

引用格式: 陈江, 刘志栋, 王骥, 等. 一种超小型磁选态铯原子钟[J]. 时间频率学报, 2022, 45(1): 9-14.

# 一种超小型磁选态铯原子钟

陈江<sup>1,2</sup>, 刘志栋<sup>1</sup>, 王骥<sup>1,2</sup>, 马沛<sup>1</sup>, 郭磊<sup>1,2</sup>, 杨炜<sup>1,2</sup>,  
成大鹏<sup>1</sup>, 杨军<sup>1,2</sup>, 马寅光<sup>1</sup>, 崔敬忠<sup>1,2</sup>, 涂建辉<sup>1,2</sup>

(1. 兰州空间技术物理研究所, 兰州 730000;

2. 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000)

**摘要:** 本文提出了一种超小型磁选态铯原子钟。与传统的小型铯原子钟相比, 超小型铯钟体积减小 40%, 其中铯束管体积减小 23%, 频标电路体积减小 48%。采用数值方法研究了该钟的性能, 结果表明, 与传统小型铯钟 LIP Cs-3000 相比, 超小型铯钟的 Ramsey 线宽增大 67%, 信噪比增大 36%。该超小型铯钟体积约为 27 L, 预计 Allan 偏差介于  $1.0 \times 10^{-11}/\sqrt{\tau} \sim 3.3 \times 10^{-11}/\sqrt{\tau}$  之间。数值计算结果为超小型铯钟的研制奠定了理论基础。

**关键词:** 铯原子钟; 铯束管; Allan 方差

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2022-01-0009-06

## Small compact magnetically state-selected cesium atomic clock

CHEN Jiang<sup>1,2</sup>, LIU Zhi-dong<sup>1</sup>, WANG Ji<sup>1,2</sup>, MA Pei<sup>1</sup>, GUO Lei<sup>1,2</sup>, YANG Wei<sup>1,2</sup>,  
CHENG Da-peng<sup>1</sup>, YANG Jun<sup>1,2</sup>, MA Yin-guang<sup>1</sup>, CUI Jing-zhong<sup>1,2</sup>, TU Jian-hui<sup>1,2</sup>

(1. Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China;

2. Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** This paper presents a small compact cesium atomic clock. Compared with the traditional compact cesium atomic clock, the volume of the small compact cesium clock would be reduced by 40%, the cesium beam tube is reduced by 23%, and the circuit by 48%. The performance of the clock is simulated with numerical methods. The results show that, compared with the traditional compact cesium clock, the Ramsey central peak width of the small compact cesium clock will increase by 67%, and the signal-to-noise ratio increase by 36%. The Allan variance is estimated to be between  $1.0 \times 10^{-11}/\sqrt{\tau}$  and  $3.3 \times 10^{-11}/\sqrt{\tau}$ . The results of the article pave a good way for the development of small compact cesium clocks.

**Key words:** cesium atomic clock; cesium beam tube; Allan variance

## 0 引言

近年来, 国内突破了小型铯原子钟的制造工艺, 成功开发出系列商用铯原子钟<sup>[1-3]</sup>。商用铯钟在短短

几年内便得到广泛应用，部分产品甚至应用于舰船等复杂环境。

商用铯钟的后续发展包括两个方面。一是性能指标的提升和功能的完善，二是体积和重量的进一步减小。第一个方面是人们持续关注的焦点，第二个方面引起的关注相对较少，之所以如此是因为铯钟的小型化往往伴随着指标的下降<sup>[4-6]</sup>。然而在某些应用中，如复杂环境下的车载、舰载及机载等应用，更强调设备的便携性，超小型铯钟更具有优势。

本文提出了一种超小型铯钟，其结构与小型铯钟 LIP Cs-3000 相同。LIP Cs-3000 是目前国内体积最小的一款商用小型铯原子钟，体积大约 45 L。超小型铯钟在继承 LIP Cs-3000 结构的基础上，同时对铯束管和频标电路实行小型化。在铯束管的小型化方面，通过减小 U 型微波腔漂移区的距离，预计铯束管体积将减小 23%；在频标电路小型化方面，通过合并电路模块和优化电路结构，预计电路体积减小 48%。整机体积将减小 40%。通过上述两个方面的小型化，得到的超小型铯钟的体积将为 27 L。本文采用 Monte Carlo 方法对超小型铯原子钟的性能进行了研究，结果表明这种铯钟的 Ramsey 中心峰线宽为 637 Hz，信号束流强度将增大 36%。结合 LIP Cs-3000 的指标，我们估算了超小型铯钟的 Allan 方差。模拟结果证明了这种结构的超小型铯钟是可行的，为该型铯钟的研制打下了理论基础。

本文的第 2 部分介绍了超小型铯钟的基本结构，第 3 部分介绍了模拟方法及模拟结果，第 4 部分是总结。

## 1 超小型铯钟的结构

超小型铯钟是在 LIP Cs-3000 的基础上发展来的，因此基本结构与 LIP Cs-3000 相同，由两大部分组成：物理部分（即铯束管）和频标电路部分。物理部分采用了双极型磁场进行选态；束光学属于 S 型，且为单束；微波腔是 U 型结构，采用 E 面弯曲的方式，馈入的微波为 TE<sub>10</sub> 波，开孔方式选在微波腔的短路面；采用电子倍增器放大信号电流。结构示意图如图 1。频标电路采用了数字化技术，对 C 场输入电流和微波功率实时优化，对倍增器电压根据增益情况实时调节。在工作状态下，铯原子从铯炉准直器喷出，进入选态磁铁 A，选出  $|3, m\rangle$  态和  $|4, -4\rangle$  态，其中  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ ，在微波腔中跃迁后，进入选态磁铁 B，选出  $|4, 0\rangle$  态的原子并转化成离子作为跃迁信号，将该离子流信号放大后输出给频标电路，实现对晶振的锁定。

这种结构的优点在于原子的选态和信号的采集都发生在密封的铯束管内部，从而将外界对原子钟的干扰降到了最低，保证了原子钟的高可靠性、优越的长期稳定性和几乎无漂移率等特点，并且可以长期连续运行。

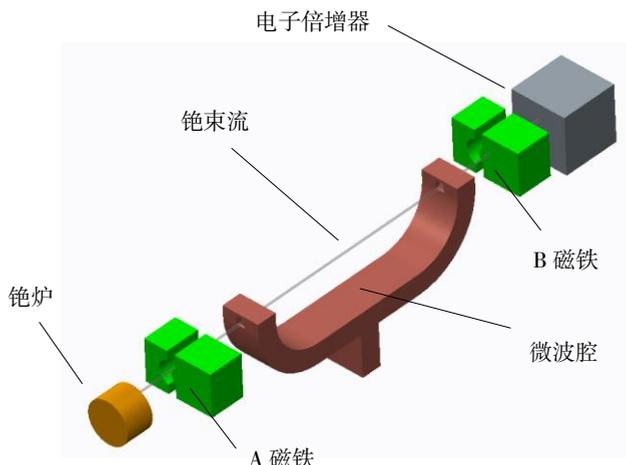


图 1 超小型磁选态铯原子钟物理部分基本构成（其中漂移区长度为 7.4 cm）

超小型铯钟与 LIP Cs-3000 的不同有两点。首先是漂移区的长度减小了 55%，由原来的 16.7 cm 减至 7.4 cm。预计铯束管的体积将减小 23%。其次，电源采用高集成线性 AC/DC 模块替代原有交流降压—整流—DC—DC 变换的方案，在指标不变的情况下，模块由 3 个减少为 1 个，重量由 3 kg 减少为 0.5 kg，体积缩小 70%；微波链路倍频部分由原直接倍频模块、中频锁相环模块、混频 DDS 模块归并为一个整体微波链路模块，同时减少内部连线，体积可减小 20%。预计整个电路的体积将减小 48%。

体积的减小使得超小型铯钟尤其是铯束管的技术指标与 LIP Cs-3000 不同，包括 Ramsey 线宽、铯束管信噪比等。

## 2 超小型铯钟的性能分析

为了计算铯钟的 Ramsey 线型，我们采用数值分析的方法考察束流中的每个原子。考虑到束流中原子的速度遵从一定的分布，所以在计算中采用了 Monte Carlo 方法。对束流中每个原子的速度进行抽样，以此作为输入精确计算原子偏转轨迹，这样就可获得精确的 Ramsey 线型。分别计算了 LIP Cs-3000 和超小型铯钟的 Ramsey 线型，通过比较线型来分析估算超小型铯钟的性能。

铯原子在铯炉中加热到一定温度（通常是 90℃ ~ 125℃）后通过准直器喷出，喷出的铯原子束的速度大小  $v$  遵从如下的分布<sup>[4]</sup>

$$f(v) \sim v^3 e^{-v^2/\alpha^2}, \quad (1)$$

式 (1) 中， $\alpha$  是最可几速率，由下式给出

$$\alpha = \sqrt{\frac{2kT}{m}}, \quad (2)$$

式 (2) 中， $T$  为铯炉温度，单位是 K（开尔文）， $k$  为玻尔兹曼常数， $m$  为铯原子质量，单位为 kg。

原子速度的方向遵从原子束的角分布。准直器是细长管道，主要用于改善束的角分布，使原子束变得更尖锐<sup>[7]</sup>。定义  $\theta_0$  为束的发散角，它决定于准直管的几何形状

$$\tan \theta_0 = \frac{2r}{l}, \quad (3)$$

式 (3) 中， $r$ 、 $l$  分别为准直管的半径与长度。对于小的  $\theta_0$ ，在单位立体角内发射出来的原子数随发射角  $\theta$  的关系可近似地表示为<sup>[4]</sup>

$$I(\theta) \sim \begin{cases} \cos^{-1} \frac{\theta}{\theta_0} - \frac{\theta}{\theta_0} \left(1 - \frac{\theta^2}{\theta_0^2}\right)^{\frac{1}{2}} + \frac{2\theta}{3\theta_0} \left[1 - \left(1 - \frac{\theta^2}{\theta_0^2}\right)^{\frac{3}{2}}\right] & [0 \leq \theta \leq \theta_0] \\ \frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta} & [\theta_0 \leq \theta \leq \pi/2] \end{cases}. \quad (4)$$

在计算中，对每个原子的速度大小和方向分别按照式 (1) 和式 (4) 进行 Monte Carlo 抽样。此外，围绕准直器管道轴线的方位角  $\varphi$  遵从均匀分布，因此对方位角按均匀分布抽样。

图 2 和图 3 给出了 Ramsey 线型的计算结果。在计算中铯炉温度取 100℃，准直器发散角  $\theta_0 = \arctan 0.0173$ ，图中每个点的计算用了 30 000 000 个原子。根据图 2 和 3 可以发现，LIP Cs-3000 的 Ramsey 半峰值线宽为 382 Hz，超小型铯钟为 637 Hz。图 2 和 3 的峰谷的差值代表信号的大小，差值分别为 1 581 和 2 150。相较于 LIP Cs-3000，超小型铯钟的线宽增大了 66.8%，这必然对稳定度带来不利影响，然而信号增大了 36%，又减少了不利影响。

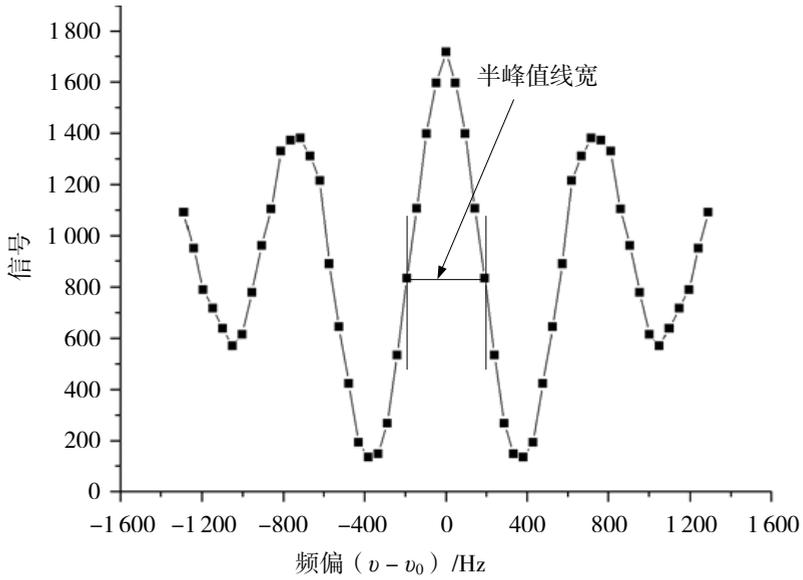


图 2 LIP Cs-3000 的 Ramsey 曲线

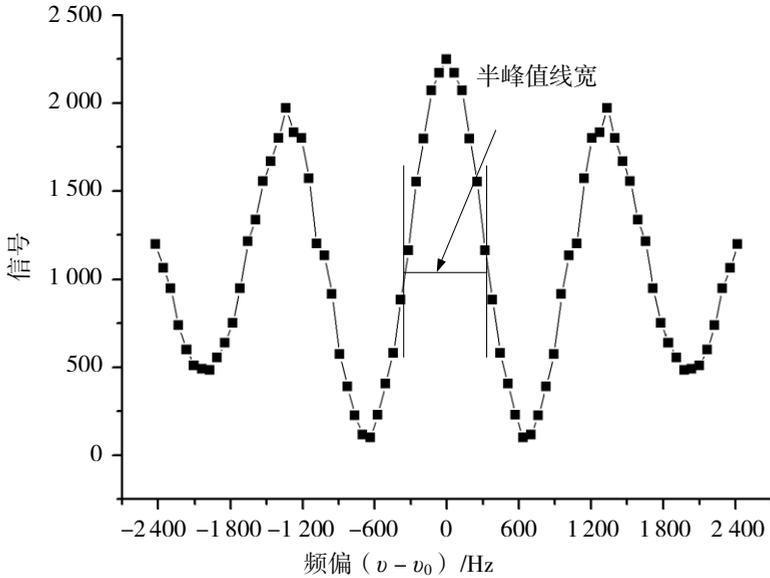


图 3 超小型铯钟的 Ramsey 曲线

当线宽  $\Delta\nu$  和信噪比  $S_{\text{SNR}}$  已知时, 可根据如下公式计算频率稳定度<sup>[8-9]</sup>, 其中  $\nu_0 = 9\,192\,631\,770$  Hz 是钟跃迁频率

$$\sigma_y = \frac{1}{\pi} \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \frac{1}{S_{\text{SNR}}} \frac{1}{\sqrt{\tau}} \quad (5)$$

假定超小型铯钟的稳定度、线宽和信噪比分别为  $\sigma'_y$ 、 $\Delta\nu'$  和  $S'_{\text{SNR}}$ , LIP Cs-3000 分别为  $\sigma''_y$ 、 $\Delta\nu''$  和  $S''_{\text{SNR}}$ , 根据式 (5) 可推出

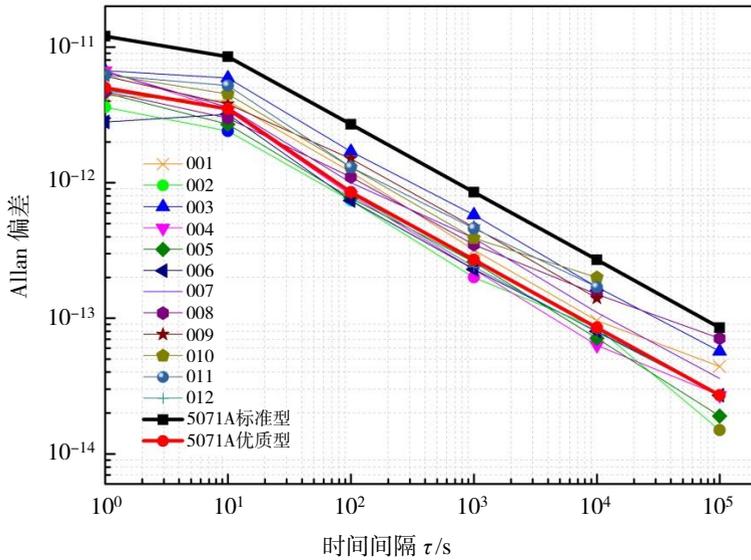
$$\sigma'_y = \frac{\Delta\nu'}{\Delta\nu''} \frac{S''_{\text{SNR}}}{S'_{\text{SNR}}} \sigma''_y \quad (6)$$

前已指出, 超小型铯钟的线宽增大了 66.8%, 因此  $\frac{\Delta\nu'}{\Delta\nu''} = 1.67$ , 信号增大了 36%, 考虑到信号大小与信噪比成正比关系, 因此  $\frac{S''_{\text{SNR}}}{S'_{\text{SNR}}} = \frac{1}{S'_{\text{SNR}}/S''_{\text{SNR}}} = \frac{1}{1.36} = 0.735$ , 代入式 (6) 可得

$$\sigma'_y = 1.67 \times 0.735 \sigma''_y = 1.23 \sigma''_y \quad (7)$$

式 (7) 表明，知道了  $\sigma''_y$  就可以求出  $\sigma'_y$ 。图 4 是给出了 12 台 LIP Cs-3000 的稳定度实测曲线<sup>[1]</sup>，这些曲线是在实验室环境下以氢钟为参考源，用频标比对器得到的，曲线中也包括了 5071A 的标准型和高性能型的曲线，可以看出 LIP Cs-3000 处于 5071A 的标准型和高性能型之间，即  $\sigma''_y$  处于  $8.5 \times 10^{-12} / \sqrt{\tau}$  和  $2.7 \times 10^{-11} / \sqrt{\tau}$  之间<sup>[10]</sup>。根据式 (7) 可估计出超小型铯钟的稳定度范围：

$$\sigma'_y = 1.23 \sigma''_y = 1.0 \times 10^{-11} / \sqrt{\tau} \sim 3.3 \times 10^{-11} / \sqrt{\tau} \quad (8)$$



注：图中的 001、002 等代表铯钟的编号

图 4 LIP Cs-3000 铯钟的 Allan 偏差曲线

超小型铯钟的稳定度曲线范围如图 5 所示。图 5 同时给出了 5071A 铯钟的范围，这也是 LIP Cs-3000 铯钟的范围。可以看出尽管超小型铯钟的体积相对于 LIP Cs-3000 显著减小，但是稳定度曲线范围有很大一部分落在 5071A 或者 LIP Cs-3000 所在的区域。需要说明的是，由于本文设计的超小型铯钟漂移区长度相较 LIP Cs-3000 减少一半以上，磁场扰动影响亦减小，因此，实测稳定度预期比估算结果要好。

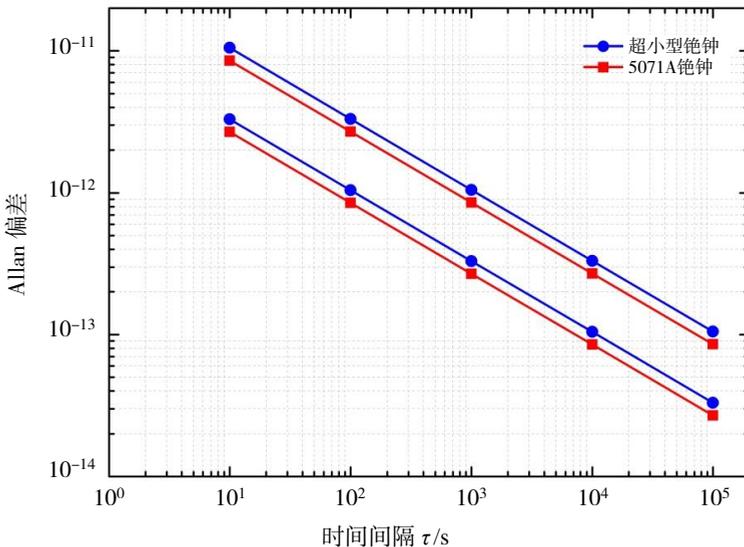


图 5 超小型铯钟与 5071A 铯钟的 Allan 偏差范围比较

### 3 总结与展望

本文提出了一种超小型铯钟, 相对于商用小型铯钟 LIP Cs-3000, 体积减小了 40%。采用数值模拟方法对超小型铯钟的性能进行了研究, 发现该钟的 Ramsey 线型的半峰值线宽为 637 Hz, 铯束管的信噪比相对于普通小铯钟提高了 36%, 由此估算出其稳定度范围大致在  $1.0 \times 10^{-11}/\sqrt{\tau} \sim 3.3 \times 10^{-11}/\sqrt{\tau}$  之间。模拟结果说明了本文提出的超小型铯钟的方案是可行的。超小型铯钟可以用于航空、航天及通信等领域, 也可以应用于计量、科学研究等领域。

#### 参考文献:

- [1] 陈江, 马沛, 王骥, 等. 小型磁选态铯原子钟产品化进展[J]. 宇航计测技术, 2020, 40(3): 12-16+45.
- [2] 陈江, 王骥, 马沛, 等. LIP Cs3000C 磁选态铯原子钟的测试[J]. 时间频率学报, 2018, 41(3): 190-193.
- [3] 曹远洪, 张首刚, 陈海军. 一种商品光抽运铯原子钟[C]//2017 年全国时间频率学术会议论文集, 西安: 全国时间频率学术年会组委会, 2017: 171-178.
- [4] 王义遒, 王庆吉, 傅济时, 等. 量子频标原理[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [5] 王义遒. 原子钟与时间频率系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [6] VANIER J, AUDION C. The quantum physics of atomic frequency standards[J]. Science, 1989, 249(4969): 685-686.
- [7] GIORDMAINE J A, WANG T C. Molecular beam formation by long parallel tubes[J]. Journal of Applied Physics, 1960(31): 463-471.
- [8] RIEHLE F. Frequency standards: basic and applications[M]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH, 2004.
- [9] 谢伟滨, 王青, 齐向晖, 等. 基于二维磁光阱的冷原子光抽运铯原子钟研究[J]. 时间频率学报, 2018, 41(3): 179-184.
- [10] SYMMETRICOM. INC. Symmetricom 5071A Primary Frequency Standard: Operating and Programming Manual, USA: Symmetricom[K]. 2005.