

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.03.09

国产高性能光抽运小铯钟研制进展

贺轩¹, 袁志超¹, 陈佳源¹, 陈徐宗¹, 王青^{2*}, 齐向晖^{1*}

(1. 北京大学 量子电子学研究所, 北京 100871;

2. 北京大学 电子信息科学基础实验中心, 北京 100871)

摘要: 介绍了北京大学利用光抽运小铯钟相比于传统的磁选态小铯钟有更高的铯原子利用率的优势, 在频率稳定度方面取得的突破性进展; 总结出了光抽运小铯钟达到高性能的关键因素在于铯束管优值、激光稳频和电路地噪声; 最终优化后的光抽运小铯钟频率稳定度均超过了 5071A 优质管 2 倍以上, 典型值为 $3 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$; 近三年来陆续研制出 8 台光抽运小铯钟, 初步实现了高性能光抽运小铯钟工程化。

关键词: 原子钟; 小铯钟; 光抽运; 频率稳定度; 信噪比

中图分类号: TB939

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)03-0099-08

Progress of domestic high performance optically pumped compact cesium clocks

HE Xuan¹, YUAN Zhichao¹, CHEN Jiayuan¹, CHEN Xuzong¹, WANG Qing^{2*}, QI Xianghui^{1*}

(1. Institute of quantum electronics, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Center for experimental electronics and information, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The advantage of optically pumped compact cesium clocks is that they have a higher utilization of atoms compared to traditional magnetic state-selection cesium clocks. The group in Peking University has made breakthroughs in the frequency stability of optically pumped compact cesium clocks. The key factors for achieving high performance of optically pumped compact cesium clocks are the cesium beam tube, laser frequency stabilization, and circuits. The frequency stability of the optimized optically pumped compact cesium clock exceeds by more than twice that of the 5071A high-performance cesium beam tubes, with a typical value of $3 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$. Eight optically pumped compact cesium clocks have been developed in the past three years. And the commercial high performance optically pumped compact cesium clocks have been preliminarily realized

Key words: atomic clock; compact cesium clock; optical pumping; frequency stability; signal-to-noise ratio

0 引言

小铯钟是目前应用广泛的原子钟之一, 在守时

授时、卫星定位导航、高速通信、量子精密测量等领域发挥着重要作用^[1-4]。小铯钟的长期频率稳定度较高, 目前仍然无法完全被其他原子钟替代。光

收稿日期: 2023-03-20; 修回日期: 2023-04-03

基金项目: 国家自然科学基金 (11920101004, 11334001, 61727819, 61475007); 国家重点基础研究发展计划 (2021YFA1400900, 2021YFA0718300)

引用格式: 贺轩, 袁志超, 陈佳源, 等. 国产高性能光抽运小铯钟研制进展[J]. 计测技术, 2023, 43(3): 99-106.

Citation: HE X, YUAN Z C, CHEN J Y, et al. Progress of domestic high performance optically pumped compact cesium clocks[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(3):99-106.



抽运小铯钟采用光抽运和光检测技术，解决了磁选态铯束原子钟存在的无法兼顾性能和寿命的问题，同时可以实现更高的频率稳定度性能^[3-4]。北京大学在光抽运小铯钟的频率稳定度的研究上取得了突破性进展，短期频率稳定度可以达到 $3 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$ ，长期频率稳定度可以达到 $7 \times 10^{-15}@5 \text{ days}$ ^[5-7]。

1955年，英国国家物理实验室(NPL)的L. Essen和J. Parry研制了世界上第一台磁选态铯束原子钟^[8]，1980年前后，诞生了第一台光抽运铯束原子钟^[9-10]。国外对铯钟的研究持续了约60年，其中，最具有代表性的成果是5071A铯钟，其优质管短期频率稳定度为 $8.5 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$ ，长期频率稳定度超过 1×10^{-14} ，是目前世界范围内应用最为成熟的小铯钟之一。法国的Cs-IV^[11](使用分布式布拉格反射激光器稳定度为 $2.8 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$ ，使用外腔激光器稳定度为 $1.5 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$ ，稳定度下降到 2×10^{-14} 未观测到闪变噪声平台)，美国的GPS-III^[12](十年设计寿命条件下稳定度为 $3.8 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$ ，三年设计寿命条件下稳定度为 $1.4 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$)以及欧洲的OSCAR^[13](使用分布式反馈激光器稳定度为 $2.74 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$)在光抽运小铯钟方面取得了不错的成果，目前商品化的光抽运小铯钟代表产品有OSA3300(新款产品OSA3300-HP指标对标5071A优质管)。基于发展我国独立自主的时间频率体系需求，国内对小铯钟的研究在持续开展，具有代表性的单位有北京大学^[14](磁选态为 $4.1 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$)、兰州空间技术物理研究所(简称航天510所)^[15]以及成都天奥公司^[16]，分别研制出BD-1024, LIP-3000以及TA-1000系列的商品化小铯钟产品，其指标均对标5071A优质管。

北京大学研究团队在前期科研的基础上，逐步形成了可量产的光抽运小铯钟型号。本文旨在介绍经过了多台光抽运小铯钟的调试，总结出的影响原子钟频率稳定度的关键因素，为之后光抽运小铯钟的生产提供参考。文章首先介绍光抽运小铯钟的基本工作原理，然后讨论光抽运小铯钟的铯束管优值、激光稳频以及电路地噪声对光抽运小铯钟频率稳定度性能的影响，第三部分介绍光抽运小铯钟的频率稳定度测试结果，最后是结论部分。

1 光抽运小铯钟工作原理

小铯钟的核心原理是分离振荡场^[17]，光抽运小铯钟的特征是激光抽运制备原子态和激光诱导荧光检测原子态。整体光抽运小铯钟实现了频率信号的产生、频率信号与铯原子能级相互作用以及闭环反馈锁定频率信号的功能。

1.1 工作流程

光抽运小铯钟是典型的被动型原子钟，其工作原理如图1所示。

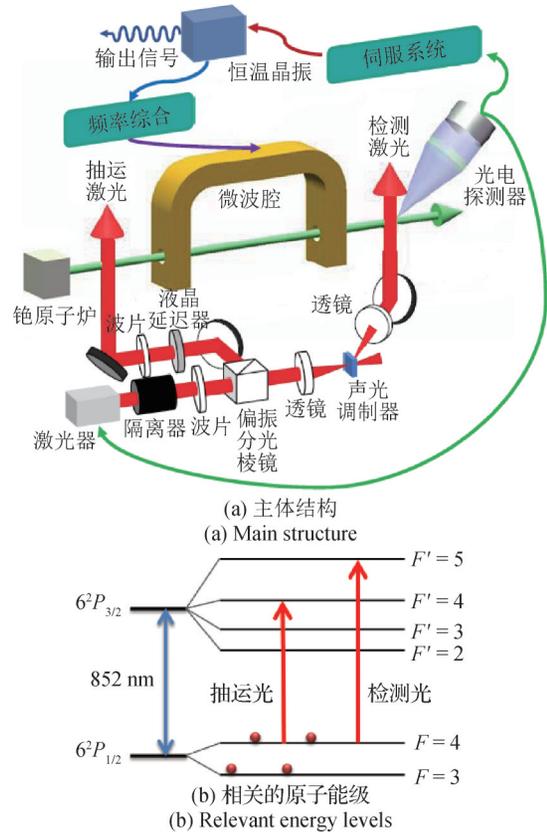


图1 光抽运小铯钟工作原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the principle of optically pumped compact cesium clock

铯原子贮存在铯原子炉当中，随着铯原子炉温度的升高，铯原子变成铯原子蒸气，并在蒸汽压力的作用下沿着铯炉准直器喷出，形成铯原子束流(绿色线)，此时，铯原子均匀地分布在铯原子的各个基态能级上。铯原子束离开铯原子炉之后，首先进入到光抽运相互作用区，与抽运激光 $|F=4\rangle-|F'=4\rangle$ 相互作用，铯原子被制备到 $|F=3\rangle$

基态能级,此时铯原子均匀地分布在该能级的7个磁子能级上。

随后,铯原子束进入分离振荡场,在C场的作用下,铯原子基态的各个磁子能级发生分离。原子束流经过第一个微波相互作用区,与微波相互作用,处于 $|F=3, m_F=0\rangle$ 的铯原子在微波激励的作用下,将以一定概率分布的形式处于 $|F=3, m_F=0\rangle$ 和 $|F=4, m_F=0\rangle$ 的叠加态。接着,铯原子束经过两个微波腔之间的自由演化区,进入到第二个微波相互作用区再次与微波相互作用。这里的微波信号由一个恒温晶振通过倍频综合得到,其频率在铯原子 $|F=3\rangle - |F=4\rangle$ 基态跃迁频率附近。处于叠加态的原子在微波激励的作用下发生跃迁,两次微波相互作用引起原子态的干涉,此时铯原子仍处于叠加态,相比于经过光抽运相互作用区域时,处于 $|F=3, m_F=0\rangle$ 的铯原子跃迁到 $|F=4, m_F=0\rangle$ 的概率为Ramsey跃迁概率。

穿过微波腔之后的铯原子束进入到光检测相互作用区,与检测激光 $|F=4\rangle - |F'=5\rangle$ 相互作用,处于 $|F=4\rangle$ 能级的铯原子与激光相互作用产生荧光并被处于检测区域的光电探测器转换成电信号。这一微弱的电信号经过电子学放大滤波等方式处理,得到了铯原子跃迁的相关信息。

伺服系统对这些信号进行处理之后,通过DAC等器件对恒温晶振进行反馈,以及对系统参数进行修正和控制。闭环锁定之后恒温晶振的输出信号就是原子钟的输出信号。为了满足不同的使用需求,可以进行扩展得到多种频率、多种类型的输出信号。

1.2 基本组成

1.2.1 铯束管

光抽运小铯钟的铯束管包括真空束管结构(图1(a)省略了中间铯束管的外壳)、铯原子炉、微波腔和荧光收集器几个主要部件。其中,真空束管结构是一个长度约为40 cm,直径约为18 cm的圆柱形管,密封之后内部抽为真空,真空度约为 10^{-7} Pa,在这样的真空环境下铯原子束几乎不与背景气体发生碰撞,提供了实现原子跃迁的环境。铯原子炉贮存了约为5 g的铯原子,在加热丝的加热作用下,铯原子汽化成原子蒸气,在铯原子炉

中饱和蒸汽压的作用下从铯原子炉上的开口中喷出,形成铯原子束流,在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 的时候,铯原子束流量可以达到每秒约 4×10^{13} 个原子。在此束流量下,铯原子炉可以连续喷射铯原子10年,满足了铯原子钟长期连续运行,进行守时的需求。微波腔是一个波导腔,呈现两臂的形状,铯原子束流依次穿过微波腔两臂上的开口时与微波发生相互作用实现Ramsey双共振。微波腔的总长度为16.7 cm,两臂上发生相互作用的长度为1 cm, Q 值约为1 000,经调谐后的微波腔的失谐量约为500 kHz。光抽运小铯钟有2个荧光收集器,图1(a)省略了位于抽运相互作用区域的荧光收集器。当原子束流与一束垂直的激光发生相互作用时,将会通过自发辐射向四周发出荧光,被荧光收集器收集,并经过光电管转换成电信号,荧光收集效率可以达到25%。

1.2.2 激光

不同研究机构的光抽运小铯钟的基本光路大同小异,根据各自不同的工作方式有所微调。北京大学光抽运小铯钟的光路(如图1(a)所示)只使用一台激光器,直接利用激光与铯原子束流在检测相互作用区域形成的荧光谱实现激光稳频。由分布式反馈激光器产生的激光,首先经过一个隔离器(防止后级的激光返回进入激光器引起光反馈而增加激光频率噪声^[18]),随后经过半波片和偏振分光棱镜分成两束,分别用于光抽运和光检测。通过半波片和偏振分光棱镜可以对分开的两束激光的光强进行分配,使两路激光的光强分别满足光抽运和光检测的使用需求。其中一路激光作为抽运激光,依次经过一个液晶相位延迟器和偏振片,通过液晶相位延迟器可以对激光的偏振进行控制,结合偏振片则可以实现对进入到原子相互作用区域的抽运激光功率的电调节;另一路激光作为检测激光,经过了一个声光调制器(AOM)进行了移频,因为激光器的输出频率是通过检测区域的原子荧光谱锁定在铯原子的 $|F=4\rangle - |F'=5\rangle$ 跃迁线上,所以使用AOM将激光的频率移动251 MHz,使得检测激光频率锁定时,抽运激光的频率恰好到达铯原子的 $|F=4\rangle - |F'=4\rangle$ 跃迁线,由于AOM的通光口径较小,所以在前后加入2个

透镜实现光斑的汇聚和扩散，经过反射后与原子束流相互作用。由于铯原子束流具有一定的宽度，实际的抽运激光和检测激光的光斑呈 $2\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 的长方形，最终进入到铯束管中的2束激光的光功率均设置为 2 mW ，分别满足完全抽运和饱和检测。

1.2.3 电路

光抽运小铯束钟的电路系统主要包括频率信号的倍频综合部分以及伺服控制电路两个核心部分，此外还包括电源电路、屏幕显示电路、频率

输出和相位同步、卫星校准等非核心功能部分，如图2所示。

频率信号的倍频综合部分实现了基于恒温晶振输出的 10 MHz 信号，产生 9192 MHz 微波信号的功能。微波频率源的输出功率最大可达到 5 dBm ，输出频率在 1 Hz 带宽内的相位噪声，近端为 $-45\text{ dBc}@1\text{ Hz}$ ，远端可以达到 $-120\text{ dBc}@100\text{ kHz}$ 。微波源输出的微波信号的频率和功率均可以通过频率综合链路进行精确地调节，频率的调节精度可以达到 μHz 量级，功率的调节精度可达 0.01 dBm 。

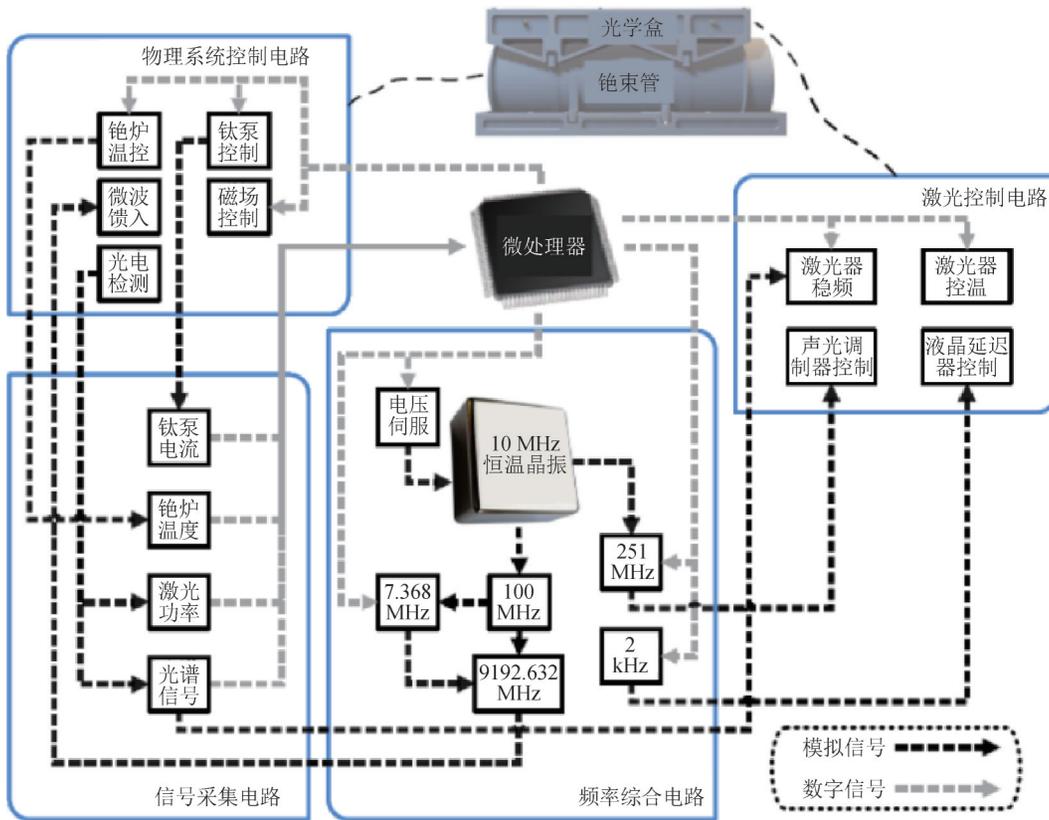


图2 光抽运小铯束钟电路工作原理框图

Fig.2 Schematic diagram of the circuits system in optically pumped compact cesium clock

伺服控制电路部分，一方面实现了对光抽运小铯钟运行参数的准确控制，包括：真空高压维持、铯炉温度控制、C场电流控制、激光器驱动以及激光频率和功率控制。其中，真空高压维持在 3500 V ，铯炉温度数据长期平均之后可以稳定在 $0.01\text{ }^\circ\text{C}$ 内，C场电流的波动可以控制在 $100\text{ }\mu\text{A}$ ，激光器的驱动电流的波动可以控制在 $10\text{ }\mu\text{A}$ 左右。另一方面还包括了对恒温晶振的闭环锁定、C场强度主动伺服、微波功率主动伺服以及激光功率主

动伺服的硬件和软件。

2 影响光抽运小铯钟稳定度的关键因素

抽运小铯钟在采样时间为 τ 时的频率稳定度用 Allan 标准差 $\sigma_y(\tau)$ 表示为

$$\sigma_y(\tau) = \frac{2}{\pi} \frac{\Delta\nu}{\nu_{hfs}} \frac{1}{SNR} \frac{1}{\sqrt{\tau}} \quad (1)$$

式中： ν_{hfs} 为铯原子基态超精细跃迁频率； $\Delta\nu$ 为 Ramsey 光谱线宽（约 580 Hz ）； SNR 为信噪比。

由于体积要求限制了光谱线宽的进一步压窄,小铯钟的频率稳定度主要由信噪比 SNR 决定,而噪声 N 的主要来源包括原子数散弹噪声和探测噪声。原子数散弹噪声决定了理想条件下小铯钟的信噪比极限,对应的信噪比大小和检测区的有效束流强度 I_a 相关

$$(SNR)_a = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2} I_a} \quad (2)$$

铯束管优值在满足需求的条件下,小铯钟在激光检测区有信号贡献的束流量可以达到每秒 3×10^9 个原子,对应的极限信噪比为 34 000,频率不稳定度极限为 $1.1 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$ 。目前,限制北京大学光抽运小铯钟稳定度的主要因素是探测噪声,其中最主要的成份是激光频率噪声和电路地噪声。在探测噪声的限制下,小铯钟信噪比逐步提升到 20 000 左右。

2.1 铯束管优值

铯束管是光抽运小铯钟物理系统的主要部分,铯束管完成生产之后,最关键的指标是它所能产生的有效铯原子束流强度。有效束流强度是指在光抽运小铯钟正常工作的过程中,能够穿过抽运区域和微波相互作用区域到达检测区域,且能够与检测激光发生相互作用提供 Ramsey 信号的铯原子束流。对于一支铯束管来说,北京大学研究团队将光抽运铯束管的优值 Q_{tube} 定义为:在铯原子炉温度为 $100 \text{ }^\circ\text{C}$,检测光强输入为 2 mW ,光斑大小为 $2 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,激光扫描范围为 100 MHz ,激光扫描频率为 10 Hz ,且无抽运光及微波信号的测试条件下,在检测区测量铯原子束流的受激荧光谱,得到荧光谱的信号峰峰值 V_{signal} 与荧光本底信号 V_{bg} 的比值是铯束管的优值,即

$$Q_{\text{tube}} = \frac{V_{\text{signal}}}{V_{\text{bg}}} \quad (3)$$

荧光谱信号的大小与有效束流强度成正比,有效束流强度越大,该原子束管性能越高。式(3)同时还考虑了散射光,即本底荧光信号带来的影响,这部分本底信号不提供有效信号,仅给系统带来固有噪声。

铯束管优值 Q_{tube} 共衡量了:①铯原子炉开口的完整程度;②铯原子炉、微波腔开口、光与原子

相互作用区轴向的准直程度;③铯束管光窗、光与原子相互作用区,配合光路的准直程度;④束管的真空度;⑤荧光收集器的收集效率;⑥光电探测器的总体探测效率等多项设计、加工、装配的综合结果。北京大学研究团队得到的光抽运铯束管的优值分布在 $1 \sim 6$ 之间,当铯束管的优值小于 1 时,该铯束管不满足制作高性能光抽运小铯钟的需求,优值超过 6 时,该铯束管的整体结果特别好,属于优质铯束管,研制的光抽运小铯钟具备获得更高频率稳定度的潜力。

2.2 激光稳频

激光是光抽运小铯钟的一个特点,实际与原子相互作用的激光的性能直接影响小铯钟的频率稳定度。北京大学所研制的光抽运小铯钟对激光进行操控的原理框图如图 3 所示,利用铯原子束流荧光谱进行激光稳频,稳频后的激光频率稳定度为 $3.5 \times 10^{-11} / \tau^{1/2}$,在陆续的光抽运小铯钟调试过程中,发现以下内容:

1) 电路放大倍数相同时,系统采集到的铯原子束流荧光谱的谱峰信号越大,激光稳频链路中的误差信号越大,误差斜率更陡峭,最终稳频的效果就越好,这是不选用饱和吸收谱稳频的原因之一。

2) 对激光器的电流进行调制,对光谱信号进行解调,得到稳频所需误差信号时,由于束管的个体差异,需要实现不同大小的调制深度以匹配荧光谱,从实际结果来看:调制深度在 $1/3 \sim 1/2$ 倍的半高全宽时,稳频所需的误差信号足够陡峭,同时调制本身所带来的对小铯钟频率锁定的影响不明显。

3) 激光稳频一路光谱信号的提取带宽需要合适选取。选用的激光调制频率为 10 kHz ,当提取带宽过大时,更多的噪声进入到误差信号中,小铯钟频率稳定度变差;带宽过小时,调制频率信号无法有效提取,使得激光器锁定强度较小,也会影响频率稳定度。经过调试,在光抽运小铯钟中选用了 $1 \sim 100 \text{ kHz}$ 的滤波带宽对光谱信号进行提取。

4) 激光稳频的 PI 强度直接影响光抽运小铯钟的频率稳定度,在不发生振荡的前提下,由于铯

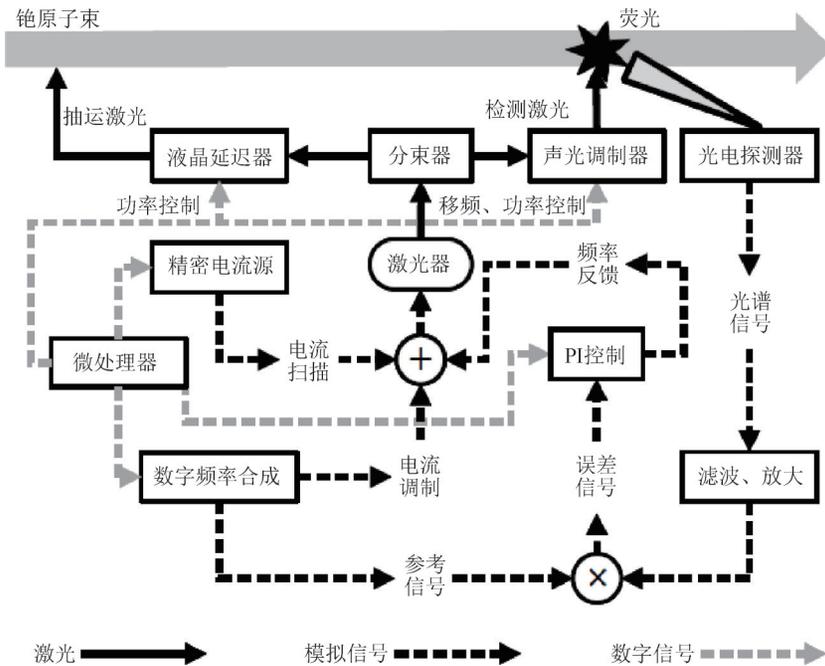


图3 光抽运小铯钟的激光操控原理框图

Fig.3 Schematic diagram of the principle of laser control in optically pumped compact cesium clock

原子束流荧光谱的线宽（约 20 MHz）比铯原子能级固有线宽大，PI 反馈强度越大，激光本身的频率输出性能受到影响，激光频率噪声增加，恶化小铯钟频率稳定度，而 PI 反馈强度越小，则激光频率易于在外界环境干扰下出现失锁。经过调试，光抽运小铯钟选择临界振荡 30% 的反馈强度进行激光稳频。

5) 光抽运小铯钟的频率稳定度主要受限于激光频率噪声，在束管中单独设计用于激光稳频的光与原子相互作用区等，有助于小铯钟频率稳定度的进一步优化。

2.3 电路地噪声

电路系统中有多种多样的地，如电源地、模拟地、数字地、信号地及功率地等。接地方式决定了电路中整体电流的走向分布，对电路系统中各路信号的传播有着微弱的影响，称为地噪声。电源地指供电信号的最终回流地；模拟地和数字地分别指电路当中模拟信号部分的基准地和数字信号的基准地，模拟信号频率较为单一，而数字信号常常为快速变化的方波信号，存在高次谐波，虽然数字信号抗干扰能力强，但是会对模拟信号产生不良影响，所以电路当中常对模拟信号和数字信号进行分隔；信号地和功率地一般根据用途

区分：传递信息的电流对应的地为信号地（一般电流较小），传递能量的电流对应的地为功率地（一般电流较大）。在电路系统中接地的方式主要有星型接地和整体铺地两种：

1) 星型接地指各个用电芯片、负载的地通过各自的节点依次回流。这种接地的的好处是各个电路信号的电源回流不会发生重叠，不存在地环路，某一路负载用电量的变化不会对其他负载造成影响，减少了电路之间的噪声串扰，但是对于大部分的电路来说，各个负载之间并不完全独立，存在信号的连接，使得这种接地方式的设计较为复杂，各个负载距离总地之间的电阻较大且不同，不同负载处易产生电势差，电路的抗干扰能力较差。

2) 整体铺地指在整个 PCB 电路中利用一整层的铜箔铺地，各个负载就近接地。这种接地的的好处是地电阻较小、电路设计简单、所有电路的地电平统一、抗干扰能力强；不足之处是可能会导致地环路的产生、各个负载的电流回流路径不确定、大电流大功耗大噪声器件易对小电流精密器件的工作造成干扰。

在光抽运小铯钟电路系统的设计过程中，会依据实际情况综合采用两种接地方式来设计。电源和电源地从电源电路而来，进入到系统中，作

为整个原子钟系统的地基准并与外壳相连接,在纯模块电路的大部分区域使用整体铺地的方式,在其它部分区分数字地和模拟地,数字地和模拟地之间若有信号的交互,使用光耦等隔离器件来实现。在精密的模拟电路负载处,使用星型接地。为了防止星型接地处的电路受到外界信号的干扰,在星型接地部分上下加装接地屏蔽壳,将这部分电路包裹其中。电路系统引入的噪声无法直接验证,但在北京大学所研制的光抽运小铯钟电路系统基于上述原则的迭代更新过程中,所得到的频率稳定度最优值逐渐取得新高(从 $3 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$ 逼近 $2 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$),表明了非物理体系所带来的噪声降低了。

3 光抽运小铯钟频率稳定度测试

从2020年至今,北京大学逐步实现了光抽运小铯钟工程样机的定型,设计方案和调试参数逐步固化。整个原子钟为4U标准机箱,质量约为30 kg,峰值用电功率100 W,具有2路5/10 MHz频率信号输出和1路1 PPS信号输出,相位可外同步。经过比对测试,如图4所示,频率稳定度的典型值为 $3 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$,约为5071A优质管频率稳定度的3倍,其中,最新的最优频率稳定度指标可达到 $2 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$ 水平,闭环运行的光抽运小铯钟频率稳定度均超过 $3.8 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$,可称为高性能。

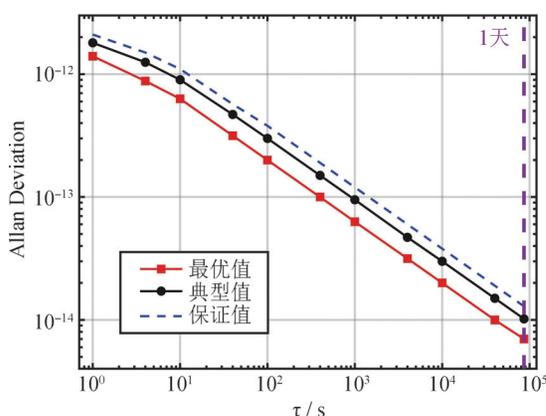


图4 高性能光抽运小铯钟的频率稳定度: 最优值、典型值和保证值

Fig.4 Frequency stability of high performance optically pumped cesium clock: optimal value, typical value and guaranteed value

4 结论

经过了多年的攻关,北京大学所研制的8台光抽运小铯钟在频率稳定度方面实现了突破之后,在工程化研制过程上也取得了进展,频率稳定度均超过5071A优质管,文章总结了光抽运小铯钟研制过程要获得高性能结果需要重点关注的关键因素,为高性能光抽运小铯钟的商品化生产奠定了基础。期望光抽运小铯钟可以在量子精密测量和时频领域做出贡献,为守时授时体系、卫星导航定位系统、高速数字通信系统提供重要的基准仪器。

参考文献

- [1] 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.
WANG Y Q, WANG Q J, FU J S, et al. The principal of quantum frequency standard[M]. Beijing: Science Press, 1986. (in Chinese)
- [2] VANIER J, AUDOIN C. The quantum physics of atomic frequency standards[M]. Bristol and Philadelphia: Adam Hilger, 1989.
- [3] VANIER J, AUDOIN C. The classical caesium beam frequency standard: fifty years later[J]. Metrologia, 2005, 42: 31 - 42.
- [4] LEONARD S C. Fifty years of commercial caesium clocks [J]. 2005, 42: 90 - 99.
- [5] XIE W B, WANG Q, HE X, et al. Frequency instability of a miniature optically pumped cesium-beam atomic frequency standard [J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(7): 074705.
- [6] HE X, FANG S W, YUAN Z C, et al. Compact optically pumped cesium beam atomic clock with a 5-day frequency stability of 7×10^{-15} [J]. Applied Optics, 2021, 34(60): 10761 - 10765.
- [7] HE X, YUAN Z C, CHEN J Y, et al. Improvement of the short-and long-term stability of high performance portable optically pumped cesium beam atomic clock [J]. Frontiers of Physics, 2022, 10: 970030.
- [8] ESSEN L, PARRY J. An atomic standard of frequency and time interval: a caesium resonator [J]. Nature, 1955.
- [9] PICQUÉ J L. Hyperfine optical pumping of a cesium atomic beam, and applications [J]. Metrologia, 1977.
- [10] ARDITI M, PICQUÉ J L. A cesium beam atomic clock us-

- ing laser optical pumping, preliminary tests [J]. Journal of Physique Letters, 1980.
- [11] GURANDELL S, HERMANN V, BARILLET R, et al. Operation of a compact cesium beam tube: how to improve the stability towards the $10^{-12}/\tau^{1/2}$ level [C]. Proceedings of the 2002 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, 2002.
- [12] LUTWAK R, EMMONS D, GARVEY Ret al. Optically Pumped Cesium - Beam Frequency Standard for Gps - III [C]. 33rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, 2001.
- [13] LECOMTE S, HALDIMANN M, RUFFIEUX R, et al. F Development of a single-frequency optically-pumped cesium beam resonator for space applications [C]. Frequency and Time Forum (EFTF), 2006 20 th European. IEEE, 2006.
- [14] LIU C, CHEN S F, CHEN Z Y, et al. Improving the short-term frequency stability of a magnetic-state-selected cesium beam clock with optical detection [J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92: 073302.
- [15] 王骥, 黄良育, 陈江, 等. 磁选态铯原子频率标准技术研制进展 [J]. 时间频率学报, 2022, 45(1): 15 - 25.
WANG J, HUANG L Y, CHEN J, et al. Progress on cesium atomic frequency standard with magnetic state-selection technology [J]. Journal of Time and Frequency, 2022, 45(1): 15 - 25. (in Chinese)
- [16] 赵杏文, 韦强, 李东旭, 等. 激光抽运小型铯原子钟研制进展 [J]. 时间频率学报, 2022, 45 (1): 1 - 8.
ZHAO X W, WEI Q, LI D X, et al. Progress on optically pumped cesium beam frequency standard [J]. Journal of Time and Frequency, 2022, 45(1): 1 - 8. (in Chinese)
- [17] Ramsey N F. A molecular beam resonance method with separated oscillating fields [J]. Physics Review, 1950, 78 (6): 695 - 699.
- [18] SCHMEISSNER R, BANDEL N V, DOUABI A, et al. The optical feedback spatial phase driving perturbations of DFB laser diodes in an optical clock [J]. European Frequency & Time Forum, 2016: 1 - 3.

(本文编辑: 朱俊真)



第一作者: 贺轩 (1995—), 男, 博士, 主要研究方向为原子钟及其技术。



通讯作者: 王青 (1988—), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为原子钟及其技术。



通讯作者: 齐向晖 (1974—), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为原子钟及其技术。