 4×10^4 s. Errors evaluating and system optimizing are in process, the total fractional uncertainties are expected to be less than 4×10^{-15} when it is evaluated recently.

rubidium atomic fountain clock, fold optical path, uncertainty evaluation, fountain clock prototype

PACS: 03.65.Ta, 06.20.fb, 32.30.Bv

doi: 10.1360/132011-380