

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2019-02-0107-08

铯原子喷泉钟频移的自动评定系统研究*

刘丹丹^{1,2,3}, 阮军^{1,2}, 管勇^{1,2,3}, 张辉^{1,2}, 杨帆^{1,2,3},
王心亮^{1,2}, 施俊如^{1,2,3}, 张首刚^{1,2}

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国科学院 时间频率重点实验室, 西安 710600;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:“秒”定义频率 9 192 631 770 Hz 是理想值, 在实际工作过程中, 铯原子喷泉钟在外部环境(如引力场、电磁场等)、内部原子相互作用(如碰撞)下, 原子样品的跃迁频率偏离了定义值, 这些偏离量称为“频移”。为了获得被测原子钟信号和秒定义频率之间的偏差, 需要测量所有频移量, 并且给出其频率不确定度。介绍了频移自动评定系统的设计和实现, 考虑了各项频移的运行周期和切换间隔, 实时给出二阶塞曼频移、冷原子碰撞频移和黑体辐射频移的纠正量, 计算分析获得了频移量的系统不确定度。

关键词: 铯原子喷泉钟; 自动评定; 二阶塞曼频移; 冷原子碰撞频移

Research on automatic assessment system for frequency shift of cesium fountain clock

LIU Dan-dan^{1,2,3}, RUAN Jun^{1,2}, GUAN Yong^{1,2,3}, ZHANG Hui^{1,2}, YANG Fan^{1,2,3},
WANG Xin-liang^{1,2}, SHI Jun-ru^{1,2,3}, ZHANG Shou-gang^{1,2}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The definition of the second is realized by cesium atomic clock. In practice, the transition frequencies of cesium fountain clock deviates from the defined values under the external environment (such as gravitational field, electromagnetic field, etc.) and the internal atomic interaction (such as collision), these deviations are called frequency shift. In order to measure the frequency difference between atomic clock signal and the “second” defined, the frequency shifts with uncertainty need to be evaluated. The design of automatic evaluation system of cesium fountain clock is presented in details. Frequency shifts are corrected for the following four effects; second-order Zeeman shift, blackbody radiation shift, cold collisions shift and gravitational shift.

Key words: cesium fountain clock; automatic evaluation system; second-order Zeeman shift; cold collisions shift

* 收稿日期: 2018-10-17; 接受日期: 2018-12-13

基金项目: 国家重点研发资助项目(2016YFF0200202)

作者简介: 刘丹丹, 女, 助理研究员, 主要从事铯原子喷泉钟控制系统研究。

0 引言

“秒”定义的频率 9 192 631 770 Hz 为平均海平面上的无干扰下 ^{133}Cs 原子基态两个超精细能级之间的跃迁频率。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工作方式,将频率综合器的频率锁定在 $|3,0\rangle \rightarrow |4,0\rangle$ 中心条纹的中心频率上,获得了被测原子钟信号与秒定义频率的差值。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)作用下、内部原子相互作用(如碰撞)下,原子样品的跃迁频率偏离了定义值,这些偏离量称为“频移”。铯原子喷泉钟作为频率基准标校着国际原子时 TAI 的准确度^[1-4],其系统频移项有十几项,其中四项频移量较大,分别为二阶塞曼频移、黑体辐射频移、碰撞频移和引力红移。其他频移项纠正量较小,归入不确定度的计算。

二阶塞曼频移、黑体辐射频移和碰撞频移的测量需计算机控制实现,其频移量随时间变化需实时计算纠正,设计频移的自动评定系统,扣除这几项频移项后得到氢钟与“秒”定义的频差数据。

文中第 1 节理论介绍四项频移及不确定度的计算,第 2 节从硬件和软件方面阐述了频移自动评定系统的实现过程,详细说明了四项频移的测量在软件上的实现和频移的自动评定系统的软件设计流程,结论部分在第 3 节陈述。

1 频移的自动评定系统理论

铯原子喷泉钟以氢钟为外参考信号,获得的是被测原子钟信号和秒定义频率之间的频率差,即氢钟和铯原子喷泉钟的频差^[5],表示为

$$\mathcal{Y}_{\text{HM}} - \mathcal{Y}_{\text{NTSC-F1}} = \frac{f_{\text{mea}}}{f_0} - f_{\text{Zee2}} - f_{\text{col}} - f_{\text{BBR}} - f_{\text{RS}}, \quad (1)$$

式(1)中, f_{mea} 为锁定后铯原子喷泉钟和氢钟的频差数据, f_{Zee2} 为二阶塞曼频移, f_{col} 为冷原子碰撞频移, f_{BBR} 为黑体辐射频移, f_{RS} 表示引力红移。首先理论研究这四项频移及不确定度的计算。

① 二阶塞曼频移

由于 C 场的存在使得钟跃迁 $|4,0\rangle \rightarrow |3,0\rangle$ 频率发生移动,二阶塞曼频移的计算公式表示为^[6-13]

$$f_{\text{Zee2}} = \frac{\Delta\nu_{\text{Zee2}}}{\nu_0} = 8 \left(\frac{\nu_{1-1}}{\nu_0} \right)^2 + 427.44 \times 10^8 \frac{\sigma^2}{\nu_0}, \quad (2)$$

式(2)中, ν_{1-1} 为 $|4,1\rangle \rightarrow |3,1\rangle$ 跃迁频率和钟跃迁频率之差, ν_0 为 9 192 631 770 Hz。 ν_{1-1} 的测量需要从激励腔中心开始逐步增加上抛高度得到。C 场随时间变化引起的不确定度表示为

$$\delta\left(\frac{\Delta\nu_{\text{Zee2}}}{\nu_0}\right) = \delta\left[8\left(\frac{\nu_{1-1}}{\nu_0}\right)^2\right] = 16 \frac{\nu_{1-1}}{\nu_0^2} \delta(\nu_{1-1}), \quad (3)$$

式(3)中, $\delta(\nu_{1-1})$ 为 ν_{1-1} 的波动,将频率综合器的频率锁定在 $|3,1\rangle \rightarrow |4,1\rangle$ Ramsey 跃迁的中心条纹上测量 ν_{1-1} 的波动。

② 冷原子碰撞频移

原子飞行到激励腔上方时由于原子之间的碰撞导致钟频率移动,这项频移称为冷原子碰撞频移,通过交替运行两个不同原子团密度即高密度和低密度测量得到^[14-17],计算公式为

$$f_{\text{col}} = \frac{\Delta\nu_{\text{corr-L}}}{\nu_0} = f_{\text{L}} - f_0 = N_{\text{L}} \frac{f_{\text{H}} - f_{\text{L}}}{N_{\text{H}} - N_{\text{L}}}, \quad (4)$$

式(4)中, N_{L} 为低密度下的原子数, N_{H} 为高密度下的原子数。 f_{H} 、 f_{L} 分别为测量时间内高低密度下测量的钟跃迁平均频率。外推到零密度的不确定度表示为

$$\sigma_{\text{ext}}^2(\tau) = \left(\frac{k}{k-1}\right)^2 \sigma_{\text{L}}^2(\tau_{\text{L}}) + \left(\frac{1}{k-1}\right)^2 \sigma_{\text{H}}^2(\tau_{\text{H}}) + \left(\frac{f_{\text{L}} - f_{\text{H}}}{(k-1)^2}\right)^2 \sigma_k^2, \quad (5)$$

式(5)中, k 为高低密度原子数比, τ_H, τ_L 分别为高低密度运行的平均时间。 $\sigma_L(\tau_L)$ 和 $\sigma_H(\tau_H)$ 分别为高低密度运行下的频率稳定度, 即将频率综合器的频率锁定在 $|3, 0\rangle \rightarrow |4, 0\rangle$ 中心条纹的中心频率上计算得到。 σ_k 为比例系数 k 的不确定度。

③ 黑体辐射频移

原子在两次 Ramsey 相互作用的飞行过程中, 飞行管产生近似理想黑体的热辐射场, 使原子能级发生改变^[18-19]。黑体辐射造成的频移表示为

$$f_{\text{BBR}} = \Delta\nu_{\text{BBR}} = k_0 E_{300}^2 \left(\frac{T}{T_0}\right)^4 \left(1 + \epsilon \left(\frac{T}{T_0}\right)^2\right), \quad (6)$$

式(6)中, ϵ 为 0.014, $k_0 = -2.282 \times 10^{-10} \text{ Hz}(\text{V}/\text{m})^{-2}$, $E_{300} = 831.9 \text{ Vm}^{-1}$, $T_0 = 300 \text{ K}$ 。 T 为测量的温度。不确定度由温度的波动范围决定。

④ 引力红移

由于地球重力势引起喷泉钟输出频率发生移动^[20], 引力红移的计算公式为

$$f_{\text{RS}} = \frac{\Delta\nu_{\text{RS}}}{\nu_0} = \Delta h \frac{g}{c^2}, \quad (7)$$

式(7)中, g 和 c 分别为重力加速度和光速, Δh 为海拔高。

2 频移的自动评定系统

频移的自动评定系统可自动改变不同的工作参数, 交替运行在不同的时序模式下, 实现冷原子碰撞频移、二阶塞曼频移和黑体辐射频移测量的自动切换, 实时计算其频移量及对应的不确定度。

2.1 硬件设计

自动评定系统硬件框图如图 1 所示, 首先通过时序控制系统(美国 NI 公司的两块 PCI-6602 和一块 PCI-6723)输出工作时序^[21], 利用网络接口控制选态微波的频率功率, 实现冷原子碰撞频移高低密度的切换和二阶塞曼频移测量的切换。通过 GPIB 接口控制激励微波的频率, 用于将频率综合器的频率锁定在 $|3, 0\rangle \rightarrow |4, 0\rangle$ 或 $|3, 1\rangle \rightarrow |4, 1\rangle$ 中心条纹的中心频率上。通过模拟输出卡 USB-6353 控制激励微波的功率。通过 RS232 接口读取温度采集器的 3 路温度值实现黑体辐射频移的测量。

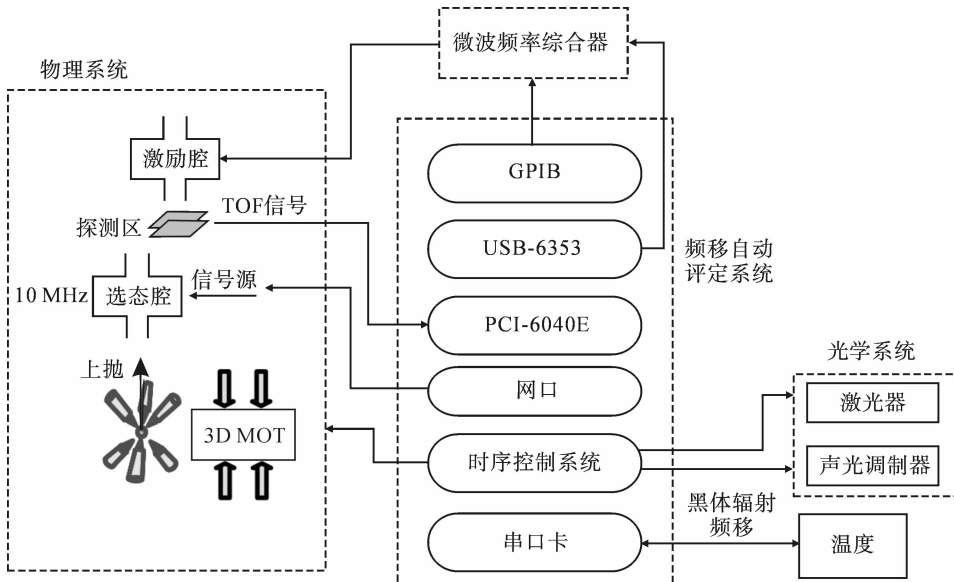


图 1 频移的自动评定系统框图

2.2 软件设计

软件采用美国 NI 公司的 LabWindows/CVI, 带有滤波、数据分析等信号处理函数, 提供图形化用户界面。通过 VISA 驱动函数实现 GPIB 和网口仪器的控制, 通过 DAQmx 驱动函数实现 NI 板卡的控制。首先介绍四项频移测量的软件实现过程。

2.2.1 四项频移项的测量

① 二阶塞曼频移的测量

用 Ramsey 跃迁法寻找常规运行高度的 $|3, 1\rangle \rightarrow |4, 1\rangle$ 跃迁的中心条纹, 从腔中心开始逐步增加上抛高度扫描 $|3, 1\rangle \rightarrow |4, 1\rangle$ 跃迁的 Ramsey 条纹, 测量中心条纹的偏移。在腔中心时扫描的条纹只有一条, 随着上抛高度增加, 逐渐出现新的条纹。通过串口改变声光调制器驱动源的频率, 改变上下两组激光束频率逐步增加上抛高度, 每次失谐改变 0.02 MHz, 对应大约 1 cm 的上抛高度, 扫描激励微波频率, 确定 $|F=3, m_F=1\rangle \rightarrow |F=4, m_F=1\rangle$ 的中心条纹。上抛过程中 TOF 信号的线宽随着上抛高度增加逐渐变窄, 计算原子数时需考虑不同的高度对应的 TOF 线宽不同, 每次改变上抛高度需改变对应的中心点位置和线宽, 可以更精确地计算归一化跃迁几率。根据式(2)计算二阶塞曼频移。

② 冷原子碰撞频移的测量

冷原子碰撞频移采用差分法交替运行在两种原子密度下评定此项频移。首先扫描选态功率谱, 断开激励微波, 选态腔馈入微波由信号源 SMB100 提供, 通过网络接口控制, 扫描选态微波功率谱不需要计算归一化的跃迁几率, 只需计算 $F=3$ 态原子数。每改变一次功率值记录一次。谱线如图 2 所示, 扫描步进 0.2 dBm。第一个峰中心对应的功率点作为高密度运行的工作点 π , 根据比例系数在峰中心左侧选取低密度对应的功率点。每次选取一组功率点交替运行, 将两个功率点输入到软件界面上, 设置高低密度运行的周期, 软件按照设置的参数首先运行在高密度下, 当高密度运行周期结束后, 自动改变功率点, 运行在低密度下。如此周而复始, 分别计算各自的 Allan 方差、频差数据、原子数, 将其显示在界面上并保存到文件中。碰撞频移的软件界面图如图 3 所示, 频差数据图上方有一个指示灯指示当前运行在何种模式下。每运行一组高低密度计算一次零密度频率的外推和冷原子碰撞频移量。

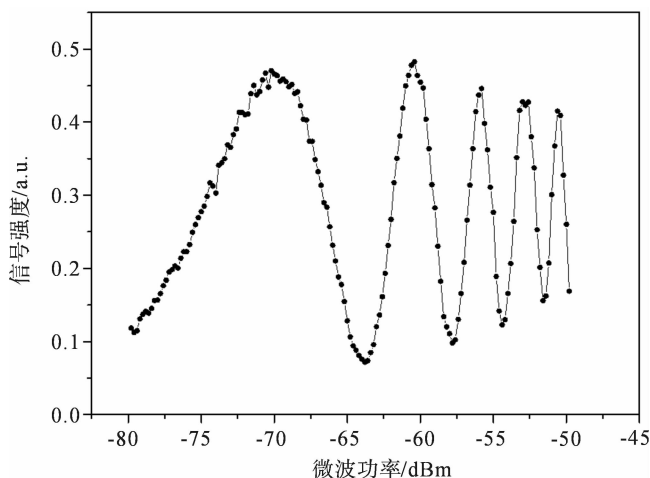


图 2 原子样品选态功率谱

③ 黑体辐射频移

采用福禄克温度采集器采集喷泉管不同位置放置的 3 个热敏电阻的阻值直接转换为温度信号, 可同时测量 4 个传感器, 测量周期达 1 s。通过串口读取采集的温度数据计算黑体辐射频移。

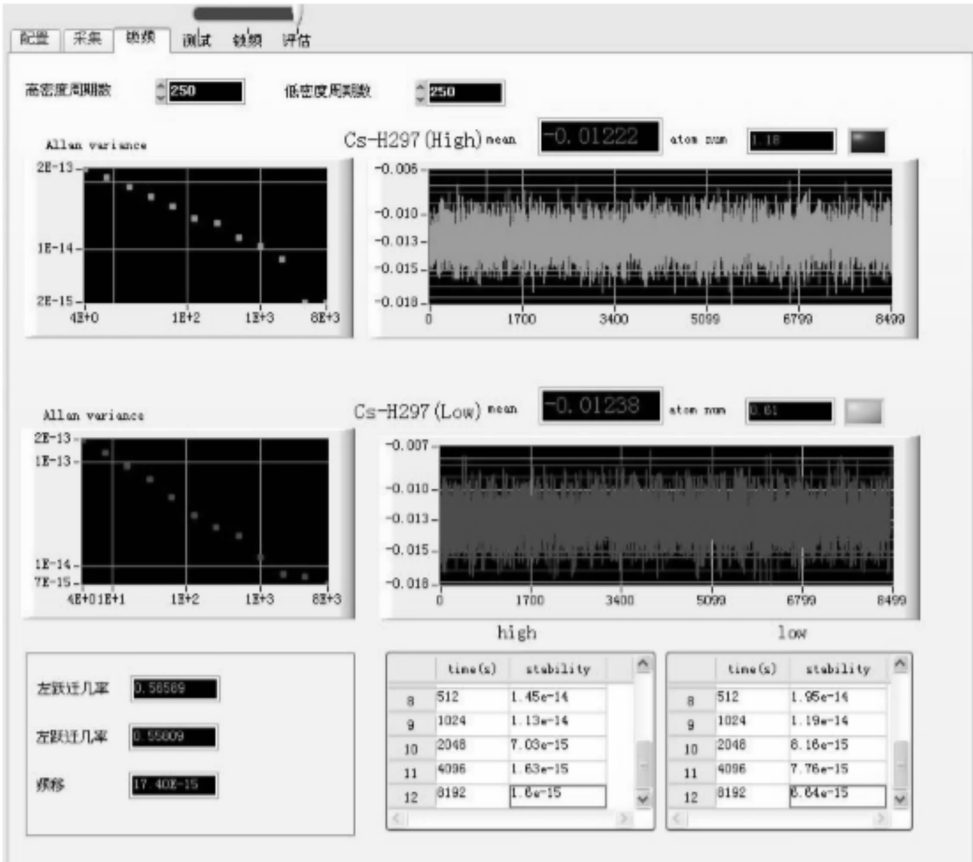


图 3 冷原子碰撞频移界面图

④引力红移

根据喷泉钟所处高度推出, 这项频移基本是固定不变的。根据文献[22]计算的频移值作为偏差扣除。

2.2.2 自动评定系统软件流程设计

频移的自动纠正需考虑每种频移切换的时间间隔、运行周期、运行方式等。喷泉钟运行的死区时间受频移评定时间影响, 如评定二阶塞曼频移和黑体辐射频移都需中断喷泉钟的常规运行。中断次数过于频繁影响喷泉钟的稳定度, 增加了死区时间。中断次数过少不能完全反映实际结果。综上考虑选择冷原子碰撞频移高低密度交替的周期为 250 个喷泉运行周期即每 1 ks 切换一次, 原子密度比为 2。每运行一组高低密度计算碰撞频移, 运行两组高低密度后测量二阶塞曼频移。二阶塞曼频移运行 10 min 切换至碰撞频移的测量。黑体辐射频移的测量周期为每 30 min 采集一次。所有参数均可在软件前面板上修改。确定上述参数后, 启动频移的自动评定软件, 流程图如图 4 所示。

首先设置参数, 设置参数包括时序参数、采集参数、文件参数、运行参数和通讯参数。频移的自动评定系统运行在一种时序下。采集参数包括采集通道, 采集点数、采样率、采集方式等。通讯参数包括配置通讯端口连接方式, GPIB 的端口, 网络设备 Ip 号、RS232 通讯端口、速率及奇偶校验等。运行参数包括高低密度运行周期, 二阶塞曼频移测量间隔周期和运行周期、黑体辐射频移测量间隔周期和运行周期、选态微波在 $|3, 0\rangle \rightarrow |4, 0\rangle$ 跃迁和 $|3, 1\rangle \rightarrow |4, 1\rangle$ 跃迁在 $\pi/2$ 处的频率功率, 激励微波在 $|3, 0\rangle \rightarrow |4, 0\rangle$ 和 $|3, 1\rangle \rightarrow |4, 1\rangle$ 跃迁在 $\pi/2$ 处的功率。文件参数包括建立多个数据保存文件和参数配置文件。参数配置文件包括测量日期时间、选态微波的频率功率、激励微波的功率、补偿线圈电流及各种运行参数等, 为后期数据分析提供参考。默认设置的参数保持不变。

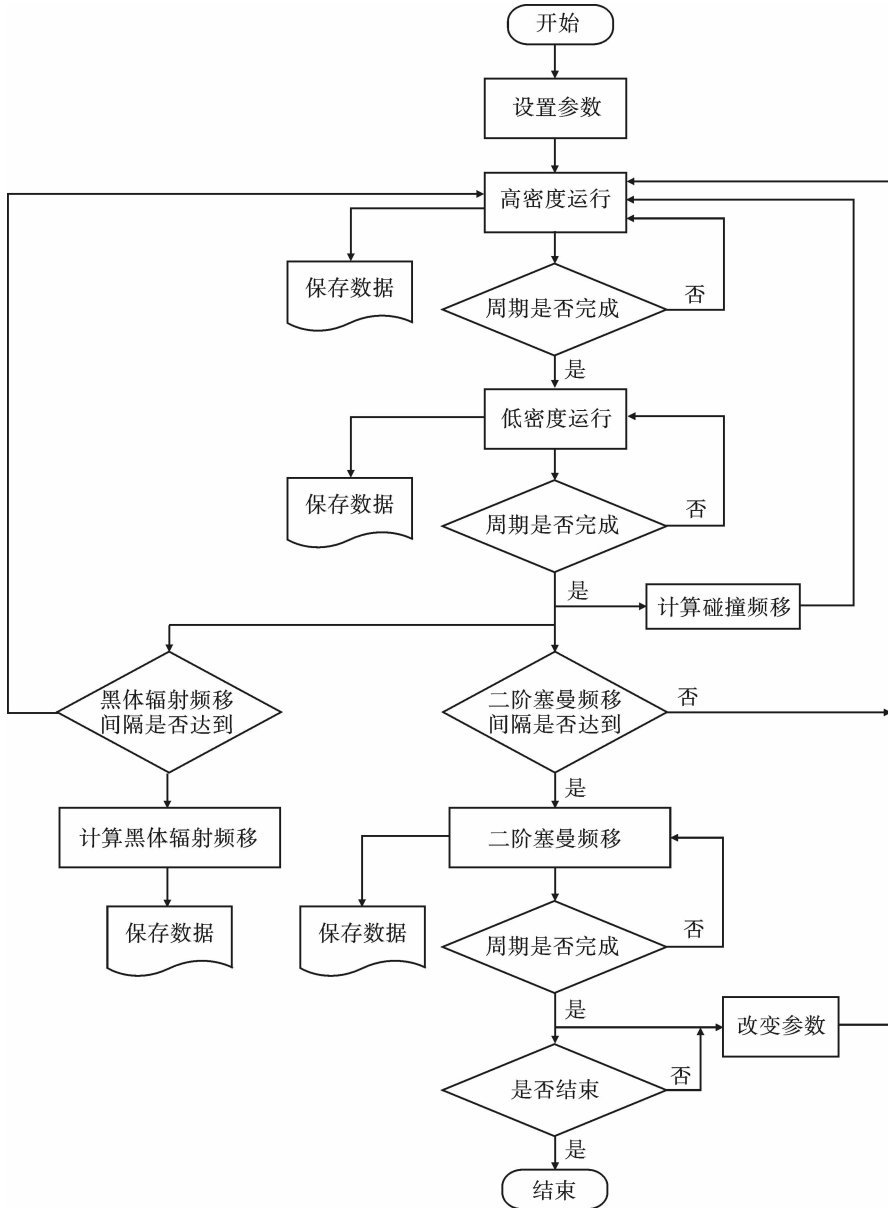


图 4 自动评定流程图

数据保存文件为 5 个。高密度下运行的数据保存为一个文档,低密度下运行的数据保存为一个文档,分别保存各自的左半高线宽处的跃迁几率、右半高线宽处的跃迁几率、频率纠正量、原子数。数据之间用空格分隔。高低密度下的频率稳定度的相关信息分别保存在两个文档中。计算的频移项保存在一个文档中。所有文档均为 .txt 文档,命名前缀为当前时间。默认软件启动时建立并打开所有数据文档,运行中写入数据,结束时关闭文档。C 语言的文件系统为缓冲文件系统,当遇到非正常关闭时,缓冲区数据未完全更新到文档中会造成部分数据的丢失。设计错误应对机制,解决数据丢失问题。

参数设置完成后,首先运行在高密度下,开始在高密度下锁定频综的频率于 $|3,0\rangle \rightarrow |4,0\rangle$ 跃迁的 Ramsey 中心条纹上,高密度运行周期结束后,改变选态微波功率,切换至低密度运行模式。低密度运行周期结束后,计算碰撞频移,判断二阶塞曼频移测量的间隔时间是否达到,如达到,暂停 $|3,0\rangle \rightarrow |4,0\rangle$ 锁定,改变选态微波的频率功率至 $|3,1\rangle \rightarrow |4,1\rangle$ 跃迁处,激励微波的功率至 $|3,1\rangle \rightarrow |4,1\rangle$ 跃迁处,将频综频率

锁定在 $|3, 1\rangle \rightarrow |4, 1\rangle$ 跃迁的 Ramsey 中心条纹上, 计算二阶塞曼频移并判断评定周期是否完成, 二阶塞曼频移量在评定周期内实时更新, 评定周期结束后保存二阶塞曼频移结果, 并将选态微波的频率功率、激励微波的功率设置为 $|3, 0\rangle \rightarrow |4, 0\rangle$ 跃迁处, 如不结束自动切换成高密度锁定。

黑体辐射频移测量通过测量电阻转成温度, 测量过程中导线产生的电流会影响喷泉钟频率输出, 也需中断运行, 每隔一段时间测量一次。间隔时间可自由更改, 如此周而复始。

每两个喷泉周期分别在图形控件面板显示频差数据、原子数, 高低密度的稳定度根据数据量计算并实时更新显示在图形控件中。磁场和温度的监测如图 5 右下角所示。四项频移值计算的结果显示在数值控件中如图 5 左下角蓝色方框所示, 冷原子碰撞频移、二阶塞曼频移、黑体辐射频移和引力红移的纠正量分别为 2.8×10^{-14} 、 -4.92×10^{-14} 、 1.48×10^{-14} 和 -5.28×10^{-14} 。不确定度分别为 4.1×10^{-15} 、 2.93×10^{-16} 、 1.0×10^{-16} 和 1.0×10^{-16} 。

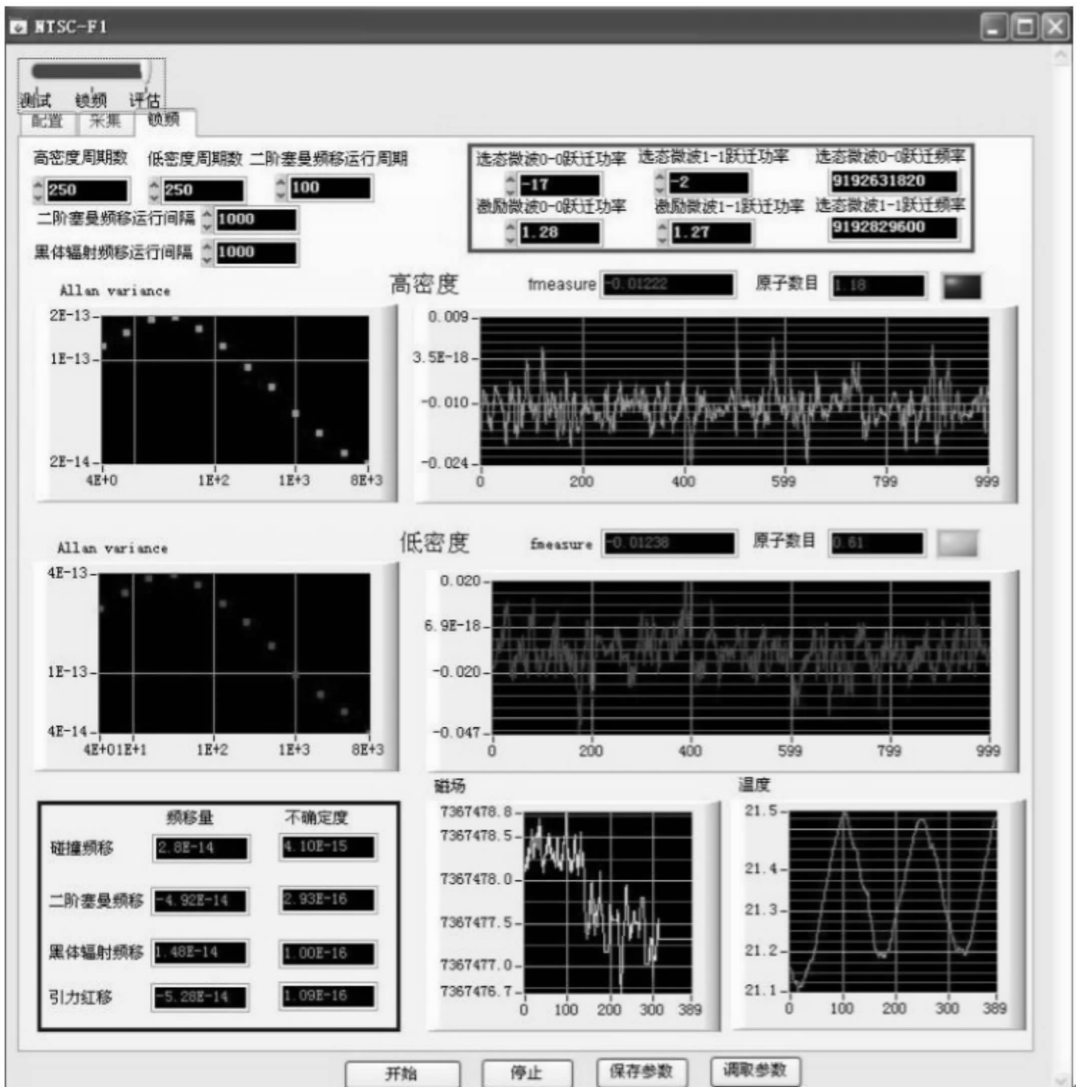


图 5 频移的自动评定系统界面图

3 结论

频移的自动评定系统应用于铯原子喷泉钟实现了四项频移的实时计算纠正, 总的频移量为 -5.92×10^{-14} , 以此计算氢钟和“秒”定义的偏差, 为 A 类不确定度的计算和铯原子喷泉钟参与守时奠定基础。下一步将利

用频移自动评定系统输出的数据实现铯原子喷泉钟和 TAI 的比对,验证铯原子喷泉钟的评定结果。

参考文献:

- [1] SZYMANIEC K, CHALUPCZAK W, WHIBBERLEY P B, et al. Evaluation of the primary frequency standard NPL-CsF1[J]. *Metrologia*, 2005, 42(1): 49-55.
- [2] VIAN C, ROSENBUSCH P, MARION H, et al. BNM-SYRTE fountains: recent results[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2005, 54(2): 833-836.
- [3] SZYMANIEC K, EON P S, MARRA G, et al. First accuracy evaluation of the NPL-CsF2 primary frequency standard[J]. *Metrologia*, 2010, 47(4): 363-365.
- [4] JEFFERTS S R, SHIRLEY J, PARKER T E, et al. Accuracy evaluation of NIST-F1[J]. *Metrologia*, 2003, 39(4): 321-336.
- [5] SYRTE. FREQUENCY COMPARISON (MASER 1400805)-(BNM-SYRTE-F02) from MJD 53109 to MJD 53129 & MJD 53129 to MJD 53149(2004-06)[2018-10-17]. <http://www.bipm.org/en/bipm-service/timescales/time-fp/data.html>.
- [6] PARKER T E, JEFFERTS S R, HEAVNER T P, 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.
- [7] WEYERS S, HÜBNER U, SCHRÖDER R, et al. Uncertainty evaluation of the atomic caesium fountain CSF1 of the PTB[J]. *Metrologia*, 2001, 38(4): 343-352.
- [8] GERGINOV V, NEMITZ N, WEYERS S, et al. Uncertainty evaluation of the caesium fountain PTB-CSF2[J]. *Metrologia*, 2009, 47(1): 65.
- [9] LEVI F, CALONICO D, LORINI L, et al. IEN-CsF1 primary frequency standard at INRIM: accuracy evaluation and TAI calibrations[J]. *Metrologia*, 2006, 43(6): 545-555.
- [10] LEVI F, LORINI L, CALONICO D, et al. IEN-CsF1 accuracy evaluation and two way frequency comparison[J]. *Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control IEEE Transactions on*, 2003: 199-204.
- [11] WANG Xin-liang, RUAN Jun, LIU Dan-dan, et al. The study of second-order Zeeman shift of the cesium fountain clock NTSC-F1[C]//2016 IEEE International Frequency Control Symposium, Tours; [s. n.], 2016: 1-3.
- [12] KUMAGAI M, ITO H, KAJITA M, et al. Evaluation of caesium atomic fountain NICT-CsF1[J]. *Metrologia*, 2008, 45(2): 139.
- [13] 王心亮, 刘丹丹, 阮军, 等. 铯原子喷泉钟二阶塞曼频移的测量方法及实验[J]. *时间频率学报*, 2018, 41(4): 279-284.
- [14] 林睿, 王心亮, 刘丹丹, 等. 铯喷泉钟冷原子碰撞频移的差分法测量研究[J]. *时间频率学报*, 2017, 40(4): 207-212.
- [15] LEO P, JULIENNE P, MIES F, et al. Collisional frequency shifts in ^{133}Cs fountains clock[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 86(17): 3743-3748.
- [16] PEREIRA F, MARION H, BIZE S, et al. Controlling the cold collision shift in high precision atomic interferometry[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 89(23): 233004.
- [17] SZYMANIEC K, CHALUPCZAK W, TIESINGA E, et al. Cancellation of the collisional frequency shift in caesium fountain clocks[J]. *PRL*, 2007, 98(15): 153002.
- [18] ROSENBUSCH P, ZHANG S, CLAIRON A. Blackbody radiation shift in primary frequency standards[C]//Proceedings of the Joint Meeting of 17th European frequency and Time Forum and the IEEE International Frequency Control Symposium, Geneva; [s. n.], 2007: 1060-1063.
- [19] LEVI F, CALONICO D, LORINI L, et al. Measurement of the blackbody radiation shift of the ^{133}Cs hyperfine transition in an atomic fountain[J]. *Phys. Rev. A*, 2004, 70(3): 423-433.
- [20] NIKOLAOS K, WEISS M A. The relativistic redshift with 3×10^{-17} uncertainty at NIST[J]. *Metrologia*, 2003, 40(2): 66.
- [21] LIU Dan-dan, WANG Xin-liang, LIN Rui, et al. The Research of control system for cesium atomic fountain clock[C]//2014 IEEE International Frequency Control Symposium, Taipei; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014: 397-400.
- [22] 阮军, 王心亮, 刘丹丹, 等. 铯原子喷泉钟 NTSC-F1 研制进展[J]. *时间频率学报*, 2016, 39(3): 138-149.