



激光技术

Laser Technology

ISSN 1001-3806, CN 51-1125/TN

《激光技术》网络首发论文

题目：机载全光纤激光器壳体结构设计与分析
作者：李明，宋国龙，毕野，李星霖，张秀齐，王禹凝，郑权
网络首发日期：2023-07-25
引用格式：李明，宋国龙，毕野，李星霖，张秀齐，王禹凝，郑权. 机载全光纤激光器壳体结构设计与分析[J/OL]. 激光技术.
<https://kns.cnki.net/kcms2/detail/51.1125.tn.20230724.1755.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

机载全光纤激光器壳体结构设计与分析

李明¹, 宋国龙^{1*}, 毕野¹, 李星霖¹, 张秀齐¹, 王禹凝¹, 郑权^{1,2}

(1. 长春新产业光电技术有限公司, 长春 130103;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 激光器壳体结构对机载激光器的性能起着十分重要的作用。本文总结了机载激光器壳体设计的一般原则, 并设计了一款用于机载的 1030nm, 输出功率>10W 的高功率、高稳定性的全光纤激光器壳体结构。壳体体积为 220mm×270mm×75mm, 质量<7kg。壳体结构采用柔性支撑的减振设计, 并通过壳体结构的合理设计, 使激光器可以在温度-55~+45℃, 机载平台下保持正常运行。利用 ANSYS 有限元分析软件对激光器壳体进行了热分析与随机振动分析, 分析结果显示: 激光器壳体在+45℃下, 激光器最热面温度为 49.5℃, 温升约为 4.5℃, 散热性能良好; 在总均方根 10.77g 随机振动条件下, 激光器最大 3σ 应力为 171MPa, 随机振动响应 RMS 值仅为 24.5g, 壳体结构力学性能良好。按照设计图纸对机载全光纤激光器样机进行了加工, 并进行了试验验证, 试验结果表明: 激光器壳体结构的散热性能以及力学性能完全满足设计要求, 试验结果与仿真结果吻合度较高, 试验与仿真结果为机载光纤激光器项目的具体实施提供一定参考。

关键词: 激光技术, 机载光纤激光器, 壳体设计, 柔性支撑, 热分析, 随机振动分析, 试验验证

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

Design and analysis of shell structure of airborne all-fiber laser

Li Ming¹, Song Guolong^{1*}, Bi Ye¹, Li Xinglin¹, Zhang Xiuqi¹, Wang Yuning¹, Zheng Quan^{1,2}

(1.Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd, Changchun 130103, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;)

Abstract: The structure of the laser shell plays an important role in the performance of the airborne laser. This paper summarizes the general principles of airborne laser shell design, and designs a high-power and high-stability all-fiber laser shell structure with 1030nm which achieve output power of 10W. The volume of the shell is 220mm×270mm×75mm, and the mass is less than 7kg. The shell structure adopts the vibration reduction design of flexible support, and through the reasonable design of the shell structure, the laser can maintain normal operation under the temperature of -55~ + 45 °C for the airborne platform. The thermal analysis and random vibration analysis of the laser shell are carried out by using ANSYS finite element analysis software. The analysis results show that the laser shell is under condition of the environment of + 45 °C, the temperature of the hottest surface of the laser is 49.5 °C, the temperature rise is approximately 4.5 °C, and the heat dissipation performance is excellent. Under the condition of total root mean square 10.77 g random vibration, the maximum 3σ stress of the laser is 171MPa, the RMS value of random vibration response is only 24.5g, and the mechanical performance of the shell structure is robust. According to the design drawings, the prototype of the airborne all-fiber laser is processed, and the experimental verification is carried out. The experimental results show that the heat dissipation performance and mechanical properties of the laser shell structure achieve the design requirements. The experimental results are well agreement with the simulation results. The experimental and simulation results provide a certain reference for the specific implementation of the airborne fiber laser project

Key words: laser technique; airborne fiber laser; shell design; flexible support; thermal analysis; random vibration analysis; experimental verification

项目基金: 吉林省科技厅科技发展计划项目 (20210201004GX)

作者简介: 李明 (1991-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事激光器机械结构设计及研究。

*通讯联系人。E-mail:songgl@cnilaser.com

0 引言

光纤激光器是一种以光纤为增益介质的激光器,具有质量轻、可靠性高等诸多优点,在国防、航空、工业等领域得到了非常广泛的应用^[1-6]。近年来,随着光纤技术的发展,光纤激光器成为了国内外诸多学者的研究对象,在光纤技术、激光种子、光纤激光光学结构等方面取得了很大发展,促使光纤激光器的波长更加丰富,体积更加小型化,但是国内外学者对于光纤激光器的壳体结构的研究,特别是机载环境下的壳体结构研究较少。在国内,2022年张琳等^[7],针对小型化光纤激光器进行了水冷板结构的仿真分析和散热优化,实现了最大功率为2.2 kW的连续激光输出时,热耗器件安装位置处的最高温度为32.1℃,且光学参数正常,为光纤激光器的热仿真以及散热优化提供很好参考。2015年彭兴文等^[8],分析了4种工况下泵浦源的温度场特性,并进行了散热结构改进的初步研究,得出了改变AIN基板和铜热沉的厚度可在一定程度上降低结温的结论,为光纤激光器泵浦源的散热设计提供一定参考。2021年耿园园等^[9],分析了导致激光发射光轴产生偏离的原因,从而确定激光测照器的发射光轴不稳定的原因并给出优化意见,为机载激光器壳体结构的设计提供一定参考。2015年Doruk Engin等^[10]中对空间用光纤激光器的壳体结构进行了相关研究与分析,总结了空间激光器设计的一般步骤及相关仿真与试验方法,为空间光纤激光器的设计提供了非常好的依据。

机载的应用环境较为严苛,壳体结构会在飞机起降以及飞行过程中,受到加速度过载、随机振动、冲击、高低温等环境影响,这些因素会使激光器内部器件相对位置发生微小变化,过大的振动响应也会使光学关键器件失效,给激光器带来极大的危害。本文根据机载光纤激光器项目要求,对机载环境下的光纤激光器壳体结构进行了设计与仿真分析,并对样机进行了相关试验,仿真以及试验结果符合机载光纤激光器设计要求,为机载光纤激光器项目的进一步实施提供依据。

1 机载全光纤激光器主要指标要求

机载全光纤1030nm激光器主要由半导体LD、光纤光栅、增益光纤、合束器、温控系统、驱动源等组成。其中,激光泵浦源采用915nm的半导体LD,增益光纤采用双包层掺镱光纤激光束的输出;激光驱动源为泵浦源和温控装置提供稳定的供电和控制;温控装置用于控制激光泵浦源温度,实现激光器的稳定运转。激光器的主要技术指标如表1所示。1030nm光纤激光器由光路系统与电路控制系统、电源结构组成。光纤输出的1030nm激光器结构如图1所示。

表1 激光器技术指标

Table 1 Laser technical specifications

Laser technical specifications	
Wavelength	1030nm±3nm
Out power	>10W
Power stability	±3%
Power supply	DC28V
Volume	220mm×270mm×75mm
Weight	<7kg
Operating temperature	-55℃—+45℃

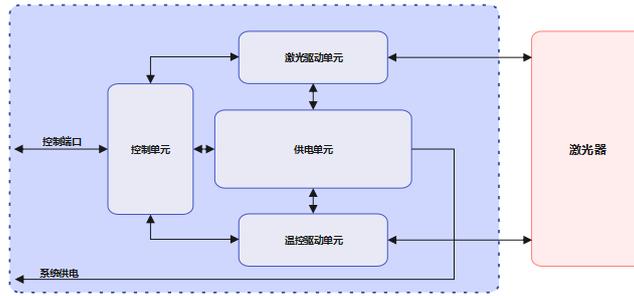


图 1 1030nm 激光器主要组成框图

Figure 1 Main block diagram of 1030nm laser

2 机载全光纤激光器壳体设计

2.1 机载光纤激光器壳体的设计原则

激光器主要指标要求以及机载应用的特殊环境，决定了激光器壳体设计要有高强度、高稳定性、良好的散热性能。机载激光器相对于地面应用的激光器，壳体结构会承受很复杂的力学环境。在飞机起降以及飞行过程中，激光器会受到加速度过载、随机振动、冲击、高低温等环境影响，因此在结构设计时，要把壳体结构的抗振性设计作为壳体结构的设计重点，要保证壳体在力学环境下能够不被破坏且随机振动加速度响应要尽量小，保证激光器 LD 等关键光学器件不被振动损坏，另外要兼顾激光器的散热性能，要能够保证激光器的热量及时有效的散出。

基于以上分析，机载光纤激光器壳体的设计原则主要有以下几点：

- ①激光器壳体需要足够的壁厚来增加激光器的强度与刚度，保证激光器壳体结构不被破坏。
- ②激光器壳体结构要有一定的减振设计，使随机振动加速度响应尽量小，保证激光器 LD 等关键光学器件不因振动而损坏。
- ③激光器壳体结构要有良好的散热性能，热传递路径要短，且要减少热传递的接触面，减小热阻，保证激光器热量及时有效的散出。

2.2 机载全光纤激光器壳体结构设计

根据机载光纤激光器壳体结构设计原则，利用 SolidWorks 建模软件对机载光纤激光器壳体结构进行了设计。

2.2.1 主壳体设计 设计完成后的主壳体壁厚为 7mm，底厚为 7mm，激光器采用光、电独立的背靠背设计，中间设计有风道。高温环境下，通过 3 个 40mm×40mm×20mm 散热风扇进行散热，壳体上直接加工散热翅片，散热齿距设计为 8mm，齿宽为 3mm，齿高为 10mm，且各发热元件直接固定于壳体之上，缩短传热路径，减小热阻，低温环境下通过加热片对壳体进行加热，壳体材料为 6061-T6 铝合金。如图 2 所示。

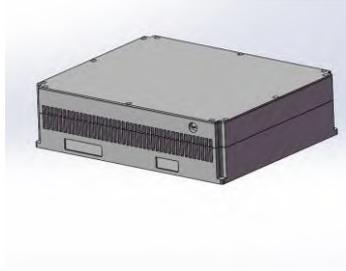


图 2 光纤激光器壳体

Figure 2 mode of Fiber laser shell

2.2.2 柔性支撑架设计与优化 为了减小振动对激光器的影响,对激光器支撑结构进行了特殊减振设计,创新性的设计了柔性支撑结构,柔性支撑结构可以利用材料的微小变形与自回复的特性,不但可以隔振、消除部分装配应力,还可以吸收由温度变化所引起的机械应力以及变形。

柔性支架的设计经历了多次迭代优化,目的是使激光器以最低允许的频率共振,从而使激光器随机振动时,高频能量可以得到很好地衰减。柔性支架的缺口设计是柔性支架设计的重点,过渡圆角以及柔性支架的最小厚度决定着柔性支架的力学表现,过渡圆角小会产生应力集中,过大会增加柔性支架刚度。

通过优化柔性支架的缺口参数,使激光器以最低允许的频率共振。项目总体部门要求激光器结构基频不得低于 400Hz, 低于 400Hz 激光器与机载平台会存在共振的风险,会对结构造成严重破坏。因此激光器壳体结构的基频设计要求为结构基频不低于 400Hz 且尽量接近 400Hz, 在工程设计中为保证绝对的安全,一般留有一定的安全裕度,因此激光器壳体结构基频设计在 430Hz 至 450Hz 范围内为最佳,既保证结构安全,又会使激光器以最低允许的频率共振。

激光器壳体机构结构优化的数学模型^[11]见(1)式。式中, t_e 表示柔性环节厚度; α 为体积分数,表示柔性支架优化后的体积与优化前的体积比; f_1 表示壳体结构基频。

$$\text{Find: } T'=(t_1,t_2,t_3\dots t_e,\dots t_n)^T$$

$$\text{Minimize: } C(x) = \sigma_{y\ddot{y}}^2$$

$$\text{Subject to: } \alpha = \frac{\sum_{e=1}^n V_s^e}{\sum_{e=1}^n V^e} \leq 0.4$$

$$f_1 \geq 400$$

$$0 \leq t_i \leq t_e \leq 1$$

(1)

起初柔性支架的设计如图 Version1-Version3 所示,通过壳体结构模态分析,得到激光器壳体结构基频分别为 757Hz,681Hz 和 530Hz,远远高于最低允许频率 400Hz,需要进一步减小缺口厚度,减小过渡圆角降低柔性支架刚度,降低基频。根据结构优化数学模型进一步调整柔性缺口参数,最终确定激光器柔性支架过渡圆角为 R3,最小厚度为 2mm,结构模态分析显示基频为 443.12Hz,较最低允许频率仅高 43Hz 左右,满足激光器壳体结构基频设计要求,柔性支架设计符合要求。柔性支架材料为 TC4 钛合金。激光器采用 4 个柔性支架固定,柔性支架的几次关键迭代如图 3 所示。最终壳体结构模态分析结果如图 4 所示。

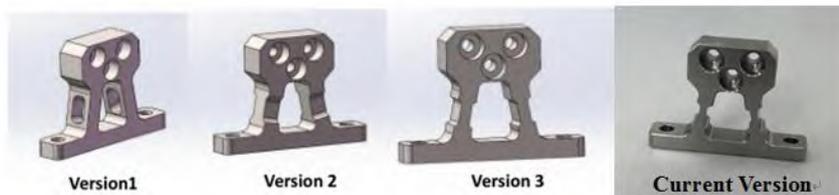


图 3 柔性支架几次迭代模型

Figure 3 Mode of flexible support

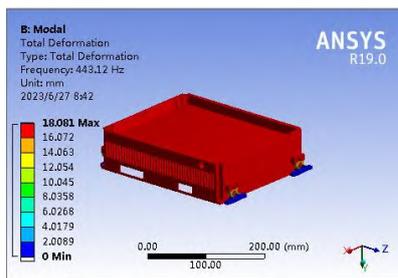


图 4 模态分析结果

Figure 4 Modal analysis results

3 激光器热分析

机载全光纤 1030nm 激光器主要由半导体 LD、光纤光栅、增益光纤、合束器、温控系统、驱动源等组成。激光器热源主要有 LD 以及驱动电源。激光器常温功耗为 45W，输出 10W 连续 1030nm 激光，产生热量 35W，其中，LD 产生的热量较大，约为 25W，剩余 10W 为电源产生，高温时，采用半导体制冷器 (Thermoelectric cooler, TEC) 对 LD 进行温控，要求 TEC 热面温度不超过 60℃，来保证 TEC 工作效率。其他器件几乎无热量产生。激光器 LD 位于壳体上层，电源位于壳体下层，且各器件直接固定于壳体之上，热源与壳体之间涂抹导热硅脂来进一步减小接触热阻^[12-13]。

利用 ANSYS 有限元分析软件进行激光器热分析，采用瞬态热分析的方法^[14-17]，检查激光器工作时各光学器件的温度是否符合使用要求。由于高温环境对激光器性能影响较大，因此热分析时，设定环境温度为+45℃，激光器每次工作时间为 10 分钟，网格划分完成后的有限元模型如图 5 所示。

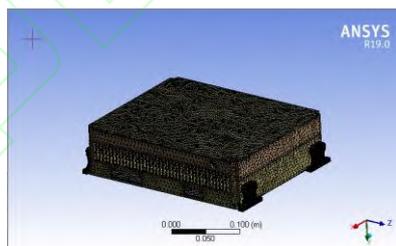


图 5 网格划分后的有限元模型

Figure.5 Finite element model after mesh

在划分完成后的有限元模型上施加边界条件，LD 施加 30W 热量，电路热源施加 10W 热量，散热翅片采用对流换热，环境温度为 45℃，对流换热系数为 35W/m².℃，工作时间为 10 分钟，每 30 秒读取一次最热点温度。对有限元模型进行求解，求解完成后的激光器热分析结果如图 6 所示

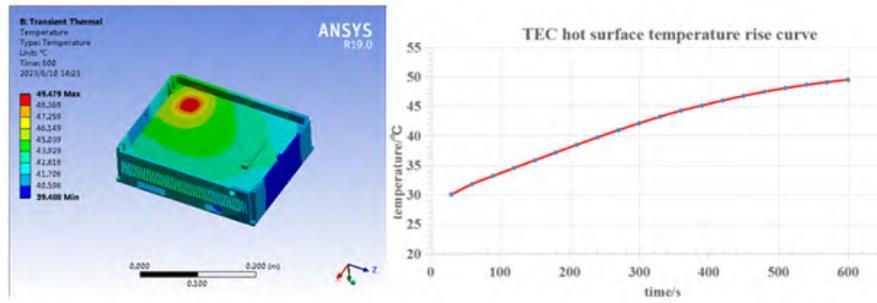


图6 激光器热分析结果

Figure.6 Results of laser thermal analysis

从分析结果可以看出，激光器最热点为 TEC 热面，温度约为 49.5℃，壳体温度为 39.5℃-49.5℃。TEC 热面有其规定工作极限相比的正余量，激光器热设计符合要求。

4 激光器随机振动分析

机载光纤激光器在飞机起降以及飞行过程中，会受到加速度过载、随机振动、冲击等环境影响，其中随机振动对激光器性能的影响最大，要保证壳体在随机振动环境下能够不被破坏且随机振动加速度响应要尽量小，保证激光器 LD 等关键光学器件不被振动损坏。机载平台随机振动试验条件^[18]如图 7 所示。

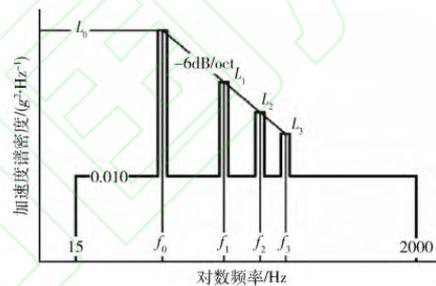


图7 机载平台随机振动试验条件

Figure.7 Random vibration test conditions of airborne platform

利用 ANSYS 有限元分析软件对激光器进行了随机振动分析，得到了激光器在机载平台下激光器的应力以及 LD 的随机振动响应曲线^[19-22]。分析结果如图 8 所示。

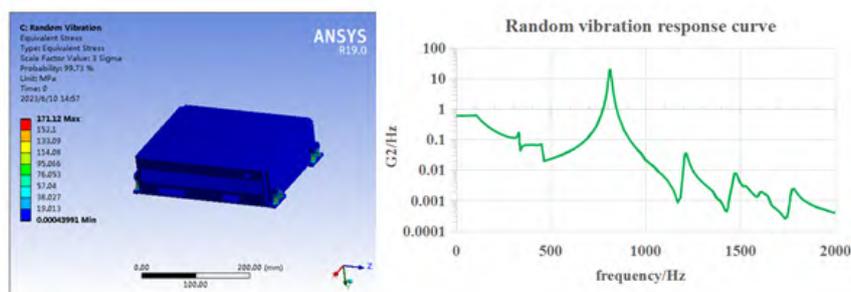


图8 随机振动结果

Figure.8 Random vibration result

从分析结果可知,激光器随机振动 3σ 应力最大值为 171MPa,远小于钛合金的许用应力,结构强度有很大的正余量。LD 随机振动响应峰值多发生在低频区间,说明柔性支架将高频能量衰减,起到了良好的减振效果,计算 LD 随机振动响应 Rms 值为 24.5g,小于规定的 30g,结果有很大的正余量,结构力学设计满足要求。

5 实验结果

根据项目要求,按照设计图纸对机载全光纤激光器样机进行了加工,对装配好的样机进行了热试验以及随机振动试验,如图 9 所示。



图 9 热试验以及随机振动试验

Figure.9 Thermal test and random vibration test

热试验中,试验箱温度设定为+45℃,并在 TEC 处设置温度监控点,用来监测 TEC 热面温度变化情况,检验激光器的散热能力。热试验记录了激光器工作 10 分钟 TEC 热面温度的变化情况。

随机振动试验中,在 LD 处设置加速度传感器,用来监测 LD 处随机振动加速度响应情况,热以及随机振动试验结果如图 10 所示。

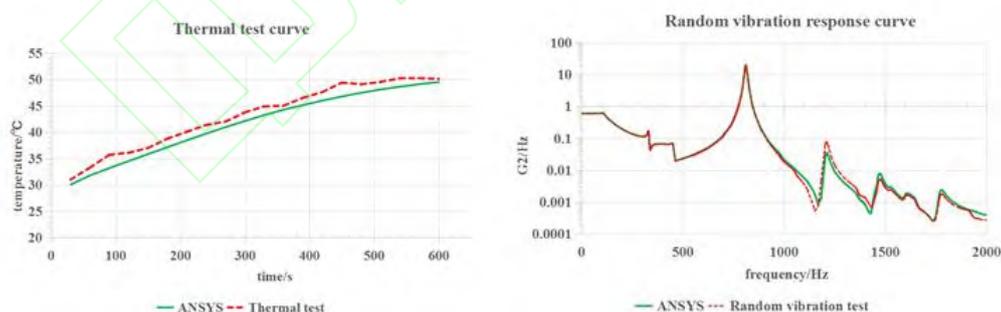


图 10 热以及随机振动试验结果

Figure.10 Thermal test and random vibration test result

利用功率计对激光器功率进行了测试,测试激光器的功率变化情况,测试时间为 10 分钟,每隔 30s 记录一次功率数值,激光器功率测试曲线如图 11 所示。

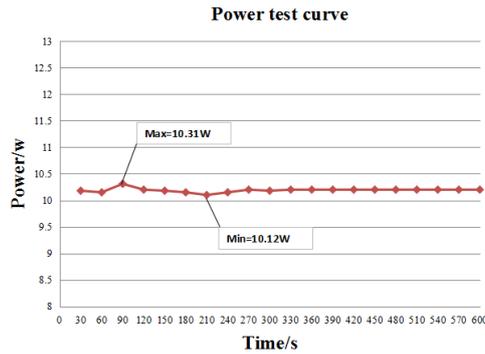


图 11 功率测试曲线

Figure.11 Power test curve

5.1 结果分析

(1) 从试验结果可以看出，试验与仿真结果存在一定误差，热试验结果中，TEC 热面升温速度要比仿真结果偏大，但总体趋势较为一致；随机振动试验结果与仿真结果在低频区间吻合度较好，高频响应存在一些误差，但总体趋势也较为一致。试验结果表明，激光器结构热、力仿真方法正确。

(2) 激光器热试验结果显示：激光器开始工作时，TEC 热面温度开始迅速上升，后来趋于平缓，激光器工作 10 分钟，TEC 热面温度由 25℃ 升至 50.4℃，与环境温度 45℃ 相比，温升约为 5℃，散热性能良好；TEC 热面温度与其规定工作极限 60℃ 相比，有很高的正余量。热试验结果与仿真结果吻合度较高，激光器热设计符合要求。

(3) 随机振动试验结果显示：激光器振动前后结构无明显破坏，激光器 LD 处随机振动加速度响应峰值均在低频区间，说明高频能量被有效衰减，柔性支架减振效果良好；试验显示随机振动响应均方根值为 25.01g，较仿真结果 24.5g 略高，但与其规定工作极限 30g 相比，有很高的正余量。试验数据与仿真数据吻合度较高，结构力学符合设计要求。

(4) 功率测试结果显示：激光器在前 300s 功率波动较大，这是由于激光器刚开始工作时，TEC 正在对 LD 进行控温，LD 温度尚不稳定，因此功率波动较大。300s 以后，LD 温控结束，功率趋于稳定。测试曲线显示，激光器在 90s 时检测到最大功率值为 10.31W，在 210s 时检测到最小功率值为 10.12W，功率不稳定性为 1.9%，满足输出功率大于 10W，功率不稳定性 $\pm 3\%$ 的要求。

5.2 仿真与试验误差讨论

(1) 热试验结果中，TEC 热面升温速度与温度要比仿真结果偏大，分析主要原因是在仿真过程中，TEC 与壳体热阻设置偏大，导致 TEC 热面热量传导至壳体上的热量稍小，从而使仿真温度较试验结果偏低。接下来需要对仿真参数进行一定的修正，通过调整 TEC 与壳体热阻，使试验结果与仿真结果进一步吻合。

(2) 随机振动试验结果中，LD 处随机振动加速度响应均方根值较仿真结果略高，扫频结果显示激光器基频比仿真时略高，说明仿真时激光器结构刚度偏小，分析主要有以下原因：(1) 仿真时摩擦系数设置可能偏小。柔性支撑架与壳体接触为摩擦接触，摩擦系数大小决定了结构刚度的大小，需要进一步调整摩擦系数，来修正仿真结果。(2) 仿真时系统阻尼系数设置偏小。系统阻尼系数大小同样决定了结构刚度的大小，仿真时按照工程经验进行了

阻尼系数的选取,可能存在一定误差。

在接下来的工作中,需要根据试验数据进一步修正仿真参数,使仿真结果与试验结果进一步吻合,确定仿真参数,为机载全光纤激光器正样机的研制提供可靠依据。

6 结论

本文设计了一款用于机载的 1030nm,输出功率>10W 的高功率、高稳定性的全光纤激光器壳体结构。壳体结构采用柔性支撑的减振设计,并通过壳体结构的合理设计,使激光器可以在温度-55+45℃,机载平台下保持正常运行。利用 ANSYS 有限元分析软件对激光器壳体进行了热分析与随机振动分析,分析结果显示:激光器壳体在+45℃下,激光器最热面温度为 49.5℃,温升约为 4.5℃,散热性能良好;在总均方根 10.77g 随机振动条件下,激光器最大 3 σ 应力为 171MPa,随机振动响应 RMS 值仅为 24.5g,壳体结构力学性能良好。按照设计图纸对机载全光纤激光器样机进行了加工,并进行了试验验证,试验结果表明:激光器壳体结构的散热性能以及力学性能完全满足设计要求,试验结果与仿真结果吻合度较高,试验与仿真结果为机载光纤激光器项目的具体实施提供一定参考。

参考文献

- [1]QU Y, NING Ch Y, ZOU Sh Zh, et al. Recent advances in nanosecond-pulsed Ytterbium-doped all-fiber lasers[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(6):209-222 (in Chinese)
曲研,宁超宇,邹淑珍,等.纳秒脉冲掺镱全光纤激光器研究进展[J].红外与激光工程,2022,51(6):209-222.
- [2]STEPHEN M. Fiber-based, laser transmitter technology maturation program for global spectroscopic trace-gas measurements[C]//2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. New York, USA: IEEE, 2011:32-38.
- [3]YU A W. Fiber lasers and amplifiers for space-based science and exploration[J]. Proceeding of SPIE, 2012, 8237: 823713.
- [4]LIN J Q, DAI Ch Sh, YAO P J, et al. Tunable single-wavelength and dual-wavelength ytterbium-doped mode-locked fiber lasers[J]. Laser Technology, 2023, 47(3): 301-304 (in Chinese).
林加强,戴川生,姚培军,等.单波长和双波长可调谐的掺镱锁模光纤激光器[J].激光技术,2023,47(3):301-304.
- [5]LIANG H, WEI F, SUN Y G, et al. A 1310nm Band Narrow Linewidth Hybrid Integrated Externally Cavity Semiconductor Laser on Fiber Bragg Gratings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 40-46. (in Chinese)
梁虹,魏芳,孙延光,等.基于光纤光栅的 1310 nm 波段窄线宽混集成外腔半导体激光器[J].中国激光,2021,48(20):40-46.
- [6]NING Y Zh, ZHANG P, HE Sh, et al. Progress and applications of 1.7 μ m waveband fiber laser[J]. Laser Technology, 2023, 47(2): 154-170 (in Chinese).
宁雨竹,张鹏,何爽,等.1.7 μ m 波段光纤激光技术研究进展及应用[J].激光技术,

- 2023, 47(2): 154-170.
- [7]ZHANG L, YU M, ZHENG Y, et al. Thermal simulation analysis and optimal design of miniaturized fiber laser [J]. *Electro-mechanical Engineering*, 2022, 38(1): 40-44 (in Chinese).
张琳,于淼,郑也,等.小型化光纤激光器热仿真分析及优化设计[J].*电子机械工程*,2022,38(1):40-44.
- [8]PENG X W, FENG Zh G, LI L B. Thermal analysis for the pump source of fiber laser based on FEM[J]. *Electro-mechanical Engineering*, 2015, 31(5): 27-30(in Chinese).
彭兴文,冯志刚,李立波.光纤激光器泵浦源有限元热分析[J]. *电子机械工程* 2015,31(5): 27-30.
- [9]GENG Y Y, XU G Sh, XIE G J, et al. Simulation analysis of the instability of the emission axis of the airborne laser finder /illuminator[J].*Laser & Infrared*, 2021,51(5): 640-645 (in Chinese).
耿园园,徐光烁,谢桂娟,等.机载激光测照器发射光轴不稳定性仿真分析[J].*激光与红外*, 2021,51(5): 640-645.
- [10]DORUK E, SLAVA L, FRANK K, et al. Highly reliable and efficient 1.5um-fiber-MOPA based, high power laser transmitter for space communication[J]. *Proceeding of SPIE*, 20014, 9081: 90810G.
- [11]LI L, WANG D, YANG H B, et al. Optimization design of flexible and damping support structure of space camera[J]. *Optical and Precision Engineering*, 2016, 24 (7): 1677-1684 (in Chinese).
李林,王栋,杨洪波,等.空间相机柔性减振支撑结构的优化设计[J].*光学精密工程*,2016,24(7):1677-1684.
- [12]YANG M J, ZENG Zh H, HAO J, et al. Thermal simulation and test analysis of an airborne electronic equipment[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2022, 51(11):190-193(in Chinese).
杨美娟,曾志华,郝靖,等.某机载电子设备的热仿真及试验分析[J].*机电工程技术*, 2022, 51(11): 190-193.
- [13]YANG L W, LI Zh L. Design of a flexible supporting structure based on finite element analysis[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2008, 25(1):49-52(in Chinese).
杨利伟,李志来.一种基于有限元分析的柔性支撑结构设计[J].*长春理工大学学报(自然科学版)*,2008, 25(1):49-52.
- [14]ZHANG X T, GUAN J. Thermal design and simulation of uav airborne electronic equipment [C]//*Proceedings of the 36th China (Tianjin) 2022 IT, Network, Information Technology, Electronics, Instrumentation Innovation Academic Conference*. Tianjin: Tianjin Institute of Electronics, 2022:242-245 (in Chinese).
张小彤,关佳.无人机机载电子设备热设计与仿真[C]//第三十六届中国(天津)2022 IT、网络、信息技术、电子、仪器仪表创新学术会议论文集.天津:天津电子协会, 2022:242-245.

- [15]LIU Y P, PENG X J, ZHAO G, et al. The analysis of thermal design and its simulation for air cooled YAG laser with the repetition of 50Hz[J]. Laser Technology, 2021, 45(6): 735-739 (in Chinese).
刘亚萍,彭绪金,赵刚,等. 重频50Hz风冷YAG固体激光器热设计及仿真分析[J]. 激光技术, 2021, 45(6):735-739.
- [16]HE Ch. Structural design and simulation analysis of an airborne electronic equipment[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2021, 44(3): 107-111(in Chinese).
何超. 某机载电子设备结构设计与仿真分析 [J]. 舰船电子对抗,2021,44(3):107-111.
- [17]QIAO Q, ZHAO H, XIE L Q. Heat dissipation design and optimization of air cooled all solid state laser[J]. Laser Technology, 2023, (in Chinese).
乔迁,赵虎,谢兰强.全固态风冷式激光器散热设计及优化[J].激光技术, 2023, .
- [18]ZHU Y Ch, SHI P J, CHENG C G, et al. The vibration testing requirements and related problems formilitary aircraft equipment (I):Vibration testing requirements and comparison of airborne equipment and external hanging of military jet and propeller aircraft in GJB 150.16/16A[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2016, 33(2):127-135(in Chinese).
祝耀昌,石鹏颀,程丛高,等. 军用飞机机载设备振动试验要求和有关问题的讨论(一):GJB 150.16/16A 军用喷气式飞机和螺旋桨式飞机机载设备和外挂的振动试验要求及对比分析[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(2):127-135.
- [19]MA X Q, CHENG W, REN Y, et al. Structural optimization design for laser surpport structure based on ANSYS Workbench [J]. Manufacturing technology and machine tool, 2020(1): 30-33(in Chinese).
马新强,成巍,任远,等.基于 ANSYS Workbench 的激光器壳体结构优化设计 [J].制造技术与机床, 2020(1):30-33.
- [20]JIA G N, LI B Q. Improvement design of vibration reduction and reinforcement for an airborne electronic Equipment [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2023, 52(4):11-15(in Chinese).
贾光南,李兵强.某机载电子设备的减振加固改进设计[J].机械设计与制造工程,2023,52(4):11-15.
- [21]GAO B X, TANG P, ZHAO J, et al. Fault analysis of random vibration test of electronic equipment on a UAV [J]. Envionmental Technology, 2023, 41(2): 29-34 (in Chinese).
高碧祥,唐鹏,赵瑾,等.某无人机载电子设备随机振动试验故障分析[J].环境技术, 2023, 41(2):29-34.
- [22]WU W Zh, CHENG L, ZHANG P, et al. Finite element analysis for stiffness and strength of electronic equipment of a space-borne radar[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2016,32(3):56-59.
吴文志,程林,张平,等.某星载雷达电子设备的刚强度有限元分析[J].电子机械

工程,2016,32(3):56-59.

中国知网