文章编号:1002-1582(2022)02-0135-04

长焦共口径光学系统设计、制造与集成技术

王璐1,祝洪祥2*

(1.海装沈阳局驻长春地区军代室,吉林长春 130033)(2.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:恶劣的航空机载环境对长焦距共口径光学系统提出了很高的要求,针对四个关键技术进行了研究,给出了 合理可行的解决方法。文章开展的多光谱共口径光学系统的设计使航空光电成像系统满足小型化和轻量化要求。在航 空机载环境温度变化范围内,提出的高陡度碳化硅反射镜非球面光学加工与检测方法保证光学元件的曲率半径和面形 精度保持稳定,能够实现优良的成像质量。应用碳化硅反射镜柔性支撑技术使光学元件及支撑结构具有较高的结构强 度、刚度,同时能够保证光学系统结构尺寸稳定性要求。实际的光学系统的波前携带着许多误差,使用计算机辅助精密 装调技术,能够实现高成像质量光学系统的装调。

关键 词:共口径;光学系统;光学加工;柔性支撑;精密装调

中图分类号: TP74 文献标识码: A

DOI:10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2022.02.001

Design, manufacture and integration technology of long focal Common-aperture optical system

WANG Lu¹, ZHU Hongxiang²*

Military Representative Office of Shenyang Marine Equipment Bureau in Changchun, Changchun 130033, China)
 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanicsand Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun130033, China)

Abstract: The harsh airborne environment has put forward high requirements for the long focal common-aperture optical system. Four key technologies are studied, reasonable and feasible solutions are given. The design of the multi-spectral common-aperture optical system developed enables the airborne optical imaging system to meet the requirements of miniaturization and lightweight. In the range of airborne ambient temperature variation, the high-gradient silicon carbide aspheric surface optical processing and detection method proposed ensures that the radius of curvature and the accuracy of surface shape of optical elements remain stable and can achieve excellent imaging quality. The application of silicon carbide reflector flexible support technology enables the optical elements and support structure to have higher structural strength and stiffness, and at the same time can ensure the dimensional stability of the optical system structure. The wavefront of the actual optical system carries a lot of errors. In this paper, the computer-aided precision mounting technology is proposed to implement the mounting of the optical system with high image quality.

Key words: common-aperture; optical system; optical processing; flexible support; precision assembly and adjustment

* 通讯作者: 947154223@qq.com

收稿日期: 2021-01-30; 收到修改稿日期: 2021-08-24

基金项目:国家自然科学基金面上项目(62175233)

作者简介:王璐(1980一),男,工程师,从事航空装备、航空机载设备、光学装备研制生产质量监督研究。namoo_lyx@163.com 祝洪祥(1995一),男,研究实习员,硕士,从事航空机载设备结构设计研究。

0 引 言

恶劣的航空工作环境要求长焦距共口径光学系 统需满足以下条件:一方面载机提供给航空光电成 像系统的尺寸空间及重量非常有限,这要求航空光 电成像系统体积小、重量轻,满足载机空间尺寸及重 量要求;另一方面为保证光学系统成像质量,要求在 航空机载环境温度变化范围内光学元件的曲率半 径、面形精度保持稳定及结构稳定性要求。

美国开展了一系激光通信、激光测距一体化技 术相关研究,研制了激光通信与激光测距一体化终 端,成功的将蒙娜丽莎图像传送到月球轨道航天器, 成功验证了激光测距与通信共口径设计的可行 性^[1,2]。中科院上海技物所设计的一种共用离轴三 反光学系统的双通道成像光谱仪,光学系统两个通 道共用一个离轴三反射光学系统^[3]。郭帮辉设计了 近紫外、可见光和近红外波段共用同一透镜组三波 段共口径光学系统,该系统结构简单,适用于对系统 体积、重量和机动性能要求严格的场合^[4]。

李俊峰等通过研究双摆动技术抛光离轴非球面 的工艺,提出了用双摆动抛光加工离轴非球面的原 理,分析了双摆动抛光过程中抛光盘与工件的相对 运动特性及各个工艺参数对相对运动路径的影 响^[5]。胡洋等研究最小尺寸约束的变密度拓扑优化 法结合多目标集成优化设计方法,进行空间离轴微 晶反射镜及背部支撑结构的优化设计^[6]。Hagyong Kihm 等设计了一种自适应 Bipod 侧边支撑系统, 在主反射镜侧边柱面上用环氧树脂均布粘接三个柔 性支撑安装凸台,其面形精度均方根 RMS 值可达 10nm 以下^[7].李叶文针对大尺寸长条反射镜的支 撑问题,基于运动学等效原理将双轴柔性支撑的柔 性环节等效为一端固支的柔性短直欧拉梁,提出了 一种适用于该反射镜的双轴柔性支撑结构^[8]。

长春光机所研制了 FSGJ-II 非球面数控加工 中心,其采用了6轴联动系统,首次采用磨头转速控 制的方法对光学面形进行修正,有效的提高了离轴 非球面元件的加工精度^[9,10]。中科院南京天文所利 用计算机辅助装调方法对一个口径为 205mm 的离 轴卡式系统进行了装调,中心视场波像差达到了很 高的水平^[11]。

本文针对某长焦距共口径多光谱成像系统,梳 理了在研制过程中涉及的几项关键技术,针对每项 关键技术开展了技术研究。

1 光学系统设计主要关键技术

1.1 多光谱共口径光学系统轻小型化设计

在体积(500mm×500mm×500mm)情况下,光 学设计需同时实现多光谱、长焦距(红外 f = 1000mm)、大口径(g=250mm)、高像质、小型化、轻 量化、光学二级视轴稳定光路等功能。传统独立透 射式光学结构,即可见光、激光、红外相互独立的光 学镜头,受光学材料对成像谱段光透过率的限制,难 以实现透射式共口径成像,且系统在体积、重量,成 像质量等方面均不可能满足总体要求。而反射式结 构对成像光谱无限制,可以实现宽光谱成像,因此可 以实现多光谱共口径成像。

本文提出将可见光与红外通过共用一个高倍率 无焦望远物镜实现光路结构的小型化设计。在平行 光路中,可见光与红外通道共用一个两维快速摆扫 平面反射镜,实现光学二级高精度视轴稳定,通过分 色镜,利用中继透射式成像组件补偿轴外像差,使可 见光与红外成像质量达到衍射极限。通过分析和比 较,共口径技术是实现多光谱、长焦距、大口径光学 系统轻小型化的最有效途径,同时也产生了光学系 统设计、光路布局和灵巧分光等不可避免的设计难 题。可见光和红外光线经过主次镜之后,通过准直 光路,构成望远系统,最终光学设计结果如图1所 示。



图 1 光学系统设计结果

1.2 高陡度碳化硅非球面光学加工与检测

为了减少光学元件数量,缩短光学筒长,简化光 学系统结构,提高系统性能,本文提出采用高陡度碳 化硅材料的非球面反射镜元件,与常用的微晶和单 晶硅等反射镜材料相比,碳化硅的硬度和弹性模量 具有其他材料无可比拟的优势,由此带来其光学加 工难度很大。传统非球面加工只针对低频误差和高 频误差的加工和检测,缺少对中频误差的加工和检 测方法,这使得高陡度非球面在计算机的控制下不 断向理想面形收敛的局部加工过程中,因矢量变化 率大,产生诸如磨头去除特性改变等技术难题,使得 反射镜的面型精度难以达到高精度要求(低于 16nm)。

本文提出基于多模式组合加工技术使用多个抛 光头并行工作,通过不同尺寸、路径、驻留时间等工 艺参数的合理结合,在整个光学加工过程中逐步对 低频误差和高频误差进行收敛,同时持续性的抑制 中频误差的产生,并且对已经产生的中频误差进行 修正,从而达到对低中高全频段波像差的控制。与 传统的单模式加工相比,多模式组合加工技术按照 不同抛光工具和路径所产生的不同材料去除率的空 间频域特点,将原始的误差进行空间频域的误差分 解,针对不同频域误差处理进行工艺规划及优化,并 将不同工具的加工效果进行融合,有效的降低低频 误差、控制中频误差,达到优化最终面形误差的频域 分布,实现全频段误差质量控制的目的,从而提高元 件的光学成像性能。

全频段误差检测及评价技术是本文创造性地提 出并开始使用的波像差抑制技术。其核心是采用了 波像差梯度偏离值作为评价基准。波像差梯度反映 的是实际光线与理论方向的差别,其光强分布的加 权中心对应的就是实际像点的能量中心。以此能量 中心作为评价基准的波像差梯度偏离值可以更好的 直接表征光学系统的成像性能。通过自主研发的波 像差分析软件对波像差度偏离值进行有效率的梯度 分布以及梯度偏离值进行分析,可以很方便的指导 光学加工对波像差梯敛,从而直接改善成像性能。 主镜的最终加工检测结果及波像差梯度分布如图 2 所示,可以发现峰值 PV 优于 $\lambda/12$,均方根 RMS 优 于 $\lambda/50(\lambda=632.8nm)$,Strehl 比达到了0.992,优于 衍射极限。

1.3 碳化硅反射镜柔性支撑技术

针对载机振动、过载、大温度梯度的环境条件, 综合考虑反射镜尺寸、支撑结构刚度、温度适应性、 装配工艺性等多方面因素,采取背部三点柔性支撑 结构,同时采用与主镜材料线膨胀系数接近的殷钢 材料作为支撑点衬套材料,解决线膨胀系数不匹配 带来的热应力变形问题,并可有效消除装调应力的 影响。柔性结构可通过微小的变形吸收应变能,隔 离安装应力的影响,同时能有效吸收冲击和减小振 动带来的不良影响,补偿温度变化时产生的热应力。

主镜支撑系统采用镜坯背部支撑,采用背部三 点支撑,核心技术点在于支撑点的确定。支撑点需 要根据力热耦合作用下仍能保持高精度模型的基本



图 2 光学元件波像差检测结果及波像差梯度分布 原则仿真确定。柔性支撑可以减小装配应力与热应 力传递到反射镜上。反射镜组件支撑由 4 部分组 成:嵌套、柔节、修调垫及背板,如图 3 所示。主镜 与嵌套之间用特种胶固封,嵌套与柔节之间用螺钉 固连,再通过精修修调垫使柔节固定在背板上。



图 3 主镜支撑系统

通过仿真分析和试验验证,主镜光机结构在重 力和 10℃均匀温度变化工况下,主镜的面形误差 (均方根 RMS)不大于 14nm(小于 λ/40 RMS),如 图 4 所示,可以满足光电系统高分辨率成像要求。

1.4 计算机辅助精密装调技术

为满足航空光电成像统远距离高分辨成像要求,对光学系统的成像质量要求已达到衍射极限,特别是复杂多光谱共口径折反式光学系统,传统的光 学装调方法难以实现。

实际的光学系统的波前携带着许多误差,其主 要来源有如下几方面:首先光学设计系统不可避免 的存在的残余误差,其次,在实际的加工过程中,光



(a) X向重力载荷





图 4 主镜面形精度云图

(c) Z向重力载荷

提出一种计算机辅助装调理论方法与工艺技术。利用 ZYGO 干涉仪,可以对光学系统成像质量实时检

测,依据测得的实际波相差数值,进而利用计算机软

件对波相差进行处理和优化,可以给出系统各个光

学元件的调整方向和调整量。对光学系统成像质量

实时检测,得到整个光学系统的波像差,再使用计算

机软件对得到的波像差进行处理和优化,并给出系

统各个光学元件明确的调整方向和具体的调整量,

最后结合实际装调经验,通过修研相应的结构甚至

光学件调整各个光学元件到最佳位置,使光学系统

成像质量以及各元件的相互位置可以接近于理论设

计指标。利用上述技术方法完成的光电成像系统整

机装调后,实验室静态分辨率达到了 90lp/mm,接

近 CCD 的像元极限分辨率 91lp/mm,整机成像实

验可以证明光学系统的装调质量良好。光学成像设

备的两镜光学系统装调完成后其波像差 RMS 值优

于1/12, 接近衍射极限水平, 连接校正镜组后全视

场 RMS 值优于 1/10λ, 如图 5 所示。

学元件的外形尺寸都会存在误差,唯一的可控因素 在于在加工完成后,可以实测其加工尺寸。再者,固 定光学元件的相关机械元件也存在加工误差,光学 元件的间隔和中心轴都会受其影响。最后就是装调 误差,比较典型的就是光学元件的位移、偏心、倾斜 等。通常光学设计的结果经过优化后其误差非常 小,不会对系统有影响,真正影响系统成像质量的误 差主要来源于上述的后三项,误差整体对光学系统 像质劣化,最直接的表征就是实际测试的传递函数 值较设计值要下降很多。

当一个元件的装调有偏差(间隔位移、偏心等), 且调节比较困难时,可以利用其他元件的装调参数 (间隔位移、偏心等)来补偿,以满足整个系统的像质 要求,通过计算机的模拟分析得出了光学元件之间 误差具有互补性。在光学系统的装调过程中,借助 计算机仿真分析,介入到装调的实时调整中,实现高 质量光学系统的装调。

针对长焦距距折反式航空光电成像系统创造性



(a) -1 视场干涉图





(c) +1 视场干涉图

图 5 连接校正镜组后各个视场的干涉图

2 结 论

本文提出将可见光与红外通过使用同一个倍率 无焦望远物镜实现光路结构的共口径技术,是实现 多光谱、长焦距、大口径光学系统轻小型化的最有效 途径。基于多模式组合的加工技术能够实现对低中 高全频段波像差的控制,达到全频段误差检测及评 价的结果。反射镜衬套通过胶粘与反射镜固定在一 138 起,通过设计胶层的粘接面积和胶层厚度,消除温度 变化时衬套、光学材料、胶层热膨胀系数的不匹配带 来的热应力。针对长焦距距折反式航空光电成像系 统创造性提出一种计算机辅助装调理论方法与工艺 技术,调整各个光学元件的相互位置接近理论设计 值,从而保证光学系统具备高像质,通过实例验证了 该方法的有效性。

(下转第188页)

- [7] Zi Lan, Deng Junhong, et al. Facile metagrating holograms with broadband and extreme angle tolerance[J]. Light Science & Applications,2018,7(2):78.
- [8] Walter Felicitas, Li Guixin, Meier Cedrik, et al. Ultrathin nonlinear metasurface for optical image encoding[J]. Nano Letters, 2017,17(5):3171-3175.
- [9] Wang Z, Yi S, Chen A, et al. Single-shot on-chip spectral sensors based on photonic crystal slabs[J]. Nature Communications,2019,10(1):1-6.
- [10] Edward H. Adelson James, R Bergen. The plenoptic function and the elements of early vision[J]. Computational Models of Visual Processing1991:3-20.
- [11] Yuyi Feng, Paul Leiderer, Ruizhe Zhao, et al, Giant polarization anisotropic optical response from anodic aluminum oxide templates embedded with plasmonic metamaterials[J]. Optics Express,2020,28(20):29513-29528.
- [12] Ruan Z, Qiu M. Enhanced transmission through periodic arrays of subwavelength holes: the role of localized waveguide resonances[J]. Physical Review Letters, 2006, 96(23):233901.
- [13] Krishnan A, EbbesenT W, PendryJ, et al. l.Evanescently cou-

pled resonancein surface plasmonenhanced transmission [J]. Opt.Communicate,2001,200(1):1-7.

- [14] Janssen O T A, Urbach H P. On the phase of plasmons excited by slitsinametal film[J]. Opt. Express, 2006,14(24):11823—11832.
- [15] 宋晨智,石晶,任玉,等. 短波红外单波长滤光膜系模型设计
 [J].光学技术 2020,46(04):398—403.
 Song Chenzhi, Shi Jing, Ren Yu, et al. Design of short wave infrared single wavelength filter film system model[J].Optical Technology,2020,46(04):398—403.
- [16] 邵伟佳. 基于表面等离子体激元的光学滤波片与完美吸收超材料的设计及数值模拟[D].中国科学技术大学,2014.
 Shao Weijia. Design and numerical simulation of optical filter and perfect absorption metamaterial based on surface plasmon
 [D]. University of Science and Technology of China,2014.
- [17] Genet C, Ebbesen T W. Light in tiny holes[J]. Nature, 2007, 445(7123):205-212.
- [18] 刘志锋. 亚波长孔阵列的异常光学、声学透射[D].南京大学, 2011.

Liu Zhifeng. Ab normal optical and acoustic transmission of sub wavelength pore ar rays[D]. Nanjin University,2011.

(上接第138页)

参考文献:

- [1] H Hemmati, K M Birnbaum, W H Farr, et al. Combined laser communications and laser ranging transponder for Moon and Mars[J]. Proc. SPIE, 2009, 7199:71990N.
- [2] Sun X, Skillman D R, Hoffman E D, et al. Free space laser communication experiments from Earth to the Lunar Reconnaissance Orbiter in lunar orbit[J]. Optics Express, 2013, 21(2): 1865-1871.
- [3] 姚波,袁立银.双通道成像光谱仪共用离轴三反射光学系统的 设计[J]. 红外技术,2013,35(7):419-424.
 Yao Bo, Yuan Liyin. Optical design of a dual-channel image spectrometer sharing the off-axis TMA system[J]. Infrared Technology,2013,35(7):419-424.
- [4] 郭帮辉,孙强,王志,等. 300~1100nm 多波段成像光学系统设计及杂光分析[J].中国光学与应用光学,2010,3(5):474-479.
 Guo Banghui, Sun Qiang, Wang Zhi, et al. Design of 300~1100nm multiband optical imaging system and its stray light analysis[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics,2010, 3(5):474-479.
- [5] 李俊峰, 宋淑梅. 应用双摆动技术加工离轴碳化硅反射镜[J]. 光学精密工程,2012,20(8):1669—1676.
 Li Junfeng, Song Shumei. Manufacture of SiC off-axis aspheric mirrors by double-swing method[J]. Optics and Precision Engineering,2012,20(8):1669—1676.
- [6] 胡洋, 李季, 贾学志, 等. 超轻离轴反射镜及柔性支撑优化设计 [J]. 光学学报,2020,40(19):170-179.

Hu Yang, Li Ji, Jia Xuezhi, et al. Optimal design of lightweight off-axis mirror and flexible support [J]. Acta Optica Sinica, 2020,40(19):170-179.

- Kihm H, Yang H S. Design optimization of a 1-m lightweight mirror for a space telescope[J]. Optical Engineering, 2013, 52 (9):1-10.
- [8] 李叶文. 空间大尺寸长条反射镜轻量化及其柔性支撑技术研究
 [D]. 北京:中国科学院大学,2020.
 Li Yewen. Research on lightweighting and flexural mounting technology of space-borne large size[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences,2020.
- [9] 郑立功,常军,张学军,等.大数值孔径、高次非球面透镜的加 工与检测[J].光学技术,2003,29(5):584—586.
 Zheng Ligong, Chang Jun, Zhang Xuejun, et al. Fabricating and testing of a large NA, even high order aspheric lens[J]. Opitcal Technique,2003,29(5):584—586.
- [10] 程灏波,张学军,郑立功,等.非球面研磨阶段检测技术的优化[J]. 航空精密制造技术,2002,38(6):8—11.
 Cheng Haobo, Zhang Xuejun, Zheng Ligong, et al. Optimization on testing technology for aspherics grinding[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology,2002,38(6):8—11.
- [11] 罗森,朱永田. 计算机辅助装调方法在离轴卡塞格林系统中的应用[J]. 光学技术,2008,34(4):514—517.
 Luo Sen, Zhu Yongtian. Application of computer-aided alignment to off-axis cassegrain system[J]. Optical Technique, 2008,34(4):514—517.