

文章编号: 1000-7032(2014)11-1382-06

激光及可见光双模导引头结构设计

韩 冰*, 武雁熊, 陈晓苹, 谷立山, 马洪涛

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 设计了一套用于导弹精确制导的激光及可见双模导引头,采用 RC 复杂化设计双路共用主、次镜和多次光路折转的形式来减小结构体积。激光光路设计焦距为 300 mm、视场为 0.6°,用于激光引导后最终目标的确认;可见光光路焦距为 100 mm、视场为 3°,用于较大区域内初始目标的搜索。设计过程采用计算机软件进行优化分析,总质量控制在 600 g 以内,在满足体积小、质量轻的同时确保了热稳定性和结构可靠性。环境试验结果表明,可见光路的光学传递函数优于 0.3@50 lp/mm,满足最终使用要求。

关键词: 激光; 可见光; 双模导引头; 环境试验; 光学传递函数

中图分类号: TJ765.3 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20143511.1382

Structure Design of Laser/Visible Dual-mode Seeker

HAN Bing*, WU Yan-xiong, CHEN Xiao-ping, GU Li-shan, MA Hong-tao

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding Author, E-mail: hanbing@ciomp.ac.cn

Abstract: Laser/visible dual-mode seeker used for precise guidance of missile was designed. In order to reduce the structure volume, RC complex structure of double-channel was used, which shared main mirror and secondary mirror together, and multiple-folding for light transforming was adopted. The focal length and field angle of the visible light path are 100 mm and 3° separately, which are designed for searching the initial goal of the larger region. The focal length and field angle of the laser light path are 300 mm and 0.6° separately, which are designed for confirmation of the final target guided by laser. The computer software was used to optimize the analysis of design. The total quality is less than 600 g. These characteristics of structure design make certain the thermal stability and structural reliability. The results of environmental tests show that the visible MTF is better than 0.3@50 lp/mm, satisfying the end requirements.

Key words: laser; visible; dual-mode seeker; environmental test; MTF

1 引 言

导引头是精确制导武器的“眼睛”,导引头的研制技术是导弹武器系统的核心内容之一。导引头性能的好坏直接影响精确制导武器的作战能力,西方发达国家早在上世纪 70 年代就开展了精

确制导武器的研发工作。在上世纪 90 年代的海湾战争中,精确制导武器充分体现了其打击能力及作战优势。自上世纪末开始,我国各相关研究所也陆续开展了导引头的研制工作。随着科技的飞速发展,单一模式的导引头已经难以适应未来战争需求,纷繁复杂的作战环境、日趋激烈的攻

安装在三叶板上。



图 4 三叶板组件的设计图

Fig. 4 Design of clover component

2.3.2 中桶组件的设计

中桶是主镜、三叶板组件、激光组件的安装基准,要求设计时保证较好的结构刚度。同时中桶也是温度补偿的主要部件之一,要求其相对三叶板有较小的线胀系数,因此材料选用 TC4 钛合金材料。为减轻重量,采用框架式的轻量化结构(图 5)。



图 5 中桶的设计图

Fig. 5 Design of buck component

为防止杂散光进入光路,中桶外框架处采用了 T700 碳纤维蒙皮,螺丝固定的方式。与三叶板链接处设计了定位子口,确保主、次镜同轴度。

主镜与中桶之间采用压框式安装。在加工过程中使用线切割的方式在中桶上加工出三组 120° 均布的狭缝,构成具有温度自适应功能绕性叶片结构。而中桶侧壁与主反射镜侧壁保留 0.1 mm 的间隙,均布 120° 垫衬聚四氟乙烯垫片,保证安装主镜时各向受力均匀,消除装配应力,在大角度倾斜时主镜面形精度无较大变化。

2.3.3 背板组件的设计

如图 6 所示,背板与总体设备连接,系统的全部重量最终均由背板支撑,因此需要较好的结构刚度。同时考虑温度变化引起背板变形而导致主镜面形的变化,材料采用与中桶一致的 TC4 钛合金材料。



图 6 背板组件的设计图

Fig. 6 Design of the backplane component

为了减轻背板质量,进行了适当的轻量化处理,采用了 8 根辐射筋板与 8 个减重孔的形式。

2.3.4 激光组件的设计

激光组件各光学件的空气间隔要求相对可见光组件低很多。为减轻重量,其主要部件采用密度较低的铝合金材料。第二折转镜采用了与第一折转镜类似的结构,镜筒与安装在中桶上的过渡法兰连接,激光探测器通过转接桶再与过渡法兰连接。具体结构如图 7 所示。

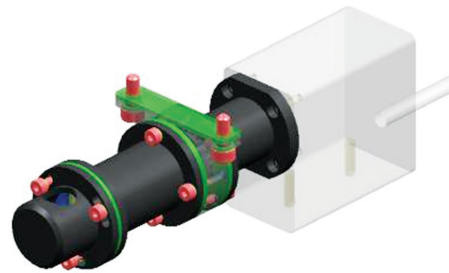


图 7 激光组件的设计图

Fig. 7 Design of the laser component

2.3.5 可见光组件的设计

如图 8 所示,可见光组件通过连接法兰与背板连接。由于设备工作环境温度变化范围可能较大,为保证可见光部分的成像质量,需要严格控制几个光学件间距,因此镜筒、隔圈等选用了线胀系

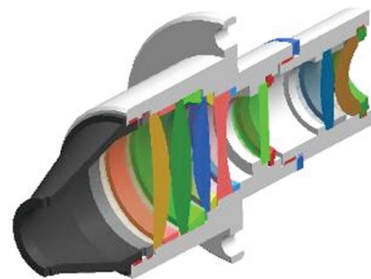


图 8 可见光组件的设计图

Fig. 8 Design of the visible component

数较低的 TC4 钛合金材料。为了方便装调采用了分体式结构,各光学元件间均合理设计了隔圈,同时依据光学设计数据设计了内遮光罩。

3 结构设计精度分析

3.1 结构稳定性分析

为检验系统结构设计的有效性及其合理性,采用 NX NASTRAN 软件对结构模型进行有限元分析,采用 10 节点 4 面体 CTETRA(10) 方式进行网格划分(图 9),同时对模型进行了理想化处理。

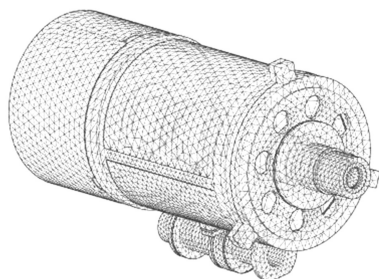


图 9 有限元网格划分
Fig.9 Finite element mesh

工况水平放置状态,主要载荷为自身重力、激光探测器模拟负载和可见光探测器模拟负载,约束条件为背板连接处固定约束(图 10)。

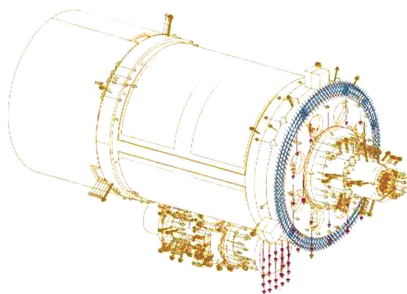


图 10 约束及载荷
Fig.10 Constraints and loads

可见光复合光学系统主要结构件组成为钛合金、铝合金和碳纤维材料。光学元件反射镜采用微晶玻璃材料,其余各选件以 K9 玻璃计算。

有限元模型采用直角坐标系,其中 X 轴为光轴方向,Y 轴为重力方向。图 11 为可见光复合光学系统总体变形云图。支撑结构的最大变形量为 0.44 μm,最大应力为 0.278 MPa,均在安全范围内。

如图 12 所示,主镜在各支持系统作用的最大变形为 4 nm。主要部件的变形情况:遮光罩 93 nm,三叶板 0.42 μm,中桶 93 nm,背板 2.6 nm。可见在总体连接件刚性足够好的前提下,各部分

组件在仅受重力的情况下变形均很小,基本不会对光学系统成像质量造成影响。

同时为了考核系统承受力学冲击的情况,对系统前 3 阶段振动模式进行分析,如图 13 所示,其一阶段频率为 307 Hz。

由上述分析认为,主镜支撑结构设计方案能够满足光学系统的性能指标要求,引入的面形误差没有超过误差分配树的极限值,主镜支撑方案

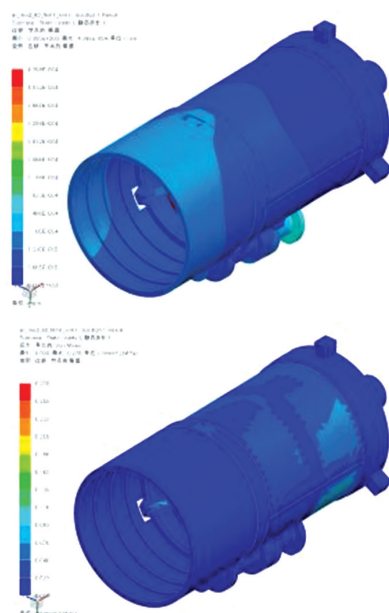


图 11 系统变形及应力分析
Fig.11 Deformation and stress analysis

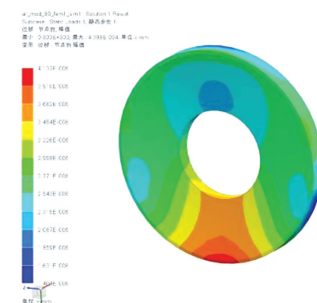


图 12 主镜变形分析
Fig.12 Deformation of the primary mirror

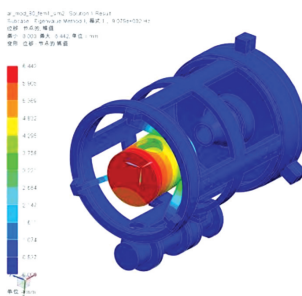


图 13 模态分析
Fig.13 Modal analysis

设计得当^[12-15]。

3.2 热稳定性分析

由于光学系统工作环境温度变化很大(极限温度 -40 ~ 60 ℃),为保证光学设计要求的主、次镜间距允差 ±0.02 mm(主、次镜间距 60 mm),需要采用热补偿设计。

主次镜支撑结构采用了无热化设计,其中主镜支撑部分采用 TC4 钛合金材料,次镜支撑部分采用 2A12 铝合金材料,如果完全无热化,理论长度分别为 100 mm 和 40 mm,兼顾考虑通光孔位和总重量,优化后实际尺寸分别为 98.45 mm 和 28.66 mm。

依据建立的有限元模型代入温度载荷,对可见光复合光学系统主、次镜间距变化关系进行分析,计算步长为 0.5 ℃,得到结果如图 14 所示。可见主次镜变化基本是线性的,主、次镜随温度变化的理论值为 0.32 μm/℃。-40 ℃最大变化为 12.59 μm,60 ℃最大变化为 18.77 μm。

如果不做温度补偿设计,主次镜间采用单一材料方案,以线胀系数较小的 TC4 计算,实际主次镜间距如图 15 所示。可见主、次镜随温度变化量为 0.66 μm/℃。-40 ℃最大变化 26.25 μm,60 ℃最大变化 39.42 μm。

因此,虽然没有做到完全温度补偿,但是已经较无温度补偿的结构形式有了较大的改观,能够满足光学设计提出的间距变化允差 ±0.02 mm 的要求。

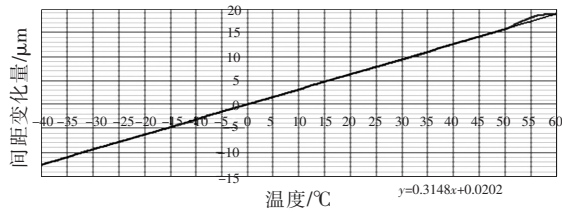


图 14 有温度补偿结构的主次镜间距随温度变化情况
Fig. 14 Distance change between primary and secondary mirror with temperature compensation

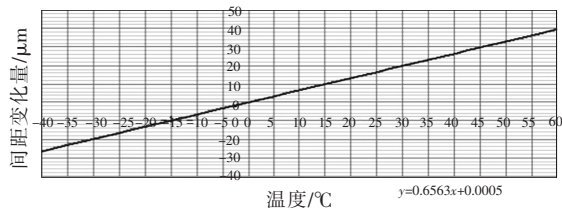


图 15 无温度补偿结构的主次镜间距随温度变化情况
Fig. 15 Distance change between primary and secondary mirror without temperature compensation

考虑到较大的温度变化可能会对主镜面形有较大影响,我们在主镜安装方式上采用了挠性机构,通过有限元软件分析 -40 ℃和 60 ℃对主镜面形的影响情况(图 16)。在剔除位移和倾斜影响后,-40 ℃和 60 ℃拟合后的面形精度(RMS)分别为 28 nm 和 35 nm,仍在可接受范围内。

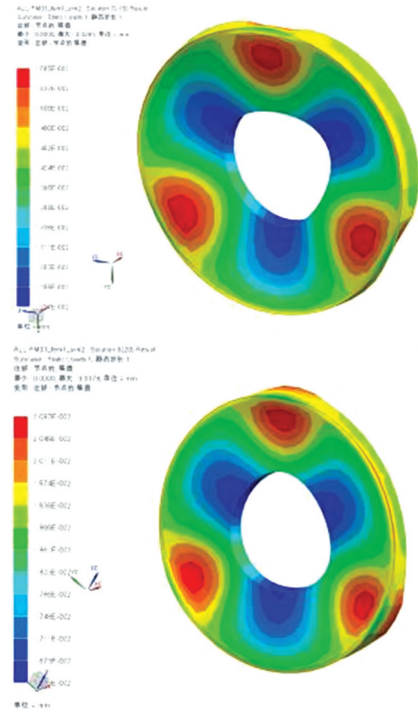


图 16 主镜温度形变云图

Fig. 16 Primary mirror temperature deformation nephogram

4 测试结果

系统装调完毕后对其激光光路和可见光光路各项技术指标进行测试,经冲击、震动和高低温试验,各项指标无明细变化,最终可见光路轴上光学传递函数为 0.42@50 lp/mm(图 17),0.7 视场光学传递函数为 0.30@50 lp/mm(图 18),能够满足使用要求。

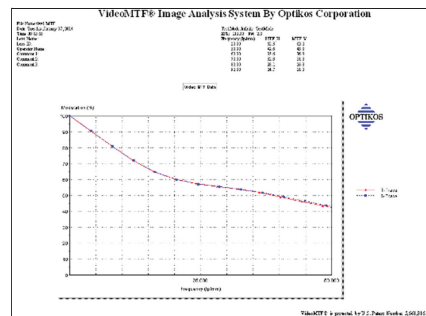


图 17 可见光轴上光学传递函数曲线
Fig. 17 Visible MTF on axis

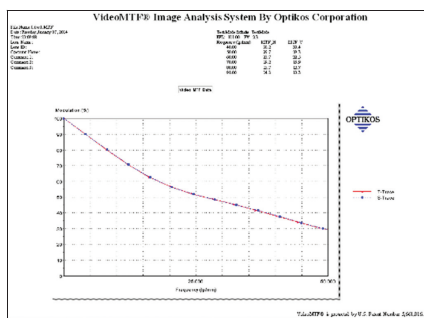


图 18 可见光 0.7 视场光学传递函数曲线
Fig. 18 Visible MTF off axis on 0.7 field view

5 结 论

从理论上对导引头的组成结构进行了论述,确定了光学及结构形式,通过 CODEV、UG 等计算机软件优化了各项系统参数。在此基础上,对激光、可见双模导引头的总体设计方案进行了深入研究,以现有的工程实践为基础,讨论了工程实现的可行性。以三维设计软件为基础进行了工程实践,并进行了有限元分析,证明了整体研究思路的可行性。目前,初样产品已经完成光机系统的加工及装配调试工作。环境试验考核和光学检验结果表明,该产品的各项指标能够满足使用要求。

参 考 文 献:

- [1] Li F W, Zhang Y Q, Pan G Q. Optical design of IR/laser dual-mode common aperture system [J]. *J. Appl. Opt.* (应用光学), 2012, 33(3):496-499 (in Chinese).
- [2] Luo H B, Shi Z L. Status and prospect of infrared imaging guidance technology [J]. *Infrared Laser Eng.* (红外与激光工程), 2009, 38(4):565-573 (in Chinese).
- [3] Wang L J, Zhang X, Yang H M, et al. Design of a compact infrared catadioptric system [J]. *J. Appl. Opt.* (应用光学), 2007, 28(3):288-291 (in Chinese).
- [4] Zhang Y M. *Applied Optics* [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2008.
- [5] Claps P, Cullen M, Harris D. Real-time image processing and data fusion of two-channel imaging laser radar sensor [J]. *SPIE*, 1992, 1533:281-287.
- [6] Kinglake R, Johnson R B. *Lens Design Fundamentals* [M]. 2nd. USA: Academic Press, 1978.
- [7] Wang C S, Yu S L, Gao S. A design of staring IR imaging system applied in precise seeker [J]. *Laser and Infrared* (激光与红外), 2007, 37(4):332-334 (in Chinese).
- [8] Di X G, Yao Y, Zhou F Q. Common aperture IR/laser dual-mode imaging seeker system [J]. *Infrared Laser Eng.* (红外与激光工程), 2005, 34(5):577-581 (in Chinese).
- [9] Liu R Q, Chen X M, Zhao J Q. Design of a compact infrared optical system [J]. *Laser and Infrared* (激光与红外), 2009, 39(4):419-422 (in Chinese).
- [10] Zuo B J, Kuang Y W. Optical design of the IR/laser dual-mode imaging seeker [J]. *Infrared Laser Eng.* (红外与激光工程), 2009, 38(3):495-499 (in Chinese).
- [11] Overbeck J A, Shea J J. MTF measurement technique for GOES imager [J]. *SPIE*, 1998, 3377:155-159.
- [12] Lin F T, Liu Z H. MWIR refractive/diffractive hybrid athermal optical system and its stray light analysis [J]. *J. Appl. Opt.* (应用光学), 2010, 31(5):833-837 (in Chinese).
- [13] Stann B, Abou-Auf A, Frankel S, et al. Research progress on scannerless ladar system using a laser diode transmitter FM/CW radar principles [J]. *SPIE*, 2001, 4377:12-22.
- [14] Kim S, Yang H, Lee Y, et al. Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems [J]. *Opt. Express*, 2007, 15(8):5059-5069.
- [15] Fischer R E, Tadic-Gabeb G B. *Optical System Design* [M]. New York: McGraw-Hill, 2004.



韩冰(1981-),男,吉林长春人,助理研究员,2004年于吉林大学获得学士学位,主要从事光机结构设计及光学系统像质评价工作。
E-mail: hanbing@ciomp.ac.cn