

空间激光冷却原子集成光学平台设计

屈求智¹ 夏文兵² 汪 斌^{1*} 吕德胜¹ 赵剑波¹ 叶美凤¹ 任 伟¹ 项静峰¹ 刘 亮¹

¹中国科学院上海精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800

²中国科学院上海精密机械研究所空间激光信息技术研究中心, 上海 201800

摘要 介绍了一种基于空间冷原子铷钟的激光冷却光学平台设计。该平台是我国以空间工程应用为目标而研制的激光冷却原子光学平台,能够空间冷原子钟提供5路连续单模稳频激光,用于冷原子的制备、操控、选态和探测。该平台采用分布布拉格反射(DBR)激光器作为⁸⁷Rb原子激光冷却光源,所有光机组件通过小型化、模块化设计集成在一块300 mm×290 mm×10 mm的铝基碳化硅基板上,通过力学仿真分析优化结构设计、热仿真分析优化基板热设计,使该平台满足航天设备设计要求。经过地面严格的环模实验测试,证明该平台同时具备高精度、高稳定性和高可靠性,可长时间稳定工作而无需人工调节,可广泛应用于各种需要激光冷却操控原子技术的科学研究和工程项目。

关键词 原子与分子物理学; 激光冷却; 原子频标; 集成光学; 空间应用

中图分类号 0439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0602003

Integrating Design of a Compact Optical System for Space Laser Cooling Application

Qu Qiuzhi¹ Xia Wenbin² Wang Bin¹ Lü Desheng¹ Zhao Jianbo¹ Ye Meifeng¹ Ren Wei¹
Xiang Jingfeng¹ Liu Liang¹

¹Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²Research Center of Space Laser Information Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract An optical assembly, designed for the cold atomic clock of space experiment, is described. This optical system is used for atomic cooling, moving molasses, state preparing and clock signal detecting under microgravity environment in space. Distributed Bragg reflection (DBR) lasers has been firstly used in laser cooling of ⁸⁷Rb atoms in space. All the optical and mechanical components are integrated in a 300 mm×290 mm×10 mm aluminum silicon carbide baseplate. Comparing with the conventional optical systems for laser cooling, the system is more compact, more robust and miniaturized. This optical setup has operated for about one year in fountain clock, ground tested by the rigorous tests of thermal and mechanical vibration, keeping high performance with no alignment needed.

Key words atomic and molecular physics; laser cooling; atomic frequency standard; integrated optics; space application

OCIS codes 020.3320; 130.3120; 140.3425; 120.6085

收稿日期: 2015-02-02; 收到修改稿日期: 2015-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(11034008、11274324)、中国科技部仪器项目(2013YQ09094304)、中国科学院重点研究项目(KJZD-EW-W02)

作者简介: 屈求智(1977—),男,博士研究生,副研究员,主要从事空间冷原子物理和原子频标方面的研究。

E-mail: quqiuzhi@siom.ac.cn

导师简介: 刘 亮(1963—),男,博士,研究员,主要从事冷原子物理和原子频标方面的研究。

E-mail: liang.liu@siom.ac.cn(通信联系人)

*通信联系人: E-mail: wangbin@siom.ac.cn

1 引 言

进入21世纪以来,激光冷却原子技术的发展使原子钟精度的提高获得了原理性的突破。利用激光冷却技术,将原子气体冷却至极低的温度,极大地消除了原子热运动对原子钟精度的影响,从而在原理上实现了高精度的原子钟。目前在地面上精度最高的原子钟即冷原子喷泉钟,其准确度能达到 10^{-16} 量级。但是,地面冷原子钟仍受重力的影响,不能利用极慢速原子,其精度不能进一步提高。在空间微重力的条件下,激光冷却的超低速原子和微波腔相互作用的时间极大地增加,从而能使原子钟的精度再提高一个数量级以上。由于空间超高精度冷原子钟在全球定位导航、时间计量、时间同步、验证广义相对论、测量引力红移、原子精细常数、光速的各向异性、引力梯度等方面有重大需求,实现较地面精度高一个量级以上的空间冷原子钟成为近年来国际空间科学应用研究的重要目标之一,后续的空间光钟研究计划也相继展开^[1-5]。本文介绍其中一项关键技术——基于空间冷原子铷钟应用的集成光学平台设计。该平台是以空间工程应用为目标而研制的激光冷却原子光学平台,能够为空间冷原子钟提供5路连续单模稳频激光,用于冷原子的制备、操控、选态和探测。

随着激光器技术的发展,特别是半导体激光器的成熟和更新换代,能够提供激光冷却所需波段激光的激光器从早期的染料激光器到钛宝石激光器,再到半导体激光器,激光冷却光学平台从一开始要占满整间实验室到分布占满一张 $2.4\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ 中型防震平台,再到可集成在一块 $80\text{ cm}\times 60\text{ cm}$ 的小型铝制底板上^[6],体积、尺寸不断大幅度缩小,重量从数吨减少到数十公斤,所需功耗从上千瓦下降到仅需数十瓦,使得激光冷却光学平台登上空间飞行器,为航天工程服务成为可能。尽管如此,由于航天设备要求严苛,成本昂贵,对光学平台的安全性、可靠性、使用寿命和环境适应能力有极高的要求。为了抵御火箭发射的剧烈振动、消除在轨运行时环境温度、气压、磁场等因素的大幅变化和空间微重力环境的影响,激光冷却光学平台在集成化、小型化、轻量化、力学防震、恒温控制、抗磁场干扰等方面还有待提高。而且,作为首次为空间应用研制的激光冷却光学平台,在技术方案和工艺选择等方面没有先例可以依循。为此,在研制工程化集成激光冷却光学平台的过程中,在光路设计、激光器选择、光学组件设计、光路分合束、单模光纤耦合、防磁防震以及恒温抗压等各方面采用了许多全新的技术和工艺。

2 光路设计

为了满足激光冷却原子的功能要求,同时压缩尺寸和减轻重量,提高系统稳定性,在地面激光冷却光学平台技术方案基础上增加了备份主激光器及相应光路,减少了二组声光调制器和四组光纤耦合光路。平台主要由两台主激光器、一台重抽运激光器、三组光束整形模块、五台声光调制器、两组饱和吸收稳频光路、五组单模保偏光纤耦合输出光路和相应的光隔离器、偏振分束器等部件组成。

激光冷却光学平台光学原理如图1所示。主激光器输出 780 nm 激光,首先通过准直和透镜组转换成直径为 0.28 mm 的光束,然后通过偏振分束棱镜(PBS)按照一定的功率比分束。少量激光通过声光调制器1(AOM1)和铷泡,用于饱和吸收稳频,将频率锁定在 ^{87}Rb 原子的D2超精细谱线 $F=2\rightarrow F'=3$ 和 $F=2\rightarrow F'=2$ (简称 F_{23}, F_{22})的交叉峰上。激光在此频率下对 F_{23} 跃迁频率负失谐 133 MHz ,改变声光调制器AOM1的工作频率,即可扫描激光输出频率,用于偏振梯度冷却。其余大部分激光分为两部分,分别用作探测光和冷却光。冷却光部分分为两束,分别通过AOM2和AOM3,此时声光调制器输出效率最高($>70\%$),再经过第二组透镜扩束成直径为 1.32 mm 的光束后耦合进入两根光纤,光纤耦合效率大于 70% ,最后通过单模保偏光纤连接到冷原子俘获区,经过折叠光路变换为六路冷却光。AOM2和AOM3是由一对锁相的射频源驱动,驱动频率在冷原子俘获过程中频率相同,抛射时分别增加和减小 $\Delta\nu$,用于Moving molasses,驱动功率改变可用于后冷却过程中激光功率扫描。探测光部分经过AOM4,其负一级衍射激光频率相对 F_{23} 跃迁频率负失谐 3 MHz ,耦合进两根光纤,成为探测光和选态光。重抽运激光器稳频在 ^{87}Rb 原子的D2吸收峰的 $F=1\rightarrow F'=2$ 和 $F=1\rightarrow F'=1$ 的交叉峰上,经过AOM5后频率固定在 $F=1\rightarrow F'=2$ 的吸收峰上,输出激光中的一部分与冷却光中的一束合并,一部分耦合进光纤后用于原子双能级探测。

此设计将整个光路分两层分布于一块长 300 mm 、宽 290 mm 、厚 10 mm 的平板正反两面,总重量 6.5 kg 。实现该方案的关键在于建立稳定的饱和吸收鉴频光路以实现激光自动稳频,采用精确可靠的光路装调工艺

以保证声光调制器和光纤输出的最大耦合效率,研制稳固不易变形的光学底板提高系统稳定性,实施防震和恒温措施以消除外界环境因素变化的影响。

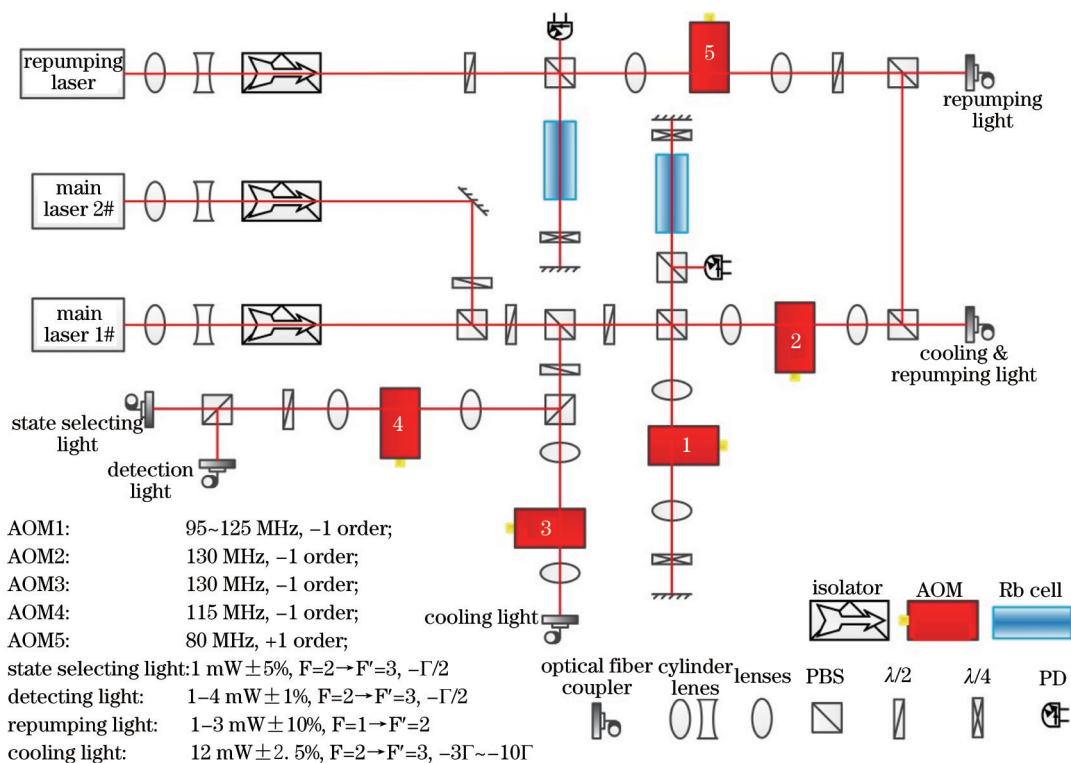


图1 激光冷却平台光路原理

Fig.1 Optical architecture of laser source for laser cooling

3 激光器及主要组部件设计

激光冷却技术对激光源的频率准确度、线宽、光束质量和功率稳定度都有非常严格的要求。为达此目标,对激光器选型、光学组部件小型化、光路调整工艺和底板材料选择等方面进行了系统设计,提高了光学系统本身的稳定性。

传统冷原子技术中通常采用外腔半导体激光器,是通过控制压电陶瓷(PZT)电压改变外腔长度来实现激光频率控制。但是,由于外腔的存在导致激光器抗力学和温度干扰能力比较差,由温度变化引起的腔长变化可能大范围影响输出激光频率,从而容易产生跳频现象,激光频率稳定性较差。近年来,商业级分布布拉格反射式半导体激光器(DBR-LD)在原子激光冷却所需波段的出现,使其应用于冷原子物理实验成为可能。DBR激光器的特点是不需要外腔即可输出小于1 MHz线宽的激光,不存在机械运动部件,体积小、重量轻、便于机械安装和温度控制。目前可满足激光冷却需求的780 nm DBR激光器工业级产品的最大功率约为180 mW,其增益介质采用单步分子束外延方法生长而成,把光栅刻蚀区域和激光增益区域在空间上分开,有效避免了二极管工作时电流对光栅造成的损害,保证了其内部损耗低和高输出功率,使用寿命可达约10⁵ h。利用以上优点,在国内首次采用了DBR激光器作为冷原子激光源,并设计光学组合透镜以优化其输出光束质量,提高其光学性能,再通过二次密封加固和二级温控设计,提高其力学性能和热学性能。

由于DBR激光器对温度变化较为敏感,工作温度的波动会引起激光器阈值电流、波长漂移、输出光功率变化,而且当DBR激光器工作时会产生较多热量,在空间微重力环境下,由于冷热空气失去了产生对流的动力,激光器无法通过空气对流来散热,散热条件类似于真空环境,所以必须对激光器实施温度控制。采用紫铜作为外封装材料,将热量导向安装面,安装面再外加主动温控,激光管内部则由半导体热电制冷器(TEC)进行温控,温度控制电路采用模拟比例放大器(PI)反馈控制方式来实现,控温精度达到毫开尔文量级。激光器工作电流由精密压控电流源控制,使用微控制单元(MCU)控制器实现激光器自动找频和稳频控制算法,通过

稳频反馈电路并采用模拟PI反馈控制方式实现激光稳频。激光器工作电流短期稳定度达 $\pm 1 \mu\text{A}$,长期稳定度达 $\pm 100 \mu\text{A}$ 。

图2给出了激光冷却平台上主要光学组部件结构示意图,包括DBR激光头、柱面透镜组件、光隔离器、铷原子吸收泡、声光调制器、激光缩/扩束组件、光纤耦合组件和光楔组件。平台上光学组部件的结构设计特点一是外形尺寸尽可能小,二是不采用任何可调节的弹性机械结构,所有光学元件间距精密调节均采用旋转元件然后锁紧的装调方式,光束指向精密调节则由反向旋转光楔组件来实现。实践证明,这种设计对提高光路稳定性,实现光学平台长期自动运行有巨大的帮助。

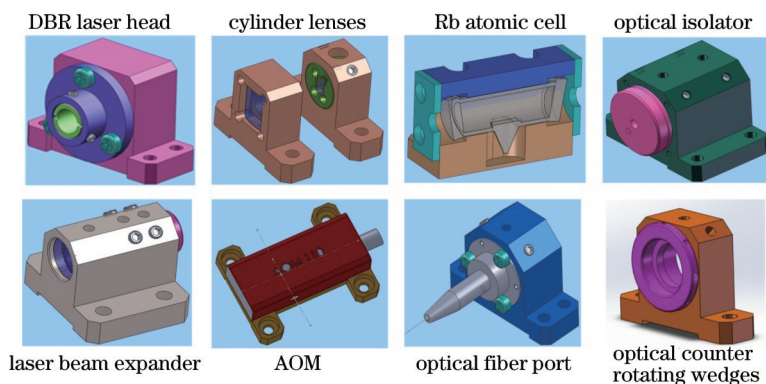


图2 激光冷却光学平台主要组部件结构模型

Fig.2 Models of main components on laser cooling optical baseplate

以美国Photodigm公司生产的780 nm波长DBR激光管为例,由于增益介质结构不对称,其输出为扁长型发散激光,光束发散角 $\theta_{\parallel} \times \theta_{\perp}$ 为 $6^{\circ} \times 26^{\circ}$,使用前需要准直和整形缩束。如图2所示,将准直非球面镜与DBR激光管集成为一体,准直镜先用光学环氧胶粘在镜筒内,外加调整法兰,再用螺钉固定在紫铜基座上,使其可以上下左右做微小的调整;调整法兰压在DBR激光器外套的铜环上,铜环另一端压在DBR激光器底边上;准直镜可轴向移动,调整好锁定。此时输出光为扁平准直光,纵横比约为1:4。通常的半导体激光器输出光一般采用组合楔形棱镜进行整形,但是,用楔形棱镜整形将使光束传播路径发生折射,偏离原来方向,不利于后续光路的直线布局。因此,设计了柱面组合棱镜对输出光进行整形和缩束。柱面透镜组件支撑采用铝合金材料,凸柱透镜直接与支架粘接,凹柱透镜外加圆筒,可以轴向移动及旋转,因此可以精确地调整凹柱透镜母线的方向与凸柱透镜一致,调整后通过两侧的螺钉锁定。完成整形后的激光光束直径约为1 mm。由于AOM的通光区对光斑的要求为0.27~0.4 mm,因此,在光束进入AOM之前,将 $\phi 1 \text{ mm}$ 光束通过4倍缩束器缩小为 $\phi 0.25 \text{ mm}$,此时通过AOM最大的衍射效率大于70%。一小部分激光进入铷吸收泡,产生鉴频信号。铷泡为玻璃结构,内部铷原子超精细结构能级易受外界环境磁场变化干扰,因此采用软铁材料上下夹持的方式安装,屏蔽外界磁场影响。另外大部分激光再经过6倍激光扩束器和平台其它光路,最终转化为 $\phi 1.3 \text{ mm}$ 的准直光进入光纤耦合头,经过光楔组件对光路进行精细调节,使光纤耦合效率大于60%。由于单模保偏光纤芯径只有 $5 \mu\text{m}$,对光纤耦合组件的稳定性提出了更高的要求,因此采用了钛合金材料作为光纤耦合组件的支撑。所有光机元件待光路装调完毕后点胶固化。

4 光学平台结构热设计

如图3所示,激光冷却光学平台整个光路分布于一块长350 mm、宽300 mm的基板正反两面。基板中心厚度为10 mm,四周侧壁高度为30 mm,中间光路空白处设计了结构加强筋。由于平台在地面装调、火箭发射和空间在轨运行时的力学条件和温度条件完全不同,且四脚固定安装带来的挠曲较大,重力方向的改变和温度变化都能导致基板形状发生变化,影响其上光学系统的性能。为了提高系统稳定性和环境适应性,解决的办法一是需要选择强度高且不易变形的材料作为基板材料;二是通过拓扑优化设计结构加强筋,提高基板整体刚度;三是在基板安装脚处增加减震装置,消减外来力学冲击和振动的影响;四是对平台进行主动温控,保持平台温度水平和降低温度梯度。

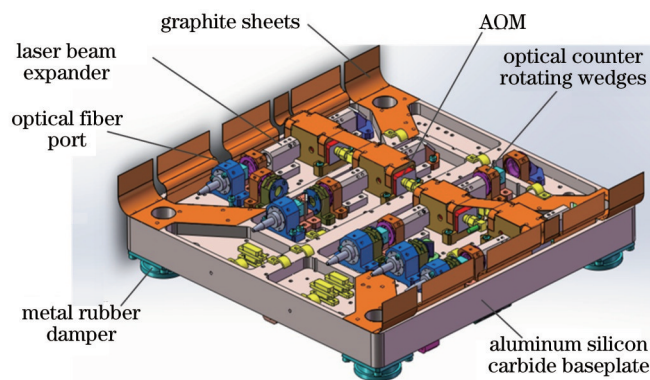


图3 激光冷却光学平台结构示意图

Fig.3 Optical architecture of laser cooling optical baseplate

表1列出了航天工程最常用的结构金属材料铝合金6061和最新研制的铝基碳化硅的材料特性。两者的材料密度、热膨胀系数、比热和横向变形系数(泊松比)基本一致,但铝基碳化硅的刚度(杨氏模量)约为铝合金6061的1.5倍,导热系数是其1.3倍。即在同等条件下,铝基碳化硅基板的机械形变量比铝合金基板小32%,温度梯度小25%。因此,选择铝基碳化硅作为光学平台基板材料。

表1 铝合金6061与铝基碳化硅材料属性对比

Table 1 Comparisons of aluminum alloy 6061 and properties of aluminum material-carborundum

Properties	Aluminum alloy 6061	Aluminum silicon carbide
Density kg/m^3	2.71×10^3	2.77×10^3
Thermal Exp. Coef. $/^\circ\text{C}$	2.36×10^{-5}	2.3×10^{-5}
Specific heat $/(J/kg/^\circ\text{C})$	920	875
Thermal conductivity $/(W/m/^\circ\text{C})$	167	220
Young's modulus $/\text{Pa}$	6.82×10^{10}	9.9×10^{10}
Poisson's ratio	0.332	0.32

为了对光学平台结构进行优化,对基板进行了力学仿真分析。图4给出了平台基板受自身重力导致的变形分析结果,结果显示,初始设计的基板在重力的影响下,最大变形量为 $0.38 \mu\text{m}$ 。根据此分析结果,对基板结构进行局部调整,经过结构设计和分析结果的反复叠代和优化,最终设计的基板最大变形量为 $0.17 \mu\text{m}$ 。经过地面重力实验验证,光学平台正面朝上放置和反面朝上放置时,其上光学系统性能保持不变,说明平台基板刚度达到要求。

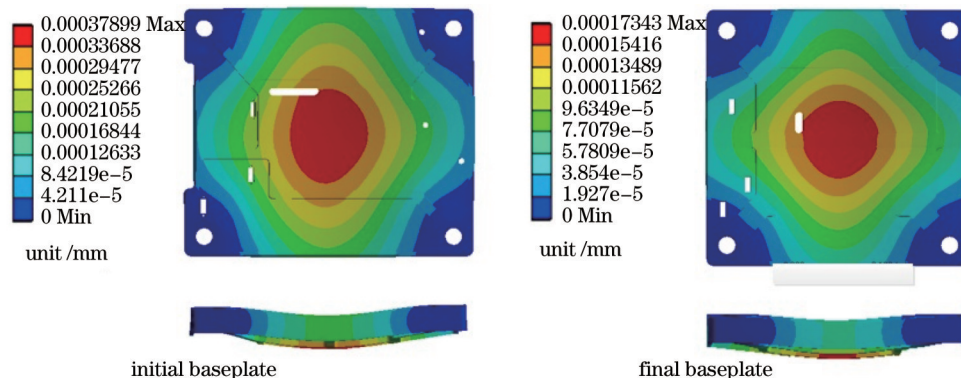


图4 光学平台基板受重力变形分析结果对比

Fig.4 Analysis of deformation under force of gravity on optical baseplate

平台基板隔震设计采用了4个GZA-1-01型金属橡胶阻尼隔振器与安装面相连。金属橡胶减振器由不锈钢金属丝弹性元件制成,其减震原理是通过材料内部接触点之间的干摩擦所耗散的能量实现阻尼减振。当外界载荷沿着构件的轴线方向作用时,构件内部层面之间的接触点数目将增加;当载荷沿着剪切方向作用时,接触层面之间发生相对滑移,接触面积也会发生变化。各层面之间的相对滑移形成了金属橡胶构件内部的干摩

擦阻尼,耗散了外界载荷的振动能量,可以适用于积极隔振和消极隔振。当承受较大冲击载荷时,金属橡胶减振器对共振峰的抵制能力很强,对瞬态冲击响应瞬时过度工况等引起的自振能迅速消失,设备不致出现大的晃动,在较宽的干扰频率范围内有相当明显的隔振效果。单个隔振器额定载荷为 1.625 kg,阻尼比为 0.1~0.35。图 5 给出了上天设备标准超重条件下的光学平台有无隔振器的力学随机振动测试结果,平台基模为 1498.5 Hz。对比测试结果,表明隔振器有效吸收了从低频 100 Hz 到高频 2000 Hz 范围内的各种振动功率,对光学平台有明显的减震作用。加隔振器以后的光学平台在经历力学试验后系统状态稳定不变。

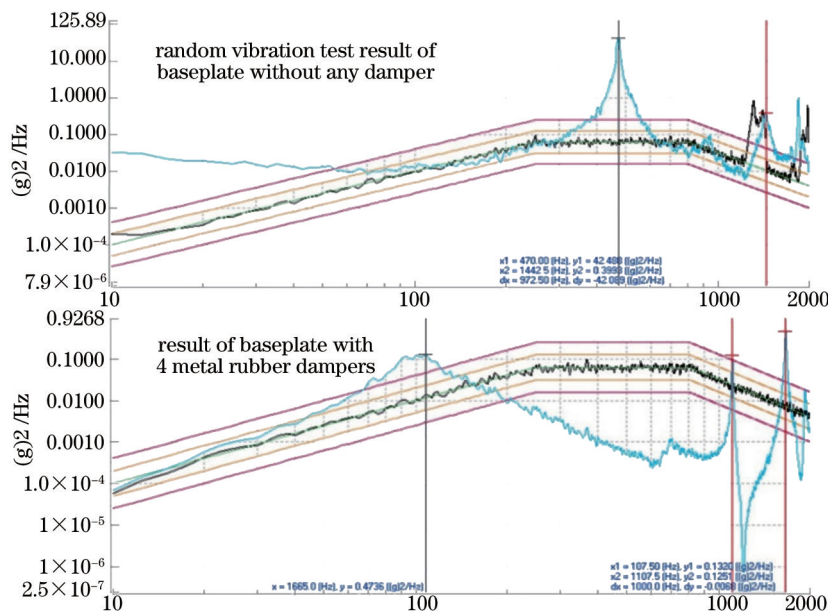


图 5 光学平台力学随机振动试验结果对比

Fig.5 Comparison of random vibration test results of optical baseplate

为了保持光学系统性能稳定,必需使光学平台始终处于同一温度水平范围,同时控制平台温度梯度以减小热应力变形。图 6 是光学平台稳态热仿真分析结果和相应的热应力变形分析图。结果表明,热平衡状态下平台温度梯度大于 1.5 °C,平台基板最大变形处在安装脚附近,变形量约为 13 μm,中心光学系统附近平均变形量约为 5 μm。为了进一步提高系统稳定性和温度适应能力,采用了对光学平台基板通过贴装电加热薄膜进行整体主动温控,温控精度为 ±40 mK。另外,如图 3 所示,还在平台周围增加了柔性高导热石墨膜,对平台上热源产生的热量进行疏导,使基板温度梯度小于 1 °C,整体温度分布趋向平均,安装脚处热应力变形相应减小。

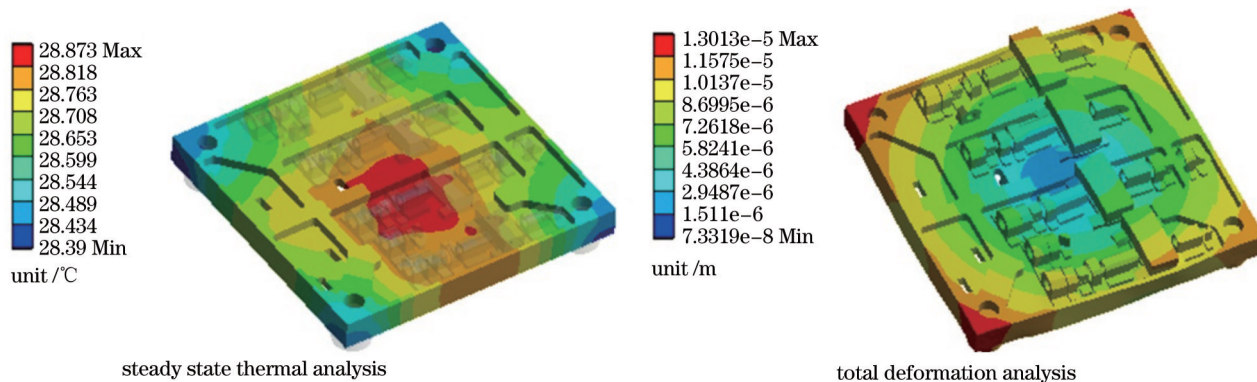


图 6 光学平台稳态热分析及热应力变形分析

Fig.6 Steady state thermal analysis and total deformation analysis of optical baseplate

5 结 论

经过近一年的测试,空间激光冷却光学平台样机先后经过力学试验、热循环试验和热真空试验等一系列环模试验测试,并在不同城市、不同地点多次长途搬运,光学系统性能始终保持稳定,所有激光功率起伏

小于 $\pm 5\%$,激光频率稳定度优于 $5 \times 10^{-10}@10000\text{s}$,单路冷却光输出功率大于 12 mW ,可正常工作温度范围为 $10\text{ }^\circ\text{C} \sim 32\text{ }^\circ\text{C}$,满足空间原子钟使用要求,证明其能够适应航天工程热力学和微重力环境,可长期稳定工作而无需人工调节。与目前世界上同类平台(例如 PHARAO 钟^[2]的光学平台,尺寸为 $530\text{ mm} \times 350\text{ mm} \times 150\text{ mm}$,重 20.054 kg ,10根光纤)相比,此平台所用光学组部件最少、总光程最短、光纤数量最少、体积和功耗最小、总重量最轻。该平台集光学、电子学、防磁隔震和恒温控制于一体,成功实现了激光冷却技术的工程化,为冷原子物理从科学试验研究转向工程应用,发展空间冷原子物理和建立空间原子频率基准打下了坚实的基础。

参 考 文 献

- 1 S Bize, P Laurent, M Abgrall, *et al.*. Advances in atomic fountains[J]. C R Physique, 2004, 5(8): 829–843.
- 2 Ph Laurent, M Abgrall, Ch Jentsch, *et al.*. Design of the cold atom PHARAO space clock and initial test results[J]. Appl Phys B, 2006, 84(4): 683–690.
- 3 Lü Desheng, Liu Liang, Wang Yuzhu. Space cold atomic clock and its scientific applications[J]. Manned Spaceflight, 2011, 1:47–51.
吕德胜, 刘 亮, 王育竹. 空间冷原子钟及其科学应用[J]. 载人航天, 2011, 1: 47–51.
- 4 Lü Baolong, Liu Liang, Liu Wuming, *et al.*. Exploration of cold atomic physics in space and its applications[J]. Manned Spaceflight, 2011, 5: 33–38.
吕宝龙, 刘 亮, 刘伍明, 等. 空间冷原子物理及应用探索[J]. 载人航天, 2011, 5: 33–38.
- 5 Zhang Shougang. Progress of novel atomic clock[J]. Journal of Time and Frequency, 2009, 32(2): 81–91.
张首刚. 新型原子钟发展现状[J]. 时间频率学报, 2009, 32(2): 81–91.
- 6 Lü Desheng, Qu Qiuzhi, Wang Bin, *et al.*. Miniaturized optical system for atomic fountain clock[J]. Chin Phys B, 2011, 20(6): 063201.

栏目编辑: 韩 峰