

引用格式: 韦强. 光抽运小铯钟光频移评估与抑制方法研究[J]. 时间频率学报, 2024, 47(2): 73-80.

光抽运小铯钟光频移评估与抑制方法研究

韦强

成都天奥电子股份有限公司, 成都 610036

摘要: 光频移是光抽运小铯钟的主要频移之一。以国产光抽运小铯钟为例, 讨论了光频移的主要来源, 并提出了几种减小光频移的措施, 包括: 提高激光束准直度, 减小镜面反射杂散光; 综合利用原子饱和吸收谱和原子束荧光谱, 校准探测光束和原子束的垂直度; 特殊设计光回收结构和工艺, 有效抑制漫反射杂散光; 设计温度补偿电流方案, 提高光频校正速率; 设计基于液晶相位延迟器的光功率稳定环路, 实现光功率稳定度 Allan 方差 1 s 进入 10^{-5} 量级, 远端在 10^{-4} 量级; 在确保原子高效抽运的情况下, 结合整钟频率准确度变化趋势, 选择合理的探测光功率。将前述减小光频移的措施实际应用于 12 台光抽运小铯钟产品, 实测结果显示: 将拟合误差值纳入评估, 光频移系数 b_{\max} 区间在 $2.04 \times 10^{-13}/\text{mW}$ 到 $4.96 \times 10^{-13}/\text{mW}$ 之间, 按典型光功率值 1.3 mW 估算, 长期稳定度受光频移的实际影响远小于 6.45×10^{-16} , 对于目前批产的小铯钟而言, 这部分频移量的影响是可以忽略的。

关键词: 光抽运-光检测; 商品化; 铯原子钟; 光频移

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2024-02-0073-08

Research on evaluation and suppression methods of light shifts of optically pumped cesium beam frequency standard

WEI Qiang

Chengdu Spaceon Electronics Company Limited, Chengdu 610036, China

Abstract: Light shift is one of the primary frequency shifts of optically pumped cesium atomic clock. This article takes the domestic optically pumped cesium atomic clock as an example to discuss the major sources of its light shifts and propose several measures to reduce the light shifts. Including reducing the mirror reflection of stray light by improving the laser beam collimation; Calibrating the verticality of the detection laser and atomic beam by comprehensively utilizing atomic saturation absorption spectrum and atomic beam fluorescence spectrum; Suppressing diffuse reflection stray light effectively after designing a special light recovery structure and process; Designing a temperature compensation current scheme to improve the optical frequency correction rate; Designing an optical power stabilization loop based on LCVR. The Allan deviation of optical power stability is in the range of 10^{-5} @ 1 s, and long-term stability is in the range of 10^{-4} ; Selecting a reasonable detection laser power of the clock after considering atomic pumping efficiency and the trend of frequency

收稿日期: 2023-08-21; 接受日期: 2023-10-30

基金项目: 国家重大科学仪器开发专项 (2012YQ200183)

accuracy. The aforementioned measures to reduce light shifts are applied to 12 optically pumped cesium clock products. The results show that the light shifts coefficient b_{\max} is between $2.04 \times 10^{-13} / \text{mW}$ to $4.96 \times 10^{-13} / \text{mW}$, include error profit value. The long-term stability affected by the light shifts is less than 6.45×10^{-16} . For the currently produced cesium clock, the effect of this frequency shift is negligible.

Key words: optical pumping-optical detection; commercialization; cesium atomic clock; light shift

铯原子钟作为一级频率标准, 以其优越的准确度和长期稳定度性能, 被广泛应用于标准时间产生和保持、导航定位与精确打击、电子对抗、保密通信、智能电网、计量测试等军民领域^[1-2]。相较于利用强磁场对铯原子进行选态的技术原理, 光抽运-光检测原理具备原子利用率更高, 没有 Majorana 效应等优势^[3-4]。并且对铯束管制作的工艺要求更简单, 没有复杂的束光学系统, 更易批量生产。这种技术原理实现的小铯钟可大幅提升铯原子钟的稳定度和寿命。

但是, 光抽运-光检测原理也存在一个十分明显的缺陷, 由于在量子物理系统中引入了激光, 当激光与原子相互作用产生的荧光, 激光本身的散射, 或通过光窗馈入的杂散光进入到原子与微波的相互作用区后, 会形成 AC Stark 效应导致频移, 这种频移也被称之为光频移。目前, 已知的报道中, 光频移的影响主要产生于探测光^[5], 能到 10^{-12} 量级, 光频移的存在制约着光抽运-光检测小铯钟 (以下简称光抽运小铯钟) 频率准确度和稳定度的提升。

光抽运小铯钟光频移广义上主要包括两部分: 一部分是激光频率波动带来的光频移, 一部分是光功率波动带来的频移。光功率波动影响占比最大, 一般将所有不考虑激光频率波动因素带来的频移, 均归为光功率频移, 将这部分频移称为光频移^[6]。

狭义上的光频移包含两部分: 一部分是通过铯束管探测区光窗, 和探测激光同时进入到铯束管的杂散光或激光的散射光, 经过荧光搜集器四周无规则反射后进入微波共振区, 产生频移; 另一部分是激光和铯束相互作用产生的荧光, 经过反射后通过铯束孔进入到微波腔, 产生频移。实验室型的光抽运铯钟体积一般较大, 这样探测区

到微波共振区距离就较远, 可以忽略光频移^[7-8]。但是, 在商品化的小铯钟中, 由于铯钟体积变小, 铯束管探测区和微波共振区距离随之缩短, 光频移系数对铯钟准确度的影响就变得尤为重要。理论上, 要将光频移系数精确估算是无法做到的^[5-6, 9]。但是, 我们可以通过多种方式, 来减小光频移的影响。

本文介绍了目前已商品化的 TA1000 系列光抽运小铯钟, 通过产线生产工艺量化把控、机械结构设计、以及光功率稳定和优化选择等方式, 减小光频移系数。同时, 通过批量测试, 统计分析了目前已实现批产的国产商品化 TA1000 系列光抽运小铯钟光频移影响程度。

1 光频移产生区

国产 TA1000 系列小铯钟采用激光进行原子态制备, 并采用激光进行跃迁原子检测。光频移来自于光抽运小铯钟的量子物理系统, 分为激光系统和铯束管, 如图 1 所示。激光与铯原子束的相互作用存在两个区域: 抽运光作用区和探测光作用区。

抽运光作用区: 铯原子在铯炉中加热后, 经准直器喷出, 形成铯原子束, 铯原子束在经过抽运区时, 与频率锁定在 $F = 4 \rightarrow F' = 4$ 的波长为 852.1 nm 的抽运激光进行相互作用 (铯原子 D_2 线能级图如图 2 所示)。在与抽运激光相互作用过程中, 原子受激跃迁到激发态并通过自发辐射回到基态。由于原子可按一定几率分别回到基态 $F = 3$ 和 $F = 4$ 能级上, 而返回基态 $F = 4$ 能级的原子又会被抽运到激发态 $F' = 4$ 上。因此经过一段时间的激发作用, 原子将全部被抽运到基态 $F = 3$ 能级, 从而实现原子态的制备。

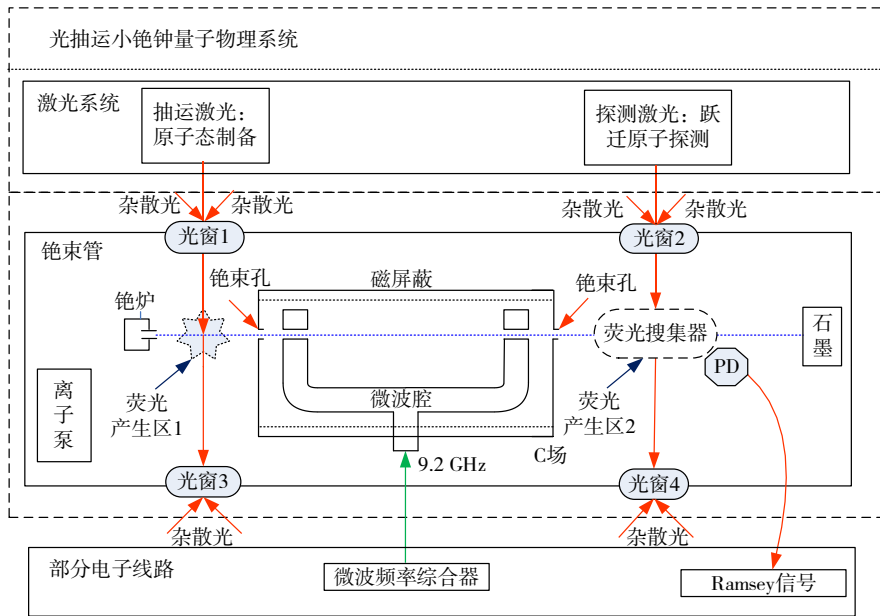


图 1 TA1000 系列光抽运小铯钟量子物理系统

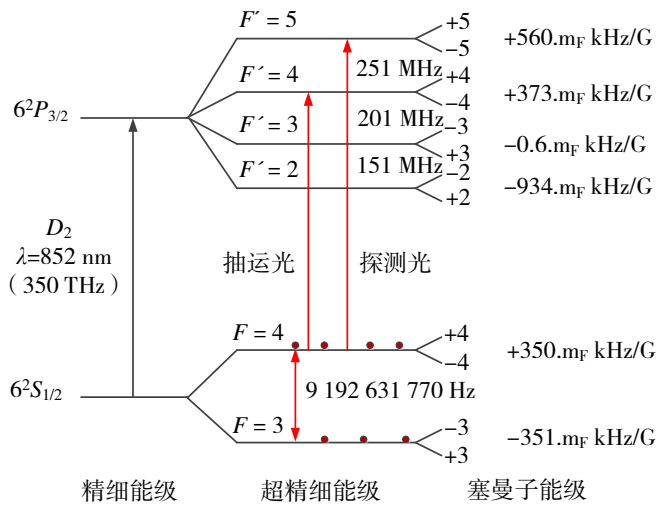


图 2 铯原子 D₂ 线能级示意图

探测光作用区：完成原子态制备后，全部原子进入微波腔，与 9.2 GHz 的微波进行相互作用。原子共振跃迁出微波腔后进入检测区，与另一束频率锁定在 $F = 4 \rightarrow F' = 5$ 的激光相互作用。该光只激发产生了跃迁的原子，原子发射荧光，经荧光收集器收集后由光电探测器输出。

两个激光作用区均会产生荧光，并且由于光窗存在，会进入部分杂散光，激光打到光窗端面后，也会造成少量散射激光，这 3 部分光综合到一起，

其中一部分通过铯束孔进入到了微波作用区，形成 AC Stark 频移，称光频移，这也是光频移的主要组成部分。在实际工程化生产应用中，激光的准直程度，以及激光同铯束所成夹角情况，同样会产生光频移，这部分频移系数是由生产过程造成的，也是不可避免的，同样是制约光抽运小铯钟性能提升的一个重要因素。由于光频移的影响主要产生于探测光^[5-6]，所以，在 TA1000 系列光抽运小铯钟生产调试过程中，我们主要针对探测光实施减小光频移措施。

2 减小光频移的措施

本章从影响机理出发,针对影响 TA1000 系列光抽运小铯钟的光频移因素,进行相应处理措施介绍。

2.1 调试设计

2.1.1 影响机理

在光抽运小铯钟开展工程化生产过程中,量子物理部分不可避免的要经过操作人员来进行调试。在调试和生产过程中,最主要的是以下 4 个方面会引入光频移。

① 激光准直调试。我们选用的激光器为 Eagleyard 的 DFB (distributed feedback laser) 激光器^[10],激光输出横轴典型值发散 8° ,纵向发散 21° 。在对激光准直调试时,由于激光器本身发散角的

一致性和准直镜的一致性,极易造成准直不理想,导致在图 1 中的光窗 4 内表面及荧光搜集区,形成杂散光,馈入微波腔,造成光频移。

② 在光窗 4 出射面输出的激光,会打到整机前端的金属结构件上,形成漫反射,反馈回铯束管,不仅会造成荧光本底上升,影响量子物理系统信噪比,同时也会反馈进入微波腔,造成光频移。

③ 生产调试过程中,探测光和铯束不垂直(见图 3),不仅会造成类似 ① 带来的光频移,同时由于探测光和铯束不垂直,也会造成多普勒频移,直接影响抽运效率,稳定度指标变差。

④ 光窗 2 和光窗 4 在铯束管光窗部分,外部其他杂散光的馈入,造成光频移。

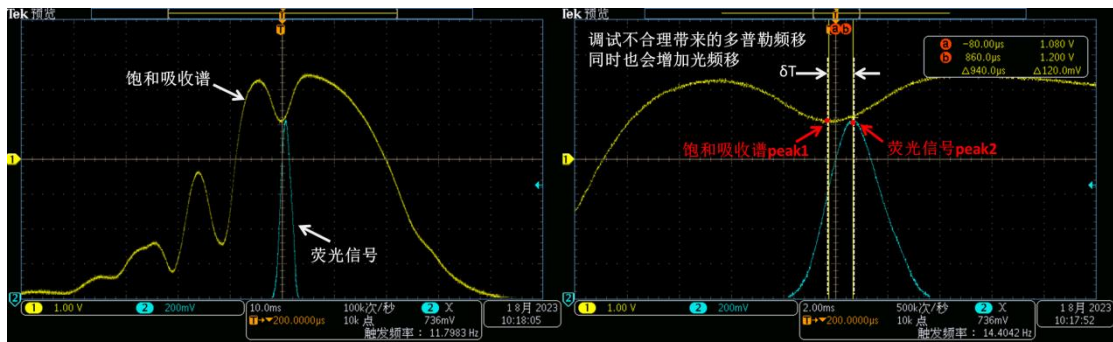


图 3 探测光和铯束不垂直造成光频移同时产生多普勒频移

2.1.2 处理措施

以上 4 种造成光频移的机理,是无法在实际光抽运小铯钟批产过程中加以严格区分测试的,只能尽可能地规范生产工艺,量化生产参数,优化结构设计等方式进行规避。

① 量化激光准直调试工艺参数

批产的光抽运小铯钟从激光器发出激光行径到图 1 中的光窗 4 时,整个光程约 600 mm。在激光准直过程中,我们设定准直发散角评估方法,在激光器准直调试完成后,分别在 1 m 和 3 m 的位置,测试光斑直径大小,若:

$$|\Phi_m(d_1) - \Phi_m(d_2)| \leq 3.0 \text{ mm} \quad (1)$$

则评判准直达标。其中 $\Phi_m(d_1)$ 代表 1 m 处光斑直径, $\Phi_m(d_2)$ 代表 3 m 处光斑直径。两个距离设定按照激光准直发散 $\leq 1^\circ$ 来进行设定评估,通过量

化准直参数,可以有效减小调试准直时,由于操作问题引入的光频移。

② 量化量子物理系统调试参数

调试探测光时,不可能将探测激光和铯原子束调试到完美的垂直。但我们在批量生产和调试过程中,发现可以根据量子物理信号特征,反向设置工艺参数,确保调试的垂直性。

我们使用 $\geq 350 \text{ MHz}$ 以上带宽的示波器,在调试完成荧光信号后,将饱和吸收峰和荧光信号峰尖利用时间轴标注对比频差(见图 3),若:

$$\delta T_{\text{peak1-peak2}} \leq 100 \mu\text{s} \Leftrightarrow \delta \nu_{\text{peak1-peak2}} \leq 10 \text{ kHz} \quad (2)$$

式(2)中, $\delta T_{\text{peak1-peak2}}$ 为饱和吸收峰峰尖和荧光信号峰尖时间轴标注出的时差, $\delta \nu_{\text{peak1-peak2}}$ 为对应的频差。若测试时差在 $100 \mu\text{s}$ 以内,即频差在 10 kHz 范围内,则评判激光和铯束垂直性良好,可以有效

降低由于激光和铯原子束不垂直带来的光频移和多普勒频移。

③ 优化结构设计

由于光抽运铯束管存在光窗4,虽然窗口镜镀了增透膜,但是不可避免的存在激光的出射镜内侧,部分激光成为散射光,反射回铯束管;另外,透射出的激光前方为金属结构,极易造成漫反射,沿原光路返回部分激光,不仅造成光频移,且会进入荧光收集器后形成探测本底,影响 Ramsey 信号信噪比。

针对此部分影响因素,采用结构设计的方式来降低光频移的影响。在光窗4处,设计如图4结构。

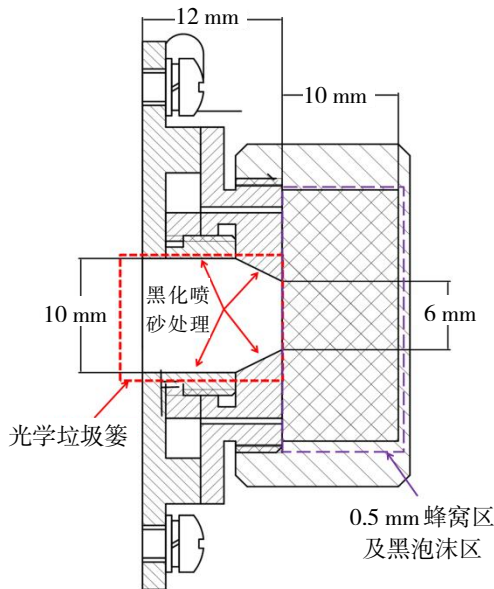


图4 出射探测光处理结构

探测光光斑直径在8 mm左右,采用6 mm/10 mm的光学垃圾篓,内表面喷砂,并在远端设计0.5 mm间距的蜂窝区,填塞黑色泡沫。此结构可以极大地提升出射探测光的处理效果,将探测本底减小到100 mV以下,能大幅度减少光频移。

2.2 光功率稳定与选择

2.2.1 影响机理

2.1.2节介绍了通过量化调试参数,优化结构设计的方式,对TA1000光抽运小铯钟的光频移进行了处理。这样的处理主要解决的是外界杂散光以及探测区出射激光带来的光频移影响。激光和铯原子束作用产生的荧光带来的光频移影响,通过2.1.2节的处理方式是不能够得到有效改善的。

北京大学在2018年报导了关于磁选态-光检测原理小铯钟的光频移系数,测量的光频移系数为 $2 \times 10^{-12}/\text{mW}$,其中探测光的大小为5 mW,频率准确度的贡献为 1×10^{-11} 。对于自由运转的光束,十万秒的光功率稳定度为 4.5×10^{-3} ,所以光功率抖动对原子钟频率稳定度的贡献为 4.5×10^{-14} ,严重限制了铯钟的长期频率稳定度情况。北京大学团队通过使用光功率稳定技术之后,十万秒处的光功率稳定度达到 3×10^{-6} ,对铯钟频率稳定度的贡献为 3×10^{-17} 的水平,在对铯钟的长期频率稳定度的贡献上可以忽略不计^[5],所以光功率的稳定是光抽运小铯钟不可或缺的需求。

同时,激光光程上的杂散光,直接和激光光功率成正比,所以在光抽运小铯钟里,光强越小,光频移量就越小。故在TA1000光抽运小铯钟工程化过程中,需选择合适的光强,即可以满足原子态的制备和检测,又可以尽量减小光频移。

2.2.2 处理措施

1) 温度补偿电流减小光功率波动

目前,商品化的TA1000光抽运小铯钟采用温度补偿的方式进行激光功率和频率的稳定,主要设计思路来源于所使用的DFB激光器的技术手册^[10]。这款激光器的温调率是0.06 nm/K,电调率是0.003 nm/mA,即温度变化1 mK所引起的波长变化是电流变化1 μA 引起波长变化的20倍,功率恰恰相反。所以少量的温度调整就可以完成原本大量补偿电流所达到的频率校正工作。由于物理系统温控是有一个响应过程的,响应速率低于电流补偿,不能完全只依靠温度补偿,所以在整机工作过程中,仍然需要利用电流来进行稳频。但对补偿电流设置一定的门限,当电流变化大于此门限的时候,开启温度补偿,通过改变温度把电流的变化弥补回来,即“温度补偿电流”。这种方案既兼顾激光频率的校正速率,使得激光能保持锁定,确保频率的波动特性,同时也兼顾减少激光输出的光功率波动,进而减少整机后端引入的误差,减少光功率波动带来的光频移,提升了整机长期稳定度。

2) 液晶相位延迟器光功率稳定

液晶相位延迟器是利用液晶的电控双折射特

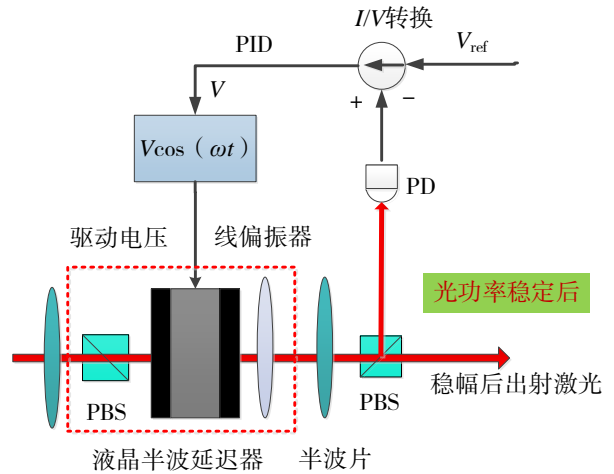
性制作的，可对光的偏振进行调制，通过对液晶两侧施加电压改变其内部分子的排列顺序，进而使液晶层的光学性质发生变化，致使液晶的相位延迟量发生变化。因此线偏振光的相位差可通过改变所加电压进行主动控制。北京航空航天大学是国内最早开始利用液晶延迟器的特性进行光功率稳定的^[11]。液晶半波延迟器（LCVR）的延迟量与交流驱动电压的大小有关。我们采用美国Thorlabs公司的LCC111-B液晶半波延迟器进行功率稳定模块的研制开发。具体光功率稳定光路图如图5所示，其中PBS（polarization beam splitter）的透射光为水平偏振光，线偏振片的偏振方向为垂直方向，液晶半波延迟器的快轴与水平面呈45°。其中PBS、LCVR和线偏振片构成了光功率执行器件，LCVR的驱动电压的不同，透射光的大小也不一样，图6测量了不同驱动频率下，透射光的强度随着驱动的有效值的变化。可以看出液晶延迟器的半波延迟电压为0.6 V_{rms}的时候，透射光功率最大；交流驱动电压的频率对透射曲线的影响不大。

我们将基于LCVR的光功率稳定技术的控制电路和光路部分进行了集成设计，安装在光路中，相较于基于AOM、EOM的稳功率方案，该方案能极大的节约空间，也能节约整机功耗，并且环境适应性高。三者优缺点比较见表1。

表 1 光功率稳定方案优缺点对比

序号	AOM 方案	EOM 方案	LCVR 方案
1	体积大	体积大	体积小，易集成
2	驱动功率大	驱动功率大	驱动功率小
3	响应适中	响应快	响应慢
4	控制电路复杂	控制电路复杂	控制电路简单
5	环路功率需求大	环路功率需求大	环路功率需求小
6	环路带宽易受光学器件影响	环路带宽易受电学器件影响	环路带宽稳定
7	易受温度影响	环境适应性较好	环境适应性较好

光功率稳定效果如图7所示，环路外功率的Allan方差已进入 1×10^{-5} 量级，远端能保证在 1×10^{-3} 量级以内。若光频移系数为 10^{-12} 量级，那么加上光功率稳定技术后，10万秒以上的频率稳定度光频移带来的影响可以减小到 10^{-15} 量级，基本可以



注：PID为比例、微分、积分控制系统，PBS为偏振分光棱镜

图 5 光功率稳定模块

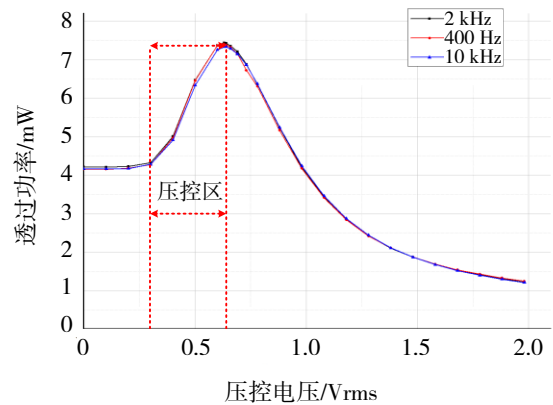


图 6 LCVR压控电压和透过率测试结果

忽略。

3) 光功率选择

因为激光功率越大，光频移越大，抽运检测效率越高。所以既要保证高的抽运检测效率，又要尽量减小光频移，两者是不可兼得的。鉴于这个现状，

在整机调试完成后，不加 LCVR 光功率稳定模块，对探测光功率进行梯度规划，进行最优光功率选择工艺流程实施。

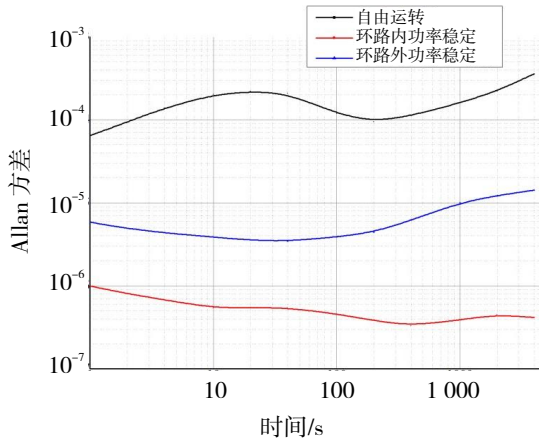


图 7 基于液晶半波延迟器的光功率稳定效果

我们设置探测光功率 0.9, 1.1, 1.3, 1.5, 1.7 和 1.9 mW 6 个光功率梯度，每个光功率改变后，测试 12 h，取最后 6 h 计算不同光功率下的整机频率准确度

$\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)_i$ ，其中 i 为 6 个不同的光功率。得出相邻两个相差 0.2 mW 光功率的 5 个准确度变化量：

$$\left(\delta\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)_{0.2\text{mW}}\right)_j = \left|\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)_i - \left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)_{i+0.2\text{mW}}\right| \quad (3)$$

式 (3) 中 $j=1,2,3,4,5$ ，通过上式算出 5 个准确度变化量后，选出 $\left(\delta\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)_{0.2\text{mW}}\right)_j$ 的最小值所对应的

两个光功率 P_{j1} 和 P_{j2} ，再比较 $\left(\delta\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)_{0.2\text{mW}}\right)_{j+1}$ 和

$\left(\delta\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)_{0.2\text{mW}}\right)_{j-1}$ 的大小，小值端的光功率为我们

最终设置进整机的光功率，这个光功率可以有效地减小光频移系数。

3 国产商品化光抽运-光检测小铯钟光频移系数统计分析

通过以上减小光频移系数的措施，在光功率选择的生产工艺流程中，我们可以得出各台钟在不同光功率条件下，频率准确度的变化情况，通过曲线拟合，可得出在不加 LCVR 前的光频移系数。

我们选取 12 台装配完成后进入优化流程未经校准的整机，将在激光功率优化选择过程中的测试结果进行线性拟合，拟合曲线见图 8，对应的拟合参数见表 2。

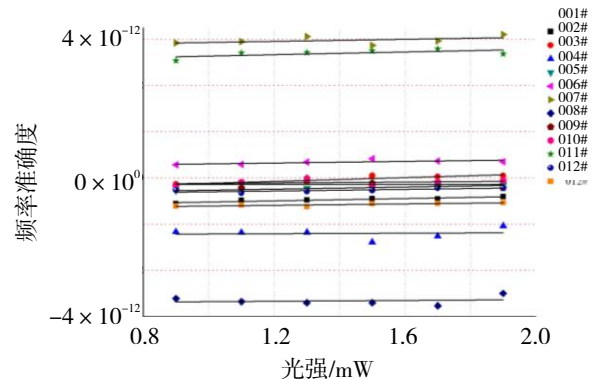


图 8 光频移系数线性拟合

表 2 光频移系数拟合参数

线性拟合 $y = a + b \times x$	拟合值		误差		$b_{\max} = b_{\text{value}} + b_{\text{error}}/(mW)$
	a	$b/(mW)$	a	$b/(mW)$	
001#	-1.29×10^{-12}	2.53×10^{-13}	7.39×10^{-14}	5.13×10^{-14}	3.04×10^{-13}
002#	-6.39×10^{-13}	4.11×10^{-13}	1.22×10^{-13}	8.50×10^{-14}	4.96×10^{-13}
003#	-2.48×10^{-12}	5.58×10^{-14}	4.48×10^{-13}	3.11×10^{-13}	3.67×10^{-13}
004#	-7.52×10^{-13}	2.28×10^{-13}	3.82×10^{-14}	2.65×10^{-14}	2.55×10^{-13}
005#	4.34×10^{-13}	1.79×10^{-13}	1.36×10^{-13}	9.43×10^{-14}	2.73×10^{-13}
006#	5.64×10^{-12}	2.25×10^{-13}	2.98×10^{-13}	2.07×10^{-13}	4.32×10^{-13}
007#	-5.44×10^{-12}	8.71×10^{-14}	3.55×10^{-13}	2.46×10^{-13}	3.33×10^{-13}
008#	-2.80×10^{-13}	2.22×10^{-15}	3.09×10^{-13}	2.14×10^{-13}	2.16×10^{-13}
009#	-3.28×10^{-13}	9.69×10^{-14}	2.20×10^{-13}	1.53×10^{-13}	2.50×10^{-13}
010#	4.99×10^{-12}	2.91×10^{-13}	2.65×10^{-13}	1.84×10^{-13}	4.75×10^{-13}
011#	-7.67×10^{-13}	1.74×10^{-13}	1.11×10^{-13}	7.72×10^{-14}	2.51×10^{-13}
012#	-1.36×10^{-12}	1.52×10^{-13}	7.49×10^{-14}	5.20×10^{-14}	2.04×10^{-13}

从表 2 中可以看出,通过上述减小光频移的处理措施,在未加光功率稳定模块的情况下,12 台光抽运小铯钟的光频移系数区间在 $2.22 \times 10^{-15} \sim 4.11 \times 10^{-13}/\text{mW}$ 之间。为评估更准确,我们将计算的误差项纳入评估,取光频移系数最大值 $b_{\max} = b_{\text{value}} + b_{\text{error}}$,可得出 b_{\max} 区间在 $2.04 \times 10^{-13} \sim 4.96 \times 10^{-13}/\text{mW}$ 之间。最优光功率的选择经验值一般都在 $1 \sim 1.5 \text{ mW}$ 之间,典型值为 1.3 mW 。按照此系数估算,加入 LCVR 光功率稳定模块后,10 万秒光功率稳定度按 1×10^{-3} 量级进行估算,光抽运小铯钟长期稳定度受光频移的实际影响是远小于 6.45×10^{-16} 的,对于高性能光抽运小铯钟 10 万秒 2.7×10^{-14} 的频率稳定度来看,这部分频移对稳定度的影响是可以忽略的。

4 结语

本文介绍了如下国产商品化光抽运小铯钟内部减小光频移的措施。

① 量化激光准直调试工艺参数:限定激光调试发散角必须 $\leq 1^\circ$,1 m 光程处和 3 m 光程处光斑直径差值限定在 3 mm 以内。

② 量化量子物理系统调试参数:将饱和吸收峰峰尖和荧光信号峰尖调试允许最大时差设定为 $100 \mu\text{s}$,即最大允许频差 10 kHz 。

③ 优化探测光出光口结构设计:采用 $6 \text{ mm}/10 \text{ mm}$ 的光学垃圾篓,内表面喷砂,并在远端设计 0.5 mm 间距的蜂窝区,填塞黑色泡沫。

④ 根据激光器参数特点,设计温度补偿电流软件方案,减小光功率波动。

⑤ 采用液晶相位延迟器方案,设计光功率稳定组件,光功率稳定结果环外 Allan 方差能进入 10^{-5} 量级,远端能保证在 1×10^{-3} 量级以内。

⑥ 设计光功率选择生产工艺流程,选择最优光功率输入整机。

通过以上 6 个措施,我们通过改变光功率大小,对商品化的国产光抽运小铯钟进行光频移系数测试,测试结果显示:将光功率系数拟合误差值纳入评估,12 台光抽运小铯钟的光频移系数 b_{\max} 区间在 $2.04 \times 10^{-13} \sim 4.96 \times 10^{-13}/\text{mW}$ 之间。按最优光功率经验值中的典型值 1.3 mW ,远端光功率稳定度 $< 1 \times 10^{-3}$ 量级代入进行估算,光抽运小铯钟

长期稳定度受光频移的实际影响远小于 6.45×10^{-16} ,对于光抽运小铯钟长期稳定度 10^{-14} 量级来看,这部分频移影响是可以忽略的。

参考文献:

- [1] 王义道,王吉庆,傅济时,等.量子频标原理[M].北京:科学出版社,1986.
- [2] 胡安平.路基超远程无线电导航发展研究[J].导航定位与授时,2018,5(5):1-6.
- [3] CUTLER L S. Fifty years of commercial caesium clocks[J]. Metrologia, 2005, 42: S90-S99.
- [4] 曹远洪.光抽运小铯钟及其在 PNT 应用[J].导航定位与授时,2018,5(4):83-88.
- [5] XU S H, CHEN S F, LIU C, et al. Optimization of frequency shifts in optically detected magnetic-state-selection cesium beam atomic clocks[J]. Europhysics Letters, 2021(136): 1-5.
- [6] CHEN Z Y, LIU C, WANG S H, et al. A method on laser power stabilization in optical detection cesium atomic clock[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer, 2018(497): 607-614.
- [7] SHIRLEY J H, LEE W D, DRULLINGER R E. Accuracy evaluation of the primary frequency standard NIST-4[J]. Metrologia, 200(138): 427-458.
- [8] BRILLET A. Evaluation of the light shifts in an optically pumped cesium beam frequency standard[J]. Metrologia, 1981(174): 147-150.
- [9] SHI H, MA J, LI X, et al. Realization of single optical frequency laser system for optically pumped cesium beam frequency standards[J]. Optical Quantum Electronics, 2017, 49(400): 1-11.
- [10] EagleYard. EYP-DFB-0852-00150-1500-TOC03-0005 DATA SHEET[K]. Berlin-Adlershof: Eagleyard, 2018.
- [11] LIANG Q, CHEN L L, GUAN Q, et al. Laser intensity stabilization with a liquid crystal variable retarder for a nuclear magnetic resonance gyroscope prototype[C] // Proceedings of SPIE (Optical Test Measurement and Equipment), 2015.