

引用格式：许冠军, 焦东东, 张林波, 等. 1 550 nm 可搬运超稳激光工程化研制[J]. 时间频率学报, 2021, 44(4): 244-254.

1 550 nm 可搬运超稳激光工程化研制

许冠军^{1,2}, 焦东东^{1,2}, 张林波^{1,2}, 高静^{1,2}, 刘军^{1,2}, 范乐^{1,2},
陈龙^{1,2}, 董瑞芳^{1,2}, 刘涛^{1,2}, 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 时间频率基准重点实验室, 西安 710600)

摘要: 为了满足高精度地基授时系统项目的需求, 本文对 1 550 nm 可搬运超稳激光系统进行了工程化研究。对 5 cm 长的光学参考腔进行了振动敏感度优化, 最终其优于 $1 \times 10^{-11}/g$ 。完成了光学参考腔的自研, 测得其精细度为 78 000。对光学、真空系统以及电子学系统进行了集成化设计, 整机总体积约为 $360 \text{ mm} \times 380 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 总质量约为 20 kg。通过拍频比对, 其线宽约为 1.41 Hz, 频率稳定度小于 1×10^{-14} @ 1 s。从实验测量结果可以看出, 该超稳激光基本满足了地基授时项目工程化要求, 同时也为国内可搬运超稳激光器的研究奠定了基础。

关键词: 超稳激光; 光学参考腔; 可搬运; 频率稳定度

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2021-04-0244-11

Engineering development of 1 550 nm transportable ultra-stable laser

XU Guan-jun^{1,2}, JIAO Dong-dong^{1,2}, ZHANG Lin-bo^{1,2}, GAO Jing^{1,2}, LIU Jun^{1,2}, FAN Le^{1,2},
CHEN Long^{1,2}, DONG Rui-fang^{1,2}, LIU Tao^{1,2}, 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)

Abstract: In order to meet the needs of the High-precision Ground-based Time Service System, the engineering research of a 1 550 nm transportable ultra-stable laser was carried out in this paper. The vibration sensitivity of the 5 cm long optical reference cavity was optimized, which is better than $1 \times 10^{-11}/g$. The finesse of the optical reference cavity is 78 000. The integrated designs of the optical and vacuum systems were carried out. The total volume of the whole system is about $360 \text{ mm} \times 380 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, and the total mass is about 20 kg. The linewidth of this ultra-stable laser is about 1.41 Hz, and its frequency instability is less than 1×10^{-14} at 1 s. From the experimental results, it can be seen that the ultra-stable laser basically meets the engineering requirements of the ground-based time service, and it will lay a foundation for the research of the transportable ultra-stable laser in China.

Key words: ultra-stable laser; optical reference cavity; transportable; frequency stability

0 引言

由于超稳激光具有极低的频率噪声、较窄的线宽及超高的频率稳定度，因此使其在光学原子钟^[1-3]、引力波探测^[4-5]、低噪声微波信号产生^[6-8]以及高精度时间频率传递^[9]等领域具有着重要作用。为了获得激光线宽更窄的高性能激光器，目前较为常用的手段是利用主动伺服反馈的控制方式将激光器输出的频率锁定到光学长度很稳定的光学参考腔共振频率上，即 PDH (Pound-Drever-Hall) 激光稳频技术^[9-14]。由于 PDH 激光稳频技术具有伺服响应速度快、鉴频特性好以及信噪比高等优点，因此在激光稳频领域被广泛应用。

PDH 激光稳频技术的原理是将激光器输出的频率锁定在长度极其稳定、精细度和耦合效率都较高的光学参考腔上，以获取信噪比和斜率都较高的误差信号。光学参考腔作为超稳激光器的频率参考源，它的光学长度稳定性是决定超稳激光器性能的关键因素。通常采用热膨胀系数较低的材料作为光学参考腔腔体，以减小外界温度变化对光学参考腔腔长的影响，并将其放置于隔热、隔音的真空腔系统中。通过优化光学参考腔的支撑结构寻找出其最佳不敏感度位置，再利用主动隔振台以减小外界机械振动对光学参考腔长度变化的影响。高精细度和高耦合效率是为了减小超稳激光系统中不必要的频率漂移，使伺服系统能够稳定地锁定在鉴频信号的零点处。

目前，随着光学元器件以及激光稳频技术的不断发展及提高，大多用于实验室工作的超稳激光性能接近热噪声极限，基本满足目前的大多数应用场景。因此，对于超稳激光器的进一步发展出现了两种不同的道路^[9-16]。一条是进一步研究解决限制超稳激光的噪声，获得更高稳定度的超稳激光；另一条是对超稳激光进行工程化，以便能够更广泛地应用于非实验室环境。

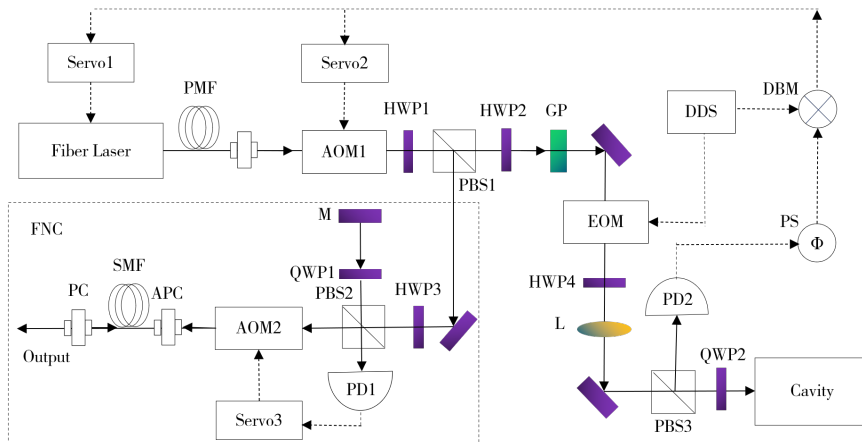
针对超稳激光工程化，国内外多个研究小组针对可搬运光学参考腔的支撑结构进行了不同的设计。2009 年，美国国家标准技术研究院 (NIST) 小组设计了一种直径为 5 cm 的球形腔光学参考腔，采用两点支撑，且支撑点的位置与通光孔的角度为 37° ，三个方向的振动敏感度分别为 $4.0 \times 10^{-11}/g$ 、 $1.6 \times 10^{-11}/g$ 、 $3.1 \times 10^{-11}/g$ 。虽然光学参考腔的振动敏感度较低，但是设计结构承受的振动强度较低，不适合振动强度较大的运输条件。通过实验测量，获得激光器的频率稳定度为 $1.2 \times 10^{-15} @ 1 \text{ s}^{[10]}$ 。2011 年，美国国家航空航天局 (NASA) 提出了一种基于梭形的光学参考腔，3 个支撑点均匀地分布在中间位置突出的圆盘上。该光学参考腔安装调试较为简单，但对光学参考腔位置的垂直度要求较高。利用该光学参考腔获得的超稳激光频率噪声谱小于 $40 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}} @ 0.01-10 \text{ Hz}^{[11]}$ 。2011 年，英国皇家物理实验室 (NPL) 小组提出了一种边长为 5 cm 的立方光学参考腔，该光学参考腔的 4 个支撑点刚好为一个正四面体的四个顶点，振动敏感度小于 $2.5 \times 10^{-11}/g^{[12]}$ 。2012 年，法国巴黎天文台 (SYRTE) 小组设计了一种竖直放置、长度为 10 cm 的圆柱形光学参考腔，该光学参考腔与 NASA 的腔设计结构类似，3 个固定点均匀分布在参考腔围脖上，其振动敏感度小于 $1 \times 10^{-10}/g$ 。虽然该光学参考腔振动敏感度较高，但是安装调试较为方便，且可承受振动强度较大的运输条件^[13]。2014 年，德国物理技术研究院 (PTB) 小组设计了一种长为 10 cm、直径为 6 cm 类似圆柱的光学参考腔，其光轴及另外两个水平方向的振动敏感度分别为 $1.7 \times 10^{-11}/g$ 、 $8.0 \times 10^{-11}/g$ 、 $3.9 \times 10^{-10}/g$ 。虽然该光学参考腔振动敏感度较低，可承受振动强度较大的运输条件，但是安装调试较为复杂。利用该光学参考腔锁定的超稳激光器频率稳定度为 $1 \times 10^{-15} @ 1 \text{ s}^{[14]}$ 。2017 年，中国科学院国家授时中心 (NTSC) 设计了一种基于笼式结构固定的球形 DLE 光学参考腔，该光学参考腔的直径为 8 cm，两个固定点的方向与光轴的夹角为 37° ，振动敏感度小于 $1 \times 10^{-11}/g$ 。同样，虽然该光学参考腔的振动敏感度较低，但是设计结构较为复杂，且承受的振动强度较低。利用该光学参考腔实现了线宽为 1.8 Hz 的 698 nm 超稳激光，频率稳定度为 $2.8 \times 10^{-15} @ 1 \text{ s}^{[15]}$ 。

目前，光学原子钟的精度及频率稳定度可达 10^{-19} 量级，作为最高精度的物理量，其对精密测量研

究与应用、科学技术和工程应用的发展具有重要推动作用。为了将如此高精度的光学频率信号能够传递给各个用户，光纤光学频率传递是目前唯一能够对光钟信号进行远距离（千 km 级）传输的手段。在光纤光学频率传递系统中，为了保证传输的稳定度，则要求频率稳定度较高的激光作为传递光源，目前商用的通信波段激光器线宽最小为百 Hz 量级，无法满足高稳定度长距离的光纤光学频率传递要求，因此，需要研制具有超高稳定度的通信波段超稳激光器作为传递光源。同时，中科院国家授时中心承担着我国十三五高精度地基授时系统项目，根据项目中光纤光学频率传递系统的需求，因此开展了激光线宽优于 10 Hz、频率稳定度优于 $5 \times 10^{-14}/s$ 的通信波段超稳激光器的工程化研究。

1 PDH 稳频基本原理与装置

超稳激光器系统的原理和装置如图 1 所示。激光器（NKT E15）输出约功率 20 mW 的光经保偏光纤（PMF）后，通过光纤准直镜后成为自由空间光，利用声光调制器 1（AOM1，50 MHz）对激光器的输出光进行频移，同时 AOM1 被用作快速频率伺服的执行器来稳定激光频率。AOM1 输出的一阶衍射激光经过半波片 1（HWP1）和偏振分束器 1（PBS1）分为两束。一束输入到光纤噪声消除（FNC）系统^[16]用于激光拍频比对，另一束光经过 HWP2 和消光比约为 50 dB 的 Glan 棱镜（GP），其中 Glan 棱镜位于一个可旋转的装置上。通过格兰棱镜来调整激光光束的偏振方向与电光调制器（EOM）晶体的主轴相匹配，以减小 EOM 带来的剩余振幅调制噪声，系统中利用输出频率约 20 MHz 信号源驱动电光调制器对经过的激光进行相位调制。经过电光调制的激光经过后，利用 HWP4 和 PBS3 对进入光学参考腔（Cavity）的光功率进行调节。透镜（L）用于调整进入光学参考腔激光束的大小以匹配光腔的模式。腔镜表面反射的激光和腔内的透射光经过 1/4 波片 2（QWP2）和 PBS3 后进入到光电探测器 2（PD2），其中 PBS3 也被用于防止腔镜的反射光沿原路径返回。光电探测器 PD2 用于解调激光载波和调制边带之间的射频信号，该射频信号通过移相器（PS）与 EOM 驱动信号源的输出信号通过双平衡混频器（DBM）混频，获得超稳激光器系统的误差信号。再将误差信号反馈给伺服控制器 1（Servo1）和伺服控制器 2（Servo2），其中 Servo1 控制激光器压电换能器（PZT）的电压对激光器的频率进行慢速控制，Servo2 来调节 AOM1 的驱动频率对激光的频率进行快速控制，从而将激光器的输出频率锁定在光学参考腔上。



注：HWP1、HWP2 和 HWP3 为二分之一波片；QWP1 和 QWP2 为四分之一波片；APC/PC 为光纤适配器；PMF 为保偏光纤；GP 为格兰泰勒棱镜；EOM 为电光调制器；AOM1 和 AOM2 为声光调制器；PBS1、PBS2 和 PBS3 为偏振分光棱镜；L 为透镜；DDS 为直接数字频率合成器；PD1 和 PD2 为光电探测器；Servo1、Servo2 和 Servo3 为比例积分控制器；SMF 为单模光纤；PS 为相位延迟器；Cavity 为光学参考腔；DBM 为双平衡混频器；FNC 为光纤噪声抑制系统

图 1 超稳激光实验装置原理图

2 光学参考腔的设计与研制

2.1 光学参考腔设计

光学参考腔作为超稳激光器的核心器件，为了满足超稳激光器的可搬运要求，首先对于能够满足可搬运条件的光学参考腔结构进行了设计，其具体结构如图 2 所示。光学参考腔的长度为 50 mm，直径为 50 mm，腔体及腔镜基底材料均为低膨胀系数玻璃（ULE）。参考腔支撑点的横向位置分布在距离中心位置为 21.5 mm 处，径向的位置分布在距离参考腔末端的 5.18 mm 处。为了保证参考腔的入射光能够通过两个腔镜的中心位置，对光学参考腔两个端面平行度的加工要求小于 $0.2'$ ，通光孔与两个端面的垂直度小于 $0.2'$ ，为了保证参考腔与腔镜之间能够进行光胶，连接处的粗糙度小于 1 nm。光学参考腔的两个腔镜的直径为 12.7 mm，厚度为 6.3 mm，凹面镜的曲率半径为 500 mm。

如图 2 所示，直接将光学参考腔放置在铝制的支撑架上，光学参考腔底端与支撑架之间通过 4 块面积为 $6\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的方形托朗垫片连接，光学参考腔支撑点的上端与不锈钢螺钉之间通过 4 块直径为 6 mm 的托朗垫片连接。支撑架采用的是钛合金 TC4，其具有良好的热物理属性与力学属性，且比刚度相对较高，密度相对较低，非常适合于可搬运的超稳激光。

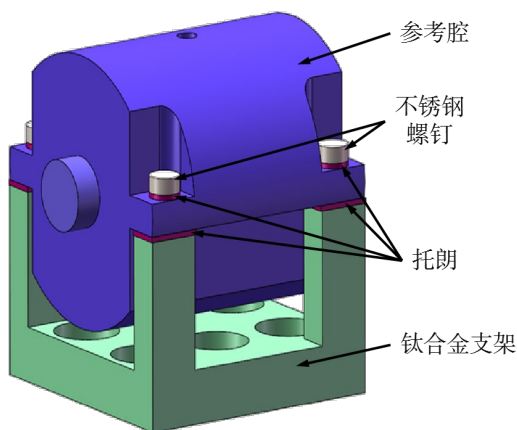
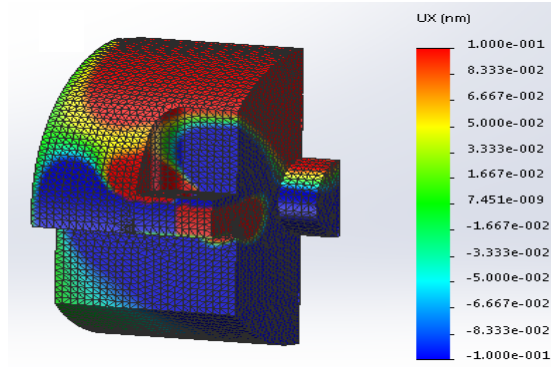


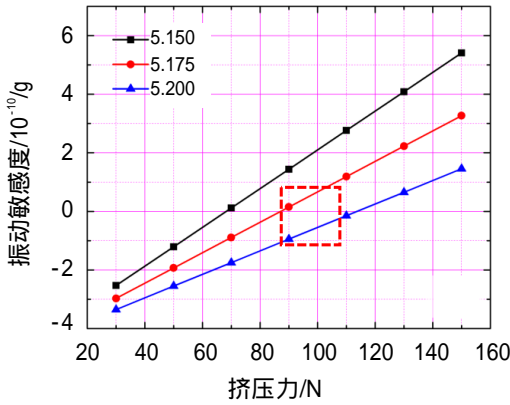
图 2 可搬运光学参考腔支撑结构

2.2 光学参考腔振动敏感度优化

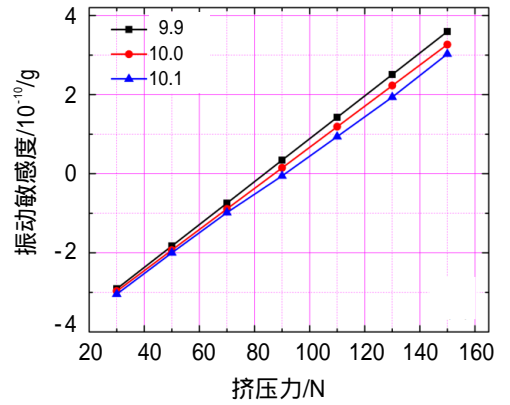
通过有限元软件对该光学参考腔的振动敏感度进行了分析。由于在装配过程中，支撑点的位置是变量，装配误差会对光学参考腔的振动敏感度产生影响。目前加工工艺已较为成熟，玻璃的加工精度可达到 μm 量级，因此，对于可搬运光学参考腔更为关注的是在装配过程中，固定光学参考腔时支撑点与光学参考腔之间的挤压力对其振动敏感度的影响。在本文中，在有限元仿真过程中，以 100 N 的挤压力作为装配过程中光学参考腔与支撑点之间的参考值，对其振动不敏感度进行了仿真。最后，选择光学参考腔下端支撑点的面积为 $6\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ，支撑点的位置距离光学参考腔末端 5.18 mm 附近时，在装配挤压力为 $100\text{ N} \pm 10\text{ N}$ 的情况下，其振动敏感度小于 $1 \times 10^{-10}/g$ ，仿真结果如图 3 (b) 所示。下端支撑面的边长为 10 mm 时，光学参考腔的振动敏感度仿真结果如图 3 (c) 所示，在装配挤压力为 $100\text{ N} \pm 10\text{ N}$ 时，其振动敏感度也小于 $1 \times 10^{-10}/g$ 。在装配过程中，在光学参考腔与上端固定点之间放置有压力传感器对装配过程中的挤压力进行测量。



(a) 1/4 可搬运光学参考腔有限元仿真模型



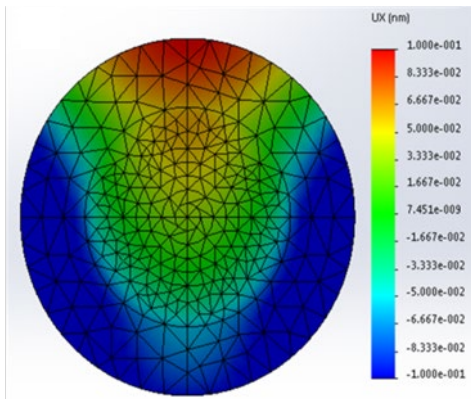
(b) 支撑点在 5.18 mm 附近时, 挤压力对光学参考腔振动敏感度的影响



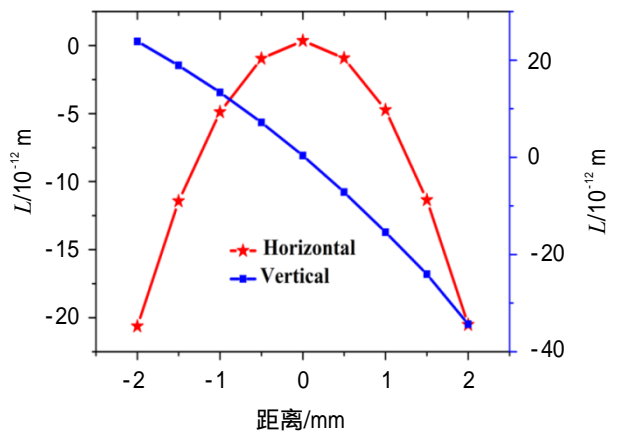
(c) 参考腔下端支撑面的长边边长在 10 mm 附近时, 挤压力对光学参考腔振动敏感度的影响

图 3 光学参考腔振动敏感度有限元仿真

在上述支撑点的位置仿真计算了光学参考腔腔镜中心点附近位置沿光轴方向的位移变化, X 轴与 Y 轴的仿真结果如图 4 所示。从图 4 (a) 中可以看出, 腔镜沿水平方向的颜色分布成对称性分布, 沿垂直轴方向的形变成近线性分布。图 4 (b) 中三角形曲线表示的是沿水平方向分布的计算结果, 可以看出其中心点位置形变量的斜率小于 5×10^{-12} m/g/mm。菱形曲线表示的是沿垂直方向分布的计算结果, 在腔镜中心点位置形变量的斜率小于 7×10^{-12} m/g/mm。



(a) 腔镜仿真变形图



(b) 腔镜 X 轴、 Y 轴形变结果

图 4 腔镜中心位置形变

2.3 光学参考腔测试

国家授时中心与国内相关单位联合研制了文中描述的可搬运光学参考腔，该光学参考腔及其支撑结构的实物如图 5 所示。从图中可以看出，通过 6 根不锈钢螺钉直接将光学参考腔的支撑架与底层的不锈钢法兰盘直接进行连接，从而固定该光学参考腔。

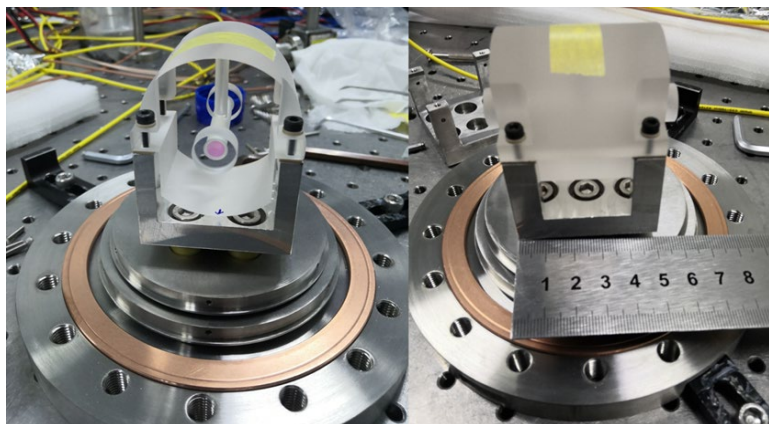


图 5 可搬运光学参考腔及其支撑结构实物图

在光学参考腔加工过程中，比较困难也最为关键的是光学参考腔与腔镜之间的粘贴部分，通常采用光胶将腔镜粘贴在腔体上，这就要求粘贴面连接处的光学冷加工的粗糙度必须小于 1 nm。同时为了获得反射率大于 99.996% 的腔镜，则需要光学参考腔腔镜表面的冷加工粗糙度必须小于 0.3 nm，这样在镀膜过程中才能保证镀膜层的平整度。采用离子束溅射沉积镀膜技术，对腔镜进行了镀膜。测得光学参考腔两端面的平行度为 $0.185'$ ，通过计算得到当激光从平镜中心位置入射时，激光光束在凹面镜的中心位置相对偏移了 0.027 mm，且腔镜的镀膜区域为 5 mm，光学参考腔的腰斑半径为 0.27 mm，因此可以忽略因平行度产生的位置偏移量。同时，利用参考腔线宽扫描的方式对该光学参考腔的精细度进行了测量，测量结果如图 6 所示，测得其腔线宽为 41 kHz，对应的精细度为 78 000。

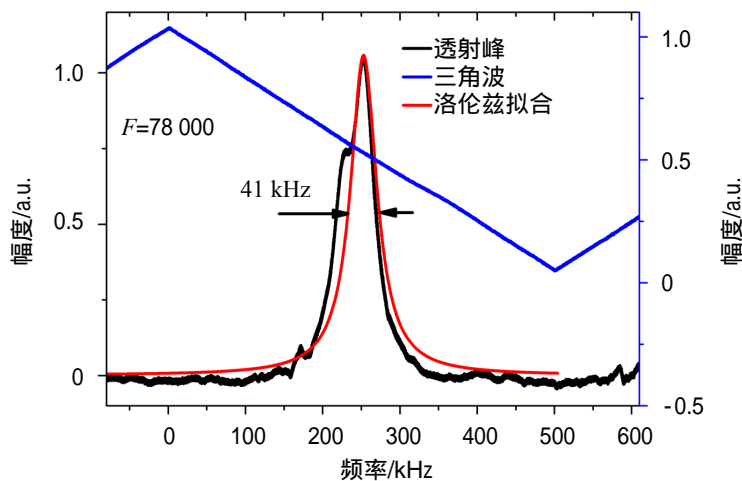


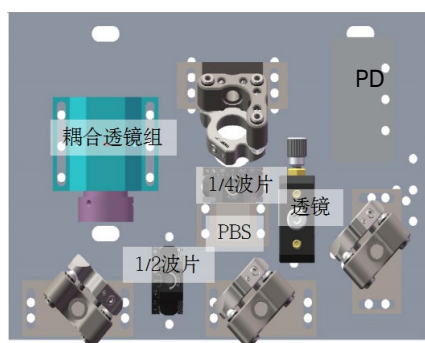
图 6 自制光学参考腔线宽测量结果

3 系统集成化设计

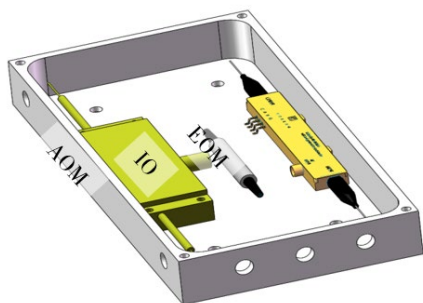
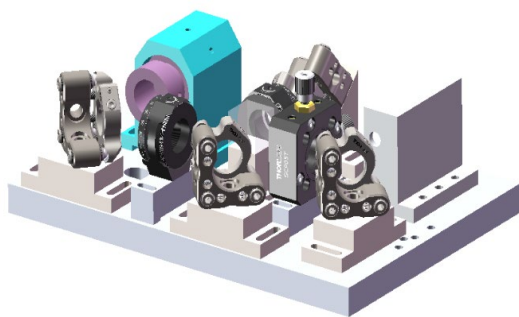
3.1 光路设计

根据研制任务的要求对超稳激光器的光路进行了集成化设计，结果如图 7 所示。集成化的光路系统

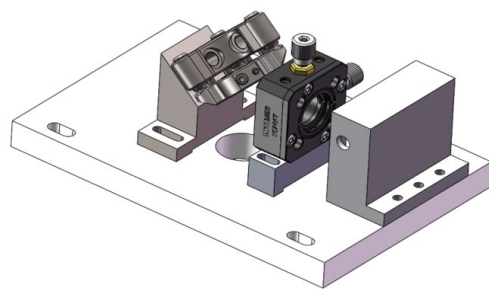
主要包括三个部分,即光纤光路、腔前光路和腔后光路。由于目前通信波段的光电器件已经相对发展较为成熟,为了减小光学系统的体积及质量,在设计过程中,尽可能地使用光纤器件,其中包括光纤声光调制器、光纤电光调制器以及光纤隔离器,其结构如图 7 (b) 所示,总体积为 $200\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 。为了能够将激光耦合入光学参考腔,必须通过空间光路来改变激光光束进入光学参考腔的腰斑半径,使之与光学参考腔的模式进行匹配。由于重力或温度的变化会影响光路中的光学器件的位置发生变化,导致进入参考腔内部的激光方向和位置发生变化,使得光学参考腔的耦合效率降低,因此在空间光路的设计过程中,应该尽可能地缩短激光光束进入光学参考腔的光路长度,其结构设计如图 7 (a) 所示,总体积为 $110\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 。光学参考腔腔后光路也为空间光路,主要是方便对腔后的透射峰信号进行监测,以判断超稳激光器系统的锁定状态,同样为了减小光学器件对激光光束的位置或角度产生影响,应尽可能地减小光路的长度,其光路板的结构设计如图 7 (c) 所示,总体积为 $80\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 。光路中的每个光学器件与光路板之间,都采用 M3 的螺钉进行连接,且所有的连接处都用螺纹紧固胶进行了加固。



(a) 腔前光路



(b) 光纤光路



(c) 腔后光路

注: PD 为光电探测器; PBS 为偏振分光棱镜; AOM 为声光调制器; EOM 为电光调制器; IO 为隔离器

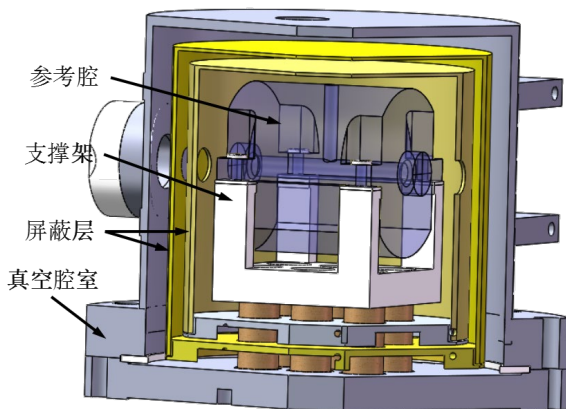
图 7 光路集成化设计

3.2 真空系统设计

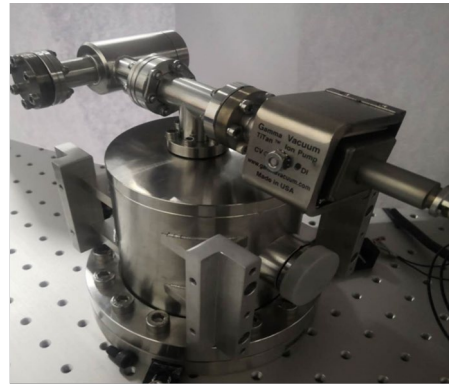
光学参考腔真空系统设计如图 8 所示,图 8 (a) 是光学参考腔真空腔室的设计,图 8 (b) 为装配好的真空腔室实物图。

真空腔室材质为不锈钢,其外壁的直径为 110 mm ,下部底盘的直径为 144 mm ,整个真空腔室以及离子泵的高度为 160 mm 。在真空腔室的内部,采用的是两层镀金的铝制圆筒,以减小外部热辐射带来的影响。真空腔室与镀金圆筒、两层镀金圆筒以及最里层镀金圆筒与参考腔支撑架之间的连接,采用真空材料托朗制作的垫片进行热传导隔离。为了保证光学参考腔支撑架的牢固性,直接采用 6 根不锈钢螺

钉与真空腔室的大底盘进行连接。同时为了减小真空腔室与参考腔之间的热传导效应，真空腔室底盘与不锈钢螺钉的连接处采用的 6 块托朗制作的 M6 转 M14 的转接头进行连接。



(a) 真空系统的结构设计图

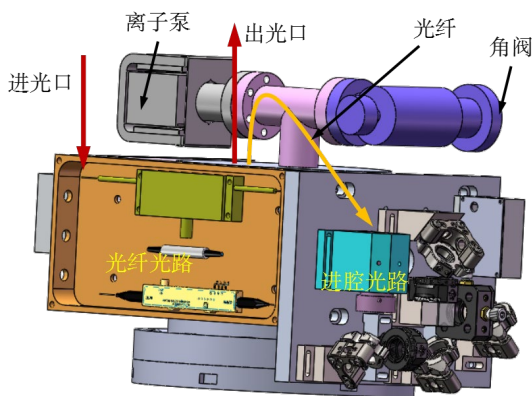


(b) 真空系统的实物图

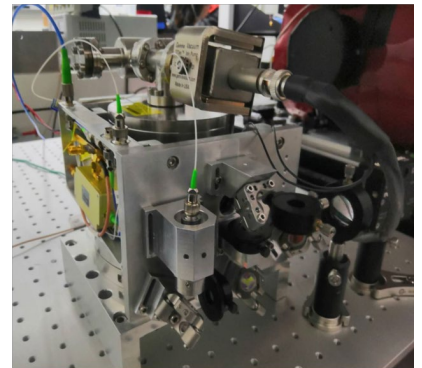
图 8 光学参考腔真空系统结构设计

3.3 物理单元的集成化设计

物理部分主要指的是真空系统与光学系统，其结构设计如图 9 所示，图 9 (a) 是物理部分集成化的结构设计图，图 9 (b) 是物理部分结构集成化的实物图。为了将光学系统与真空系统组装成一个整体，在真空腔室的表面焊接了 8 个凸耳，再将 8 个 L 型的铝柱子用 M4 的螺钉连接在这 8 个“耳朵”上。并在 8 个 L 型的柱子上掏出相应的螺纹孔，最后将光学系统的各个模块连接在 L 型的柱子上。同时，每个连接处，都用螺纹紧固胶进行了加固。集成化后整个物理部分的体积为 185 mm × 160 mm × 165 mm。



(a) 物理部分的集成化结构设计图



(b) 物理部分的集成化实物图

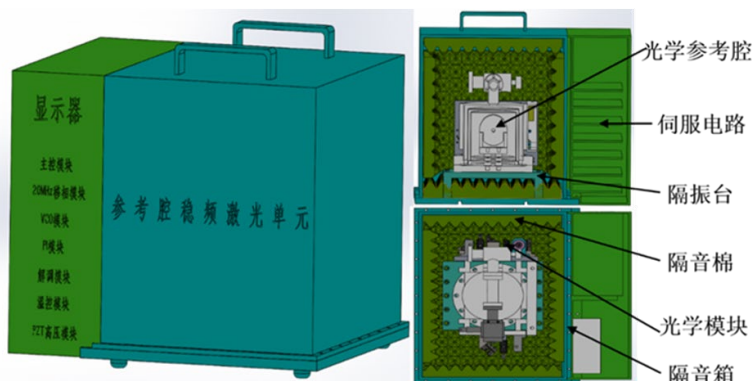
图 9 光学参考腔物理部分设计

3.4 整机设计

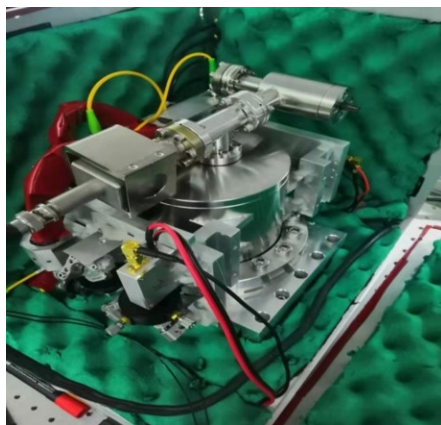
该小型化可搬运超稳激光器的整机结构设计如图 10 所示，图 10 (a) 为整机结构设计图，图 10 (b) 为超稳激光器整机的内部结构实物图，图 10 (c) 为超稳激光器的整机实物图。

该可搬运超稳激光器的整机总体积为 360 mm × 380 mm × 300 mm，包括物理部分与电子学部分。整个物理部分放置于隔音箱中，该隔音箱外层是铝制的箱体，箱体内部贴有约 40 mm 厚的隔音棉，隔音棉与铝板之间贴有铝箔纸以减小外界温度的变化对箱子内部的稳定影响，整个隔音箱的体积为 360 mm ×

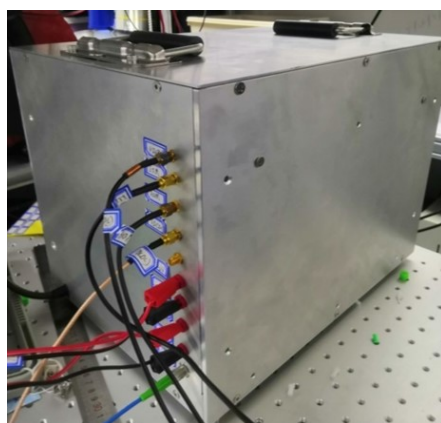
270 mm × 300 mm。整个电子学系统包括自动锁定电路系统、电源系统（激光器的电源模块、自动锁定电路电源模块、光电探测器电源模块），且放置于隔音箱的旁边，用 M4 螺钉进行连接，其总体积为 360 mm × 110 mm × 300 mm。



(a) 超稳激光器物理结构



(b) 可搬运超稳激光器样机



(c) 超稳激光器整机实物图

图 10 可搬运超稳激光器内部结构及样机

4 系统性能测试

将该可搬运的激光器的输出光与实验室线宽小于 1 Hz 的超稳激光器进行拍频比对。两台超稳激光器的拍频频率为 128 MHz，利用混频器将拍频信号混到 100 kHz 以内，采用快速傅里叶分析仪（FFT）

进行测量，FFT 的测量时间为 1 s，测量分辨率带宽 (RBW) 为 1 Hz。两台超稳激光器的拍频线宽如图 11 所示，图中方形曲线表示的是振动测试前的测量结果，通过洛伦兹拟合得到其线宽为 1.41 Hz，圆形曲线表示模拟车载 900 km 运输振动测试后的结果，通过洛伦兹拟合得到其线宽为 1.50 Hz。

将实验室的超稳激光器与该可搬运光器的拍频信号直接通过工作在 型模式下的频率计数器 (Agilent 53230a) 直接进行测量，在去除约 1 Hz/s 的线性漂移后，测得该可搬运超稳激光器的频率稳定度测量结果如图 12 所示，其秒级频率稳定度约为 1.0×10^{-14} 。从图中可以看出，在 0.4 s 以内，机械振动对该可搬运超稳激光器的频率稳定度影响较为明显。同时测得其频率稳定度在 100 s 时上升到 2.5×10^{-13} ，这表明光学参考腔的腔长随温度变化较为明显。

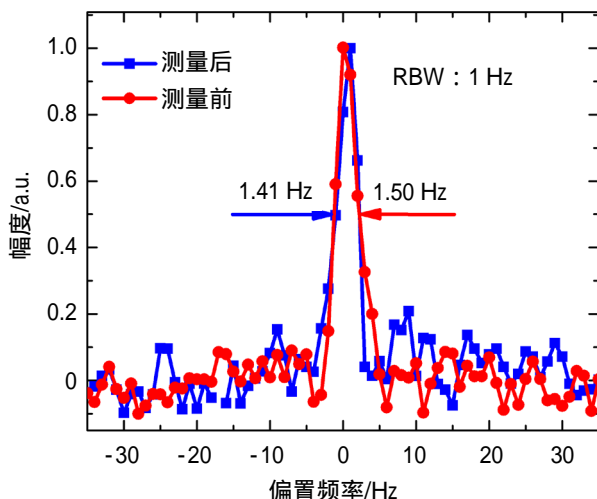


图 11 可搬运超稳激光器的线宽测量

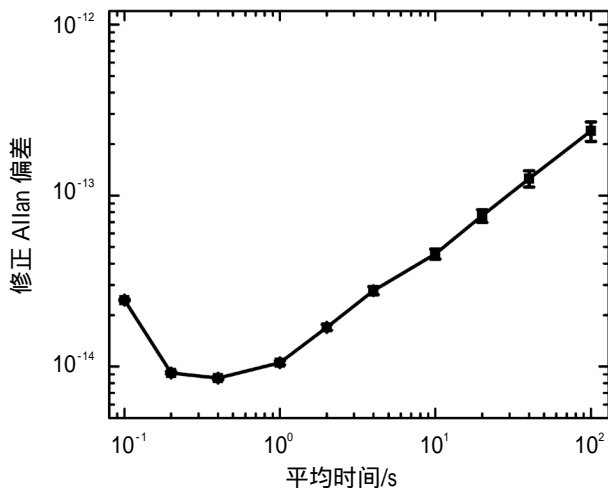


图 12 可搬运超稳激光器的频率稳定度测量

5 结语

为了满足高精度地基授时系统项目的需求，设计了小型化可搬运的 1 550 nm 超稳激光器系统，对其工程化进行了研究，主要围绕 5 cm 长的可搬运光学参考腔及其真空系统进行了设计，完成了光学参考腔的加工，测得其精细度为 78 000，得到其振动敏感度为小于 $1 \times 10^{-11}/g$ 。同时对光学系统及真空系统进行了集成化设计，可搬运激光器的总体积约为 360 mm × 380 mm × 300 mm，总质量约为 20 kg。通

过运输测试,测得该超稳激光器系统的抗振加速度达到 $\pm 1\text{ g}$ 以上。通过拍频比对,测得该超稳激光器的线宽约为 1.41 Hz ,频率稳定度小于 1×10^{-14} @ 1 s 。根据实验测量结果可以看出,基本可以满足地基授时项目对于超稳激光器工程化要求,并为国内可搬运超稳激光器的研究奠定了一定技术基础。

参考文献:

- [1] BOYD M M, ZELEVINSKY T, LUDLOW A D, et al. Optical atomic coherence at the 1-second time scale[J]. *Science*, 2006, 314: 1430-1433.
- [2] LUDLOW A D, ZELEVINSKY T, CAMPBELL G K, et al. Sr lattice clock at 1×10^{-16} fractional uncertainty by remote optical evaluation with a Ca clock[J]. *Science*, 2008, 319: 1805-1808.
- [3] ROSEN BAND T P, HUME D, SCHMIDT P O, et al. Frequency ratio of Al⁺ and Hg⁺ single-ion optical clocks; Metrology at the 17th decimal place[J]. *Science*, 2008, 319: 1808-1812.
- [4] ACERNESE F, AMICO P, ALSCHOURBAGY M, et al. The status of VIRGO[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2003, 20(17): S63-S69.
- [5] WALDMAN S J, COLLABORATION L S. Status of LIGO at the start of the fifth science run[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2006, 23: S653-S660.
- [6] MILLO J, ABGRALL M, LOURS M, et al. Ultralow noise microwave generation with fiber-based optical frequency comb and application to atomic fountain clock[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94: 141105.
- [7] BARTELS A, DIDDAMS S A, OATES C W, et al. Femtosecond laser based synthesis of ultrastable microwave signals from optical frequency reference[J]. *Optics Letters*, 2005, 30: 667-669.
- [8] FORTIER T M, KIRCHNER M S, QUINLAN F, et al. Generation of ultrastable microwaves via optical frequency division[J]. *Nature Photonics*, 2011(5): 425-429.
- [9] KESSLER T, HAGEMANN C, GREBING C, et al. A sub-40mHz linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity[J]. *Nature Photonics*, 2012(6): 687.
- [10] LEIBRANDT D R, THORPE M J, NOTCUTT M, et al. Spherical reference cavities for frequency stabilization of lasers in non-laboratory environments[J]. *Optics Express*, 2011, 19(4): 3471-3482.
- [11] THOMPSON R, VINE G D, KLIPSTEIN W M, et al. A flight-like optical reference cavity for GRACE follow-on laser frequency stabilization[C] // Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proceedings, 2011.
- [12] WEBSTER S, GILL P. Force-insensitive optical cavity[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3572-3574.
- [13] ARGENCE B, PREVOST E, LÉVÈQUE T, et al. Prototype of an ultra-stable optical cavity for space applications[J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 25409.
- [14] CHEN Q F, NEVSKY A, CARDACE M, et al. A compact, robust, and transportable ultra-stable laser with a fractional frequency instability of 1×10^{-16} [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11): 414-418.
- [15] 刘军. 面向空间应用的小型化窄线宽激光器关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [16] 焦东东. 超稳激光器工程化关键技术研究及应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.