

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416246

# C场电流对铷原子喷泉钟性能影响的分析<sup>\*</sup>

朱子毅<sup>1,2</sup> 雷鹏越<sup>1,2</sup> 张辉<sup>1,3</sup> 阮军<sup>1,3</sup> 张首刚<sup>1,2,3</sup>(1.中国科学院国家授时中心 西安 710600; 2.中国科学院大学 北京 100049;  
3.中国科学院时间频率基准重点实验室 西安 710600)

**摘要:** 铷原子喷泉钟的C场电流稳定性会影响钟的二阶塞曼频移,传统优化C场线圈物理系统的方法存在系统复杂且难以满足铷钟小型化要求的缺点。本文从铷原子喷泉钟的电路系统入手,提出了采用芯片电流源优化C场电路的方法。首先,分析研究了芯片电流源输出波动对铷原子喷泉钟二阶塞曼频移项的影响,得到了铷原子喷泉钟二阶塞曼频移与C场芯片电流源输出电流之间的变化关系;其次,对优化前后铷原子喷泉钟C场电流进行了相关测量实验。实验表明,使用VC12MA电流源产生C场时,其输出电流值Allan方差为 $2.24 \times 10^{-9}$ ,对铷原子喷泉钟二阶塞曼频移的相对扰动为 $1.78 \times 10^{-17}$ ,铷原子喷泉钟二阶塞曼频移的频率稳定度从原来的 $10^{-16}$ 量级提升至优化后的 $10^{-17}$ 量级,本文方法在铷原子喷泉钟性能提升及小型化中有很大的应用价值。

**关键词:** 铷原子喷泉钟;C场;二阶塞曼频移;频率稳定度

**中图分类号:** TN2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Analysis on the influence of C-field current on the performance of rubidium fountain atomic clock

Zhu Ziyi<sup>1,2</sup> Lei Pengyue<sup>1,2</sup> Zhang Hui<sup>1,3</sup> Ruan Jun<sup>1,3</sup> Zhang Shougang<sup>1,2,3</sup>

(1. National Time Serving Center, Chinese Academy of Science, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

**Abstract:** The C-field current stability of rubidium atomic fountain clock can affect the second-order Zeeman frequency shift of the clock. Traditional methods to optimize the physical system of the C-field are complicated and difficult to meet the miniaturization requirements. Starting from the circuit system of rubidium atomic fountain clock, this paper puts forward the method of optimizing C-field circuit by using chip current source. Firstly, the influence of the chip current source output fluctuation on the second order Zeeman frequency shift of the rubidium atomic fountain clock is analyzed and the relationship between the second order Zeeman frequency shift of the rubidium atomic fountain clock and the output current of the C-field chip current source is obtained; secondly, the measurement experiment of VC12MA current source is carried out. The experiment shows that when the C field is generated by VC12MA current source, the Allan variance of the output current value is  $2.24 \times 10^{-9}$ , and the relative disturbance to the second-order Zeeman frequency shift of the rubidium atomic fountain clock is  $1.78 \times 10^{-17}$ . The frequency stability of the second-order Zeeman shift of the rubidium atomic fountain clock is improved from the original  $10^{-16}$  order to the optimized  $10^{-17}$  order. The method presented in this paper has great application value in the performance improvement and miniaturization of the rubidium atomic fountain clock.

**Keywords:** rubidium atomic fountain clock; C field; second order Zeeman shift; frequency stability

## 0 引言

为了获得更高的时间频率基准,各国纷纷研制了冷原

子喷泉钟。铷原子喷泉钟是目前守时领域的一种新型原子喷泉钟<sup>[1-2]</sup>,高性能和小型化是目前原子钟的发展方向。频率稳定度是铷原子喷泉钟的重要性能指标之一。原子钟的

收稿日期:2024-06-17

\* 基金项目:中国科学院重大基础设施维修改造项目(DSS-WXGZ-2020-0005)资助

各项系统频移是影响其长期频率稳定度的主要因素<sup>[3]</sup>。其中,二阶塞曼频移是各项系统频移中的最大项之一,由产生铷原子基态超精细能级塞曼分裂的静磁场(称为“C场”)导致的<sup>[4]</sup>。通常,铷原子喷泉钟的C场由长直螺线管通以电流的方式产生,平均大小为100 nT,作用是对原子能级去简并。可见,C场电流的稳定度和均匀度对铷原子喷泉钟长期运行的性能有着重要的影响<sup>[5]</sup>。

提升铷原子喷泉钟的稳定度和准确度有深远意义,对C场进行矫正一直是国内外研究人员的研究方向。中国科学院国家授时中心的管勇等<sup>[6]</sup>曾使用线圈缠绕的方式,模拟了C场的产生,并通过实验初步探究了缠绕方法和线圈长度对C场大小、稳定性和均匀度的影响。施俊如等<sup>[7]</sup>提出通过设计线圈补偿来提高C场的均匀性,并将选态腔置于3层由坡莫合金制成的磁屏蔽系统内,避免了马约拉纳跃迁、Ramsey和Rabi跃迁效应。德国的研究人员从物理系统的角度进行考虑,提出了双层反向密绕C场螺线管,并在同时在上、下端补偿线圈衔接区附近增加小尺寸补偿线圈的方法,并通过实验验证了C场的均匀性<sup>[8]</sup>。美国和意大利的研究人员则尝试通过假如C场伺服系统来改善C场时间振荡的范围从而提升原子钟的性能<sup>[9]</sup>。

上述方法都是从优化物理系统的角度出发,通过对C场均匀度、稳定度和对称性等物理性质进行改善来提升铷原子喷泉钟的性能。虽然取得了一定的成效,但考虑到原子钟内部物理系统设计复杂以及未来小型化的发展趋势,上述方法难以满足铷原子喷泉钟的长远发展要求。铷原子喷泉钟的组成系统中,电路系统输出的直流电流保障了C场的产生和维持,铷原子喷泉钟电路系统采用的传统电流源,数量繁多的模拟元件构成了电路的主要组成部分,体积较大,并存在较为严重的温度漂移现象<sup>[10]</sup>,既难以保障铷原子喷泉钟长期稳定的运行,也难以适应小型化、集成化、高效性的新要求,虽然研究者在原子钟的数据采集系统上做优化<sup>[11]</sup>,但不能从根源上缓解电流波动问题。综上,本文研究从铷原子喷泉钟C场的电路系统优化角度,通过采用芯片电流源提升铷原子喷泉钟C场电流的稳定性的角度降低二阶塞曼频移对铷原子喷泉钟性能的影响。

本文首先分析了铷原子喷泉钟原有的模拟电流源电流产生的C场磁场,分析了二阶塞曼频移与该磁场的关系;研究了芯片电流源输出电流的稳定度对二阶塞曼频移项的影响;利用芯片电流源优化了C场的原模拟电源构成的铷原子喷泉钟的电路系统结构。

为了验证本文提出的芯片电流源优化C场电路结构的方法的有效性,以VC12MA电流源为例,首先测量了其在空载条件下输出电流值的波动,推导计算了空载时其本身输出电流的稳定性性能。然后,将其应用于铷原子喷泉钟中,测量此时的铷原子喷泉钟C场电流,并采用标准差和阿伦方差对铷原子喷泉钟C场电流性能进行衡量;进而计算出其对集成铷喷泉钟二阶塞曼频移项的影响。

实验及计算结果表明,当VC12MA电流源处于空载状态时,其输出电流Allan方差为 $1.30 \times 10^{-9}$ ,对铷原子喷泉钟二阶塞曼频移的相对扰动为 $2.83 \times 10^{-18}$ ;铷原子喷泉钟使用VC12MA电流源产生C场时,C场电流值Allan方差为 $2.24 \times 10^{-9}$ ,对铷原子喷泉钟二阶塞曼频移的相对扰动为 $1.78 \times 10^{-17}$ ,铷原子喷泉钟使用原模拟电流源时其C场电流变化产生的二阶塞曼频移稳定度为 $7.29 \times 10^{-16}$ ,本文使用芯片电流源优化的铷原子喷泉钟C场电路结构在提升铷原子喷泉钟性能的同时满足了铷原子喷泉钟小型化的要求。

## 1 C场电流源输出电流与二阶塞曼频移的关系

### 1.1 C场

铷原子喷泉钟利用激光冷却技术制备冷原子黏团<sup>[12]</sup>,冷原子团制备完成后,在钟内部的真空管道内周期性地完成上抛-下落的运动过程。在每一个周期性运动过程中,当冷原子团运行到与微波Ramsey作用区时,需要给冷原子团提供特定的量子化轴C场,进而使原子基态的超精细能级消除简并(产生与微波Ramsey作用需要的原子能级)<sup>[13]</sup>。当前的铷原子喷泉钟,采用特定长直通电螺线管线圈缠绕在C场筒(C场筒位于3层磁屏蔽内部)构建C场<sup>[14]</sup>,如图1所示。

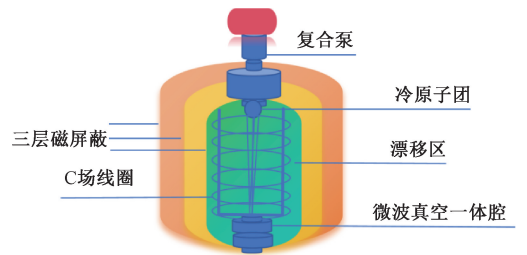


图1 C场结构图

Fig. 1 C field structure diagram

依据毕奥-萨伐尔定律<sup>[15]</sup>,以螺线管线圈中心处为坐标原点 $O$ ,中心轴线上为 $x$ 轴正方向建立柱坐标系,轴上任意一点磁场大小记为 $B_p$ 表达为:

$$B_p = \frac{\mu_0 n I_0}{2} \left[ \frac{\frac{L}{2} - x}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{L}{2} - x\right)^2}} + \frac{\frac{L}{2} + x}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{L}{2} + x\right)^2}} \right] \quad (1)$$

式中: $I_0$ 是通入长直螺线管线圈内部的电流, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ ,其为真空磁导率, $n$ 为长直螺线管线圈匝数, $L$ 为长直螺线管的长度, $R$ 为长直螺线管的半径, $x$ 为螺线管电流轴线上任意一点到坐标原点的距离。

### 1.2 二阶塞曼频移

Breit-Rabi公式<sup>[16]</sup>描述了铷原子基态超精细能级发生塞曼分裂时的状态:

$$E(F, m_F) = -\frac{E_0}{2(2I+1)} + m_F \mu_B g_I B \pm \frac{E_0}{2} \left(1 + x^2 + \frac{4m_F x}{2I+1}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

其中,  $x = \frac{(g_J - g_I) \mu_B B}{\Delta E_0}$ ,  $E_0$  为未扰动基态能级能量,  $I$  为核自旋量子数,  $m_F$  为磁子能级量子数,  $g_I$  为核自旋的朗德因子,  $g_J$  为电子的朗德因子, 玻尔磁子  $\mu_B = h \cdot 1.399\ 624\ 604 \times 10^{10}$  Hz/T,  $B$  为外磁场大小,  $h$  为普朗克常量,  $F$  为总角动量子数。

在弱磁场条件下, 当  $x < 1$  时, 式(2)可变换成:

$$E(F, m_F) = -\frac{E_0}{2(2I+1)} + \frac{g_I}{g_J + g_I} m_F E_0 x + \frac{E_0}{2} \left\{ 1 + \frac{2m_F x}{2I+1} + \frac{x^2}{2} \left[ 1 - \frac{4m_F^2}{(2I+1)^2} \right] \right\} \quad (3)$$

$^{87}\text{Rb}$  原子不同总角动量子数与磁量子数对应的能级差可表示为:

$$\Delta E_{F_1, m_{F_1} \rightarrow F_2, m_{F_2}} = \frac{g_I}{g_J + g_I} (m_F - m'_F) \Delta E_0 \pm \left\{ 2 + \frac{2(m_F + m'_F)x}{2I+1} + x^2 \left[ 1 - \frac{2(m_F^2 + m'^2_F)}{2(2I+1)^2} \right] \right\} \quad (4)$$

式中:  $\Delta E_0$  代表稳定原子钟跃迁能级差,  $\Delta E_0 = h\nu_0$ 。

对于钟跃迁,  $F = 2, m_F = 0 \rightarrow F = 1, m_F = 0$ , 有:

$$\Delta E_{F=2, m_F=0 \rightarrow F=1, m_F=0} = \frac{\Delta E_0}{2} (2 + x^2) \quad (5)$$

对比式(3)、(4)并结合式(5), 可以用式(6)表达 $^{87}\text{Rb}$  原子的实际钟跃迁频率:

$$\nu' = \frac{\nu_0}{2} (2 + x^2) = \nu_0 + \frac{\nu_0}{2} x^2 = \nu_0 + 575.15 \times 10^8 \langle B^2 \rangle \quad (6)$$

则二阶塞曼频移<sup>[17]</sup>为:

$$\Delta\nu_{\text{secondZeeman}} = \frac{\nu_0}{2} x^2 = 575.15 \times 10^8 \langle B^2 \rangle \quad (7)$$

式中:  $\langle \rangle$  代表原子飞行路径上的磁场的的时间平均。

### 1.3 本文 C 场电流源输出电流与二阶塞曼频移项之间的关系

采用本文方法, 将芯片电流源串接于螺线管线圈, 使得铷原子喷泉钟芯片应用芯片电流源产生 C 场电流。此时, 原结构中通入长直螺线管线圈内部的电流即是优化后 C 场电流源的输出电流, 本文用 C 场电流源输出电流的平均值表达  $I_0$ 。由式(1)、(7)可知 C 场电流源输出电流平均值  $I_0$  与原子飞行路径上的磁场的的时间平均值  $\langle B \rangle$  成正比。可将式(1)简化成为式(8)。

$$B = AI_0 \quad (8)$$

式中:  $A$  为比例系数,  $A =$

$$\frac{\mu_0 n}{2} \left[ \frac{\frac{L}{2} - x}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{L}{2} - x\right)^2}} + \frac{\frac{L}{2} + x}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{L}{2} + x\right)^2}} \right]。$$

则二阶塞曼频移可由式(7)的表达变换为式(9)。

$$\Delta\nu_{\text{secondZeeman}} = 575.15 \times 10^8 A^2 I_0^2 \quad (9)$$

将式(9)两边同时微分, 得:

$$\delta\Delta\nu_{\text{secondZeeman}} = 575.15 \times 10^8 A^2 2I_0 \delta I_0 \quad (10)$$

进一步整理, 将式(9)与(10)相除, 得:

$$\frac{\delta\Delta\nu_{\text{secondZeeman}}}{\Delta\nu_{\text{secondZeeman}}} = \frac{575.15 \times 10^8 \times A^2 \times 2I_0}{575.15 \times 10^8 \times A^2 \times I_0^2} \cdot \frac{\delta I_0}{I_0} \quad (11)$$

化简得:

$$\frac{\delta\Delta\nu_{\text{secondZeeman}}}{\Delta\nu_{\text{secondZeeman}}} = 2 \frac{\delta I_0}{I_0} \quad (12)$$

式中:  $\delta I_0$  表示电流的标准差,  $I_0$  为电流的平均值。

由式(12)可知, 电流源输出电流值的相对波动与铷原子喷泉钟的二阶塞曼频移项的相对扰动之间存在正线性关系。当 C 场电流的波动值增大时, 二阶塞曼频移项的相对值也会对应升高。理论上, 可以通过提升电流源的稳定性来降低铷原子喷泉钟的二阶塞曼频移,  $\frac{\Delta\nu_{\text{secondZeeman}}}{\nu_0}$  (其中  $\nu_0 = 6\ 834\ 682\ 610$  Hz, 为铷原子钟跃迁频率) 用来表示二阶塞曼频移的扰动。

## 2 C 场电流源的优化与稳定性参数

### 2.1 C 场电流源的优化

铷原子喷泉钟的传统电流源, 由数量繁多的模拟元件构成, 体积大, 且有温度漂移现象。VC12MA 电流源是具备负反馈信号控制的直流电流输出电路。VC12MA 型号电流源采用 STM32 单片机作为核心控制元件, 具备基于 PWM 原理的直流电压驱动电路、基于数字信号处理技术的采样电路和 ADC 转换电路(模拟-数字转换电路)以及基于负反馈控制原理的电流反馈电路, 能够实现直流电流的输出并保障其稳定性。

当处于正常工作状态下的时候, VC12MA 电流源通过 STM32 单片机控制 PWM 驱动电路, 通过 PWM 驱动电路输出的电压信号控制直流电流输出模块输出直流电流信号。在输出直流电流信号的同时分两路对输出的直流电流信号进行采样, 经过滤波等信号处理, 由 ADC 转换器转换为数字信号反馈给 STM32 单片机, 从而形成闭环控制。这一闭环控制过程可以由 RS232 连接的上位机远程监视。其工作原理如图 2 所示。

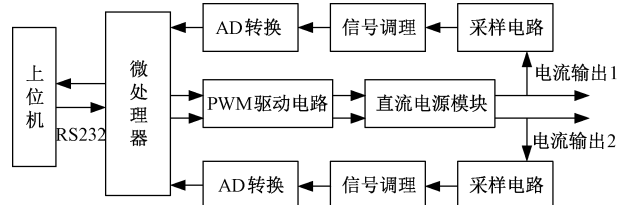


图 2 VC12MA 电流源基本原理图

Fig. 2 VC12MA current source basic schematic diagram

VC12MA 电流源工作电压为 24 V(直流),支持双通道输出直流电流。输出电流范围为 0.1~18 mA,存在上下 10%输出浮动,分辨率为 0.5  $\mu\text{A}$ ,稳定精度为 0.1%,通过 TTL 串口或者 RS232 串口和上位机通讯。在验证测量实验中,将采取 VC12MA 电流源作为电路系统的组成部分,输出直流电流,并观察其输出的直流电流能否为 C 场的稳定性提供长期保障。

## 2.2 C 场电流的稳定性参数

由 1.3 节的推导可知,VC12MA 电流源输出电流的波动会影响二阶塞曼频移,进而影响铷喷泉钟的长期稳定性。为明确说明 VC12MA 电流源输出电流的稳定性,本文引入 Allan 方差<sup>[18]</sup>来评估 VC12MA 电流源输出电流的稳定性。

电流平均值公式如式(13)所示,其值越接近电流源设置值,说明电流源内阻与负载值匹配程度越好。

$$\bar{I}_k = \frac{(I_1 + I_2 + \dots + I_k)}{k} \quad (13)$$

电流标准差是各输出电流值与其平均值离差平方的算术平均数的平方根,反映了各个电流值的离散程度,其值越小,说明电流源输出稳定性越好。标准差公式如式(14)所示。

$$\sqrt{\frac{(I_1 - \bar{I}_k)^2 + (I_2 - \bar{I}_k)^2 + \dots + (I_k - \bar{I}_k)^2}{k}} \quad (14)$$

采取一个取样等时间间隔  $\tau$ ,将信号按  $\tau$  分段计算平均电流值  $\bar{I}_k$ , $t_k$  为第  $k$  段间隔的起点,两端相邻采样区间起始点间隔  $T$ 。为确定波动程度,可以求  $\bar{I}_k$  的方差,定义为:

$$\langle \sigma^2(N, T, \tau) \rangle = \langle \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\bar{I}_k - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \bar{I}_k)^2 \rangle \quad (15)$$

式中:当取  $N=2$ ,  $T=\tau$  时,上述方差可以精确地描述波动的现象,这一特殊方差即为 Allan 方差。当有限次采样点数为  $m$  时,Allan 方差表示为:

$$\sigma_y^2(\tau, m) = \frac{1}{2(m-1)} \sum (\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i)^2 \quad (16)$$

式中: $\bar{y}_i$  是第  $k$  个时间间隔内采样的平均值。相对于需要无限次采样才能得到的 Allan 方差的真实值, $m$  次采样得到的 Allan 方差的相对偏差可以定义为:

$$\Delta = \frac{\sigma_y^2(\tau, m) - \sigma_y^2(\tau)}{\sigma_y^2(\tau)} \quad (17)$$

式中: $\sigma_y^2(\tau)$  是电流源输出值的方差。

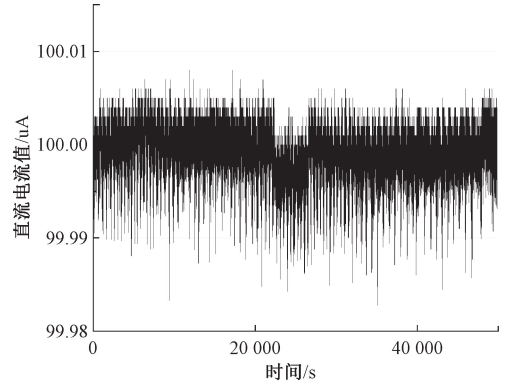
## 3 实验及结果分析

在铷原子喷泉钟内,C场螺线管线圈处于三层柱形高性能磁屏蔽罩内部,C场螺线管线圈长 693 mm,内径为 230 mm,上面均匀绕制直径为 2 mm 的铜漆包线共 172 匝。使用六位半数字万用表进行实际测量,阻抗值为 0.71  $\Omega$ ,感抗值为 2.23  $\times 10^{-3}$  H。为分析螺线管线圈的阻抗是否影响 VC12MA 电流源的性能,检验 VC12MA 芯片电流源在一定时长下的实际输出性能,实验统一设定

50 000 s 为测量时长,采样间隔为 1 s,分别测量 VC12MA 芯片电流源在空载和应用于铷原子喷泉钟内部时的输出电流,分别获得 50 000 个电流值。另外,为验证本文方法的有效性,对优化前原使用模拟电流源为铷原子喷泉钟 C 场提供的电流也尽量了 50 000 s 数据的测量。

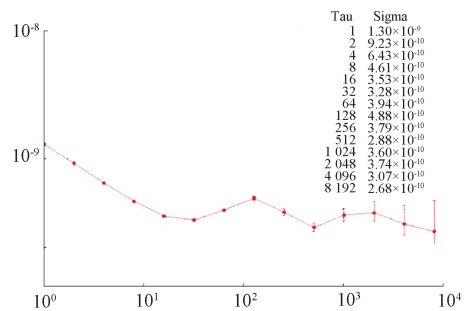
### 3.1 VC12MA 电流源空载时性能测试实验

铷原子喷泉钟使用模拟电流源时,模拟电流源空载时输出为 100  $\mu\text{A}$ ,故设置 VC12MA 电流源的输出电流值为 100  $\mu\text{A}$ ,使用数字万用表直接测量 VC12MA 电流源实际的输出电流进行芯片电流源本身性能测试实验,VC12MA 电流源空载时的输出流值及其 Allan 方差如图 3(a)、(b)所示。



(a) 电流源空载时输出电流

(a) Current when the current source is unloaded



(b) 空载时电流的Allan方差

(b) Allan variance of current with no-load

图3 VC12MA 电流源空载实验数据

Fig. 3 No-load experimental data of VC12MA current source

如图 3 所示,VC12MA 输出电流平均值为 99.993  $\mu\text{A}$ ,根据式(13)与(14),计算得到输出电流的标准差为 1.49  $\times 10^{-9}$  A;根据实验所测得的 50 000 个数据点,取两两相邻的两个数据作差,求这些差值数据的平方之和,根据式(16),可得到  $\sigma_y^2(\tau, m)$  的值,代入式(17)即可求得 Allan 方差为 1.30  $\times 10^{-9}$ ;根据式(12)可得  $\frac{\delta \Delta \nu_{\text{second Zeeman}}}{\Delta \nu_{\text{second Zeeman}}} = 2.60 \times 10^{-5}$ ,  $\delta \Delta \nu_{\text{second Zeeman}} = 1.94 \times 10^{-8}$ ,根据 2.3 节铷原子钟的跃迁频率值,可以得到 VC12MA 电流源输出电流值的波动对铷原子喷泉钟二阶塞曼频移项的扰动  $\frac{\Delta \nu_{\text{second Zeeman}}}{\nu_0}$  为 2.83  $\times 10^{-18}$ 。



### 3.2 铷原子钟应用 VC12MA 电流源时的 C 场电流

将 VC12MA 电流源与铷原子喷泉钟 C 场螺线管线圈串接,铷原子喷泉钟应用 VC12MA 电流源产生 C 场电流,测试铷原子钟的 C 场电流。同样设置 VC12MA 电流源输出电流为  $100\ \mu\text{A}$ ,测量电流源输出电流值及 Allan 方差分别如图 4(a)、(b)所示。

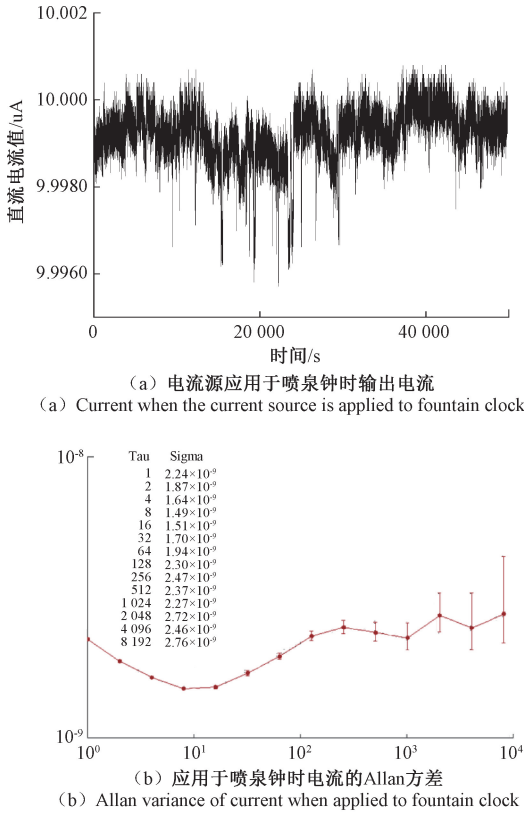


图 4 VC12MA 电流源应用于喷泉钟时实验  
Fig. 4 VC12MA current source is applied to fountain clock

如图 4 所示,VC12MA 电流源在应用于铷原子喷泉钟时,其输出电流的平均值为  $99.986\ \mu\text{A}$ ,标准差为  $6.09 \times 10^{-9}\ \text{A}$ ,Allan 方差为  $2.24 \times 10^{-9}$ ,VC12MA 电流源输出电流值的波动对铷原子喷泉钟二阶塞曼频移项的扰动为  $1.78 \times 10^{-17}$ 。

VC12MA 电流源在接入铷原子喷泉钟时的状态下输出电流值各衡量指标参数相较于空载状态下均有所增大,这是由于 C 场螺线管线圈存在相应感抗和阻抗的缘故。

### 3.3 铷原子钟应用原模拟电流源时的 C 场电流

对铷原子喷泉钟 C 场使用原模拟电流源时产生的电流同样测试 50 000 s,获得的电流与 Allan 方差分别如图 5(a)、(b)所示。

如图 5 所示,模拟电流源输出电流的平均值为  $99.56\ \mu\text{A}$ ,标准差为  $3.33 \times 10^{-8}\ \text{A}$ ,Allan 偏差为  $7.36 \times 10^{-8}$ ,模拟电流源输出电流波动对铷喷泉原子钟二阶塞曼频移的影响为  $7.29 \times 10^{-16}$ 。

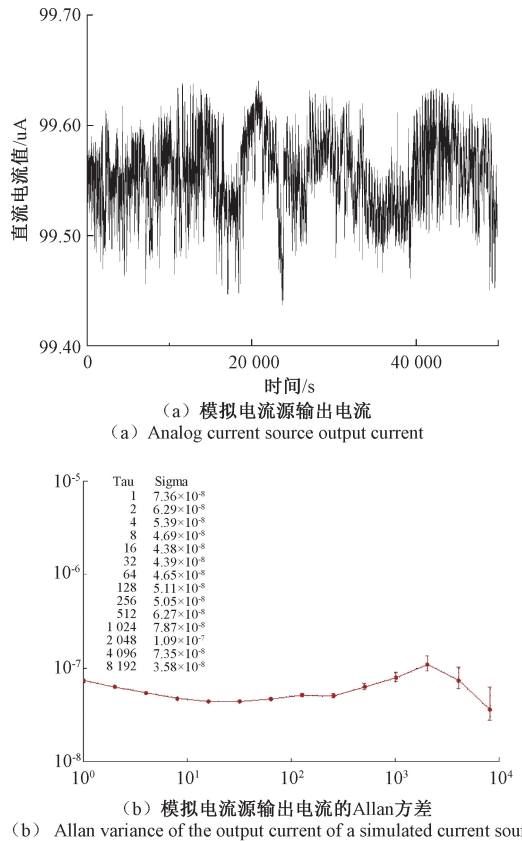


图 5 模拟电流源应用于喷泉钟时实验  
Fig. 5 Simulated current source is applied to fountain clock

### 3.4 实验结果分析

对比实验 3.1 与实验 3.2,当电流源输出电流的相对波动值上升时,二阶塞曼频移扰动在量级上从  $10^{-18}$  量级变为  $10^{-17}$  量级,验证了 1.3 节中的 C 场电流稳定性对铷原子喷泉钟二阶塞曼频移稳定性存在影响的推论是正确的。

VC12MA 电流源在时长为 50 000 s 的输出测试中,Allan 方差保持在  $10^{-9}$  量级,输出电流值波动造成的二阶塞曼频移绝对值波动保持在  $10^{-17}$  至  $10^{-18}$  量级。由此看出,芯片电流源具有明显的优势。

铷原子喷泉钟原使用模拟电流源产生 C 场电流时,模拟电流源输出电流值的二阶塞曼频移波动为  $10^{-16}$  量级,而优化后,VC12MA 电流源带来的铷原子喷泉钟扰动达到了  $10^{-17}$  甚至  $10^{-18}$  量级,表明本文通过芯片电流源优化铷原子喷泉钟 C 场电路系统,改善 C 场电流稳定性的方法是有效的。

## 4 结 论

对喷泉原子钟 C 场芯片电流源优化原电路结构进行了研究,理论计算得到了 C 场芯片电流源输出电流变化对铷原子喷泉钟二阶塞曼频移造成的影响,设计采用 VC12MA 电流源改进 C 场电流源结构,并采用平均值、标

准差、阿伦方差作为电流源稳定性影响参数。对喷泉原子钟 C 场 VC12MA 电流源进行了测试,当 VC12MA 电流源处于空载状态时,其输出电流 Allan 方差为  $1.30 \times 10^{-9}$ ,对铷原子喷泉钟二阶塞曼频移的相对扰动为  $2.83 \times 10^{-18}$ ;铷原子喷泉钟使用 VC12MA 电流源产生 C 场时,C 场电流值 Allan 方差为  $2.24 \times 10^{-9}$ ,对铷原子喷泉钟二阶塞曼频移的相对扰动为  $1.78 \times 10^{-17}$ ,铷原子喷泉钟使用原模拟电流源时其 C 场电流变化产生的下的二阶塞曼频移稳定度为  $7.29 \times 10^{-16}$ 。优化后,铷原子喷泉钟二阶塞曼频移从  $10^{-16}$  量级提升至  $10^{-17}$  量级,验证了本文方法的有效性。

铷原子喷泉钟作为日渐成熟的新型守时仪器,必须符合小型化、集成化、长期稳定的技术发展趋势。除了物理系统和电路系统的单独改良,两者之间以及同光学系统、频率综合系统的相互影响也将逐渐被纳入技术路线的改良方案之中。

## 参考文献

- [1] DAI SH Y, ZHENG F S, LIU K, et al. Cold atom clocks and their applications in precision measurements [J]. Chinese Physics B, 2021, 30(1): 42-56.
- [2] 陈伟亮, 刘昆, 郑发松, 等. 长期稳定度  $2 \times 10^{-16}$  的工程化高可靠铷原子喷泉钟[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2): 79-86.  
CHEN W L, LIU K, ZHENG F S, et al. Engineering highly reliable Rb fountain clock with long-term instability of  $2 \times 10^{-16}$  [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 79-86.
- [3] 刘丹丹, 阮军, 管勇, 等. 铯原子喷泉钟频移的自动评定系统研究[J]. 时间频率学报, 2019, 42(2): 107-114.  
LIU D D, RUAN J, GUAN Y, et al. Research on automatic assessment system for frequency shift of cesium fountain clock [J]. Journal of Time and Frequency, 2019 42(2): 107-114.
- [4] CHENG H N, DENG S M D, ZHANG ZH, et al. Uncertainty evaluation of the second-order Zeeman shift of a transportable  $^{87}\text{Rb}$  atomic fountain clock[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(12): 6-10.
- [5] ZHANG H, RUAN J, LIU D D, et al. Development and preliminary operation of  $^{87}\text{Rb}$  continuously running atomic fountain clock at NTSC[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-12.
- [6] 管勇, 刘丹丹, 王心亮, 等. 绝热跃迁方法测量铯喷泉钟冷原子碰撞频移[J]. 物理学报, 2020, 69(14): 79-86.  
GUAN Y, LIU D D, WANG X L, et al. Measurement of cold atom collision frequency shift by adiabatic transition method in cesium fountain clock [J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(14): 79-86.
- [7] 施俊如, 王心亮, 阮军, 等. 铯原子喷泉钟空间均匀 C 场的研究[J]. 时间频率学报, 2018, 41(3): 145-150.  
SHI J R, WANG X L, RUAN J, et al. Study on uniform C-field of cesium atomic fountain clock [J]. Journal of Time and Frequency, 2018, 41(3): 145-150.
- [8] 潘志兵, 谢勇辉, 帅涛, 等. 星载氢原子钟用多段线圈式 C 场的仿真及应用[J]. 天文研究与技术, 2020, 17(3): 341-348.  
PAN ZH B, XIE Y H, SHUAI T, et al. Simulation and application of multi-section coil for C field used in space passive hydrogen maser [J]. Journal of Astronomical Research and Technology, 2020, 17(3): 341-348.
- [9] SHI J R, WANG X L, BAI Y, et al. Evaluation of second-order Zeeman frequency shift in NTSC-F2[J]. Chinese Physics B, 2021, 30(7): 070601.
- [10] 徐俊秋, 李俊瑶, 赵峰, 等. 高性能铷原子钟的高精度频率漂移补偿研究[J]. 波谱学杂志, 2024, 41(2): 184-190.  
XU J Q, LI J Y, ZHAO F, et al. High-precision frequency drift compensation for high performance rubidium atomic clock [J]. Chinese Journal of Spectroscopy, 2024, 41(2): 184-190.
- [11] 林师远, 李文慧, 孙双花, 等. 基于 FPGA 的高速动态测量数据采集系统[J]. 电子测量技术, 2023, 46(15): 32-37.  
LIN SH Y, LI W H, SUN SH H, et al. High-speed dynamic measurement data acquisition system based on FPGA [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(15): 32-37.
- [12] VARGA-UMBRICH K, BAKOS J S, DJOTYAN G P, et al. Coherent manipulation of trapped Rb atoms by overlapping frequency-chirped laser pulses: theory and experiment[J]. The European Physical Journal D, 2022, 76(4): 70-76.
- [13] 程鹤楠, 邓思敏达, 张镇, 等. 可搬运铷喷泉原子钟量子化轴磁场的设计与优化[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 53-59.  
CHENG H N, DENG S M D, ZHANG ZH, et al. Design and optimization of magnetic field of the quantization axis of the atomic clock of the transportable rubidium fountain [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 53-59.
- [14] SHI J R, WANG X L, BAI Y, et al. Evaluation of second-order Zeeman frequency shift in NTSC-F2[J]. Chinese Physics B, 2021, 30(7): 120-127.
- [15] 张辉. 守时型铷  $^{87}$  喷泉钟研制[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2023.

- ZHANG H. Development of punctual rubidium 87 fountain clock [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences(National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences),2023.
- [16] 管勇. 铯喷泉钟冷原子碰撞频移评定技术研究[D]. 西安:中国科学院大学(中国科学院国家授时中心),2020.
- GUAN Y. Research on frequency shift evaluation technique of cold atom collision of cesium fountain clock[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences), 2020.
- [17] 施俊如. NTSC-F2 喷泉钟二阶塞曼频移和马跃拉纳跃迁频移的研究[D]. 西安:中国科学院大学(中国科学院国家授时中心),2022.
- SHI J R. Study on second-order Zeeman frequency shift and Majorana transition frequency shift of NTSC-F2 fountain clock[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences(National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences),2022.
- [18] 余凤翔. 铯喷泉钟激光稳频技术和原子选态方法研

究[D]. 西安:中国科学院大学(国家授时中心),2019.

YU F X. Research on laser frequency stabilization technology and atomic state selection method of cesium fountain clock [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences(National Time Service Center),2019.

### 作者简介

**朱子毅**(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为仪器与测试技术。

E-mail:zhuziyi@ntsc.ac.cn

**雷鹏越**,硕士研究生,主要研究方向为仪器与测试技术。

E-mail:leipengyue@ntsc.ac.cn

**张辉**,博士,高级工程师,主要研究方向为仪器与测试技术。

E-mail:zhanghui@ntsc.ac.cn

**阮军**,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为仪器与测试技术。

E-mail:ruanjun@ntsc.ac.cn

**张首刚**,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为仪器与测试技术。

E-mail:zhangshougang@ntsc.ac.cn