

中波红外弹载共形光学系统研制

魏群¹, 王超¹, 姜湖海¹, 朱瑞飞^{1,2}, 贾宏光¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以优化系统整体性能为目的, 针对弹载跟踪系统, 设计了一种基于共形光学整流罩的红外光学系统。首先, 根据载弹信息, 通过数值仿真计算及相关验证风洞试验, 得到共形整流罩外曲线; 通过优化分析, 得到整流罩内曲线。应用 Wassermann-wolf 方程, 结合 Zernike 多项式像差分析方法, 设计两片固定式校正片, 用于校正共形整流罩带来的附加像差。选择 F=2 的制冷型中波红外探测器, 设计折反式成像光学系统, 通过 ZEMAX 软件优化共形光学整体系统, 并进行了公差分析。共形光学系统焦距 120 mm, 冷阑效率 100%, 设计传函在各视场范围内均大于 0.6, 公差分析后, 均大于 0.4。通过成像测试试验, 结果表明, 共形光学系统成像质量良好, 满足跟踪设备对光学成像系统的要求。

关键词: 共形光学; 整流罩; 校正片; 像差分析; Zernike 多项式

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)05-1298-04

Manufacture of mid-wave infrared missile used conformal optical system

Wei Qun¹, Wang Chao¹, Jiang Huhai¹, Zhu Ruifei^{1,2}, Jia Hongguang¹

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to optimize the system's total performance, aiming at missile tracking system, a kind of infrared optical system with the principle of conformal optics was designed in this paper. Firstly, according to the missile's flying information, through numerical simulation computation and relative wind tunnel experiments, the outer figure of the conformal dome was gotten. By optimizing the optical path differences, the inside figure of the conformal dome was obtained. By using the Wassermann-wolf equations and the Zernike aberration analyzing method, the fixed two pieces correctors were designed for correcting the aberration induced by conformal dome. The detector used in this system was a F=2 mid-wave infrared detector made by Sofradir in France. The imaging optical system was designed in refraction/reflect structure, then by using software ZEMAX the final system was gotten. Finally, the tolerance analysis was done. The focal length of this conformal optical system was 120 mm, the cold diaphragm efficiency was 100%, the MTF (modulation transfer function) of all fields are all above 0.6.

收稿日期: 2012-09-06; 修订日期: 2012-10-04

基金项目: 国防预研项目(51301060207)

作者简介: 魏群(1983-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事共形光学及气动光学方面的研究。Email: wei.q@hotmail.com

Even after the tolerance analysis, the MFT value was also above 0.4 which is good enough for manufacture. The results of imaging tests show that this kind of conformal optical system is good in imaging.

Key words: conformal optics; dome; corrector; aberration analysis; Zernike polynomial

0 引言

光学应用通常受到设计和制造光学系统实际极限带来的困难和局限性的限制。光学设备(特别是军用光学设备)经常会由于需要适应不利的环境而工作在非最佳方式下,从而导致系统整体的工作效率降低。文中讨论的光学系统工程研制方法中,光学元件的外部形状已经进行了调整以满足优化系统整体工作环境效应时对形状的要求。共形光学的使用可以提高系统整体性能,但需要进行设计、制造、测试和装配方面的技术开发。以此为背景,文中开展了共形光学系统的初步工程研制工作。

共形光学最初的研究是于 1996 年开展的,由美国亚利桑那大学、罗彻斯特大学与 Raytheon 公司等多家单位联合开展。先后在共形光学的应用、设计、制造和测试领域开展大量的理论与工程研究,并于 2001 年公开其样机及试验照片。

国内多家单位也开展了大量的共形光学相关技术的研究。在共形光学设计方面,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所等多家单位开展了共形光学的设计研究,分别取得了良好的设计结果^[1-4];同时,应用衍射光学技术,对共形光学系统进行了消色差设计^[5-6];在共形光学的加工方面,国防科学技术大学研制的抛光机完成了共形整流罩的加工;在共形光学的检测方面,中国酒泉卫星发射中心的贾立德和国防科学技术大学的戴一凡都应用了坐标拼接的方法,结合三维测量仪,完成了共形整流罩的面型检测^[7-8]。作者在共形整流罩的设计方面,也开展了相关的工作,设计了长径比为 1:1 的共形整流罩^[9]。

文中在上述研究基础上,开展了共形光学系统的设计,针对长径比为 1:1 的椭圆型共形整流罩及制冷型中波红外探测器,设计了焦距为 120 mm, $F=2$, 冷阑匹配效率为 100% 的共形光学系统。通过对光学系统进行公差分析,设计相关框架结构,研制了共形光学中波红外相机。通过室内成像及室外民航客机跟踪试验,验证了光学系统成像质量良好,满足系统要求。

1 共形光学系统设计

1.1 整流罩设计

共形光学整流罩的设计主要分为外曲线设计,内曲线设计及厚度设计。外曲线设计通过数值仿真及风洞试验,得到外曲线整流罩为长径比为 1:1 的椭圆,椭圆的半径为 30 mm,圆锥系数为 -0.75。整流罩的内曲线设计主要以减小由外曲线影响产生的光程差为目的,同时,为了减轻加工与检测的难度,内曲线规定为椭圆型,最终设计得到内曲线半径为 27.5 mm,圆锥系数为 -0.76。厚度设计主要考虑整流罩的应用环境,设计为 5 mm。整流罩的具体设计详见参考文献[9],这里不详细叙述。

1.2 校正片选型

由于整流罩为椭圆型,其内部光学系统在转动过程中,整流罩对应区域的厚度和曲率均发生变化,对内部光学系统产生附加像差,因此需要设计相应的校正装置,校正由整流罩带来的附加像差。

校正片的类型有很多种,包括固定式校正片、拱形校正片、Zernike 楔形镜校正片及变形镜校正片,校正片示意图如图 1 所示。

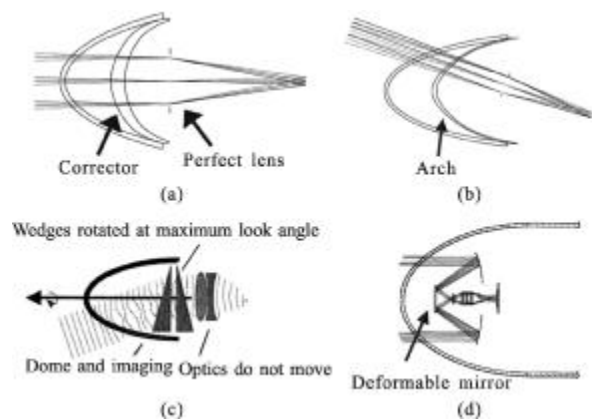


图 1 不同类型校正片结构示意图

Fig.1 Different kinds of corrector

其中,图(a)为一片式固定校正片,图(b)为旋转拱形校正片,图(c)为两片相对旋转的 Zernike 光楔,图(d)采用可变形的次镜做为校正片。

校正片类型的确定主要参考两个因素：校正系统的技术成熟度和工程可靠性要求。根据目前国内实际的技术能力及工程样机的可靠性要求，选择固定式校正片做为校正系统。

1.3 校正片设计

校正片的设计采用 Wasserman-wolf 方程求解。Wasserman-wolf 方程是 1948 年由 G.D.Wasserman 和 E.Wolf 发表的关于非球面的设计方法，该方法从理论上能够校正系统的球差和彗差。假设系统中存在两个独立并且连续的非球面，根据正弦条件，建立关于入射光和出射光的两个一阶偏微分方程组。通过一些标准的数值方法如 Runge-Kutta 方法，求解偏微分方程，最后将结果拟合成光学设备能加工的曲线。Wasserman-wolf 方程^[10]表示如下：

$$\frac{dz_1}{df} = - \left[\frac{N_1 R_z - N_0 R \cos U_0}{N_1 R_y - N_0 R \sin U_0} + \tan U_0 \right]^{-1} \left(\frac{dh_1}{df} + z_1 \frac{d \tan U_0}{df} \right) \quad (1)$$

$$\frac{dz_2}{df} = - \left[\frac{N_1 R_z - N_2 R \cos U_2}{N_1 R_y - N_2 R \sin U_2} + \tan U_2 \right]^{-1} \left(\frac{dh_2}{df} + z_2 \frac{d \tan U_2}{df} \right) \quad (2)$$

式中： N_0 、 N_1 、 N_2 是沿光线前进方向通过的介质的折射率； U_0 是入射光线与光轴的夹角； U_2 为出射光线与光轴的夹角； R 为光线与两个表面交点间的直线距离； R_z 是其沿 z 方向的距离； R_y 是其沿 y 方向的距离； h_1 、 h_2 为光线与主线的交点距离光轴的长度； d 为主点之间的距离。

1.4 成像光学系统设计

成像系统采用折反混合二次成像光学系统，反射式系统采用卡塞格林式结构，一次成像后，由后面的折射式系统成像在中波红外探测器的靶面上。

同时，折射式光学系统的设计应满足两点要求：系统在工作温度范围内无热差，系统的冷阑匹配效率为 100%。最后，将计算所得初始结构输入光学设计软件，优化得到设计结果。共形光学系统光路图如图 2 所示。

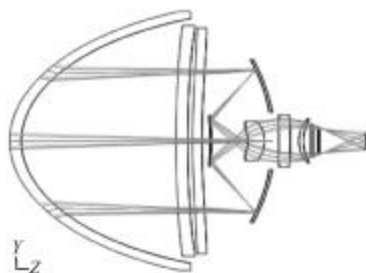


图 2 共形光学系统光路图

Fig.2 Figure of conformal optical system

成像系统技术指标如下：工作波段为 3.7~4.8 μm ；焦距为 120 mm；通光口径为 60 mm；F 数为 2；视场角为 3.6°。

共形光学系统传递函数如图 3 所示。

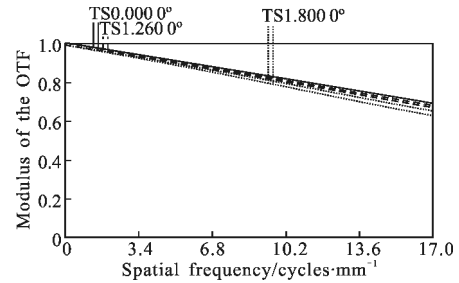


图 3 共形光学系统传递函数图

Fig.3 MTF figure of conformal optical system

1.5 公差分析

理论的设计结果与实际加工的系统之间存在差异，为了保证光学系统加工装调后仍能满足系统的性能要求，对上述设计的光学系统进行公差分析。公差设置为面型误差，原件误差及装调误差，根据现在的国内加工和装调水平，文中系统设置的公差如图 4 所示。



图 4 系统公差设置

Fig.4 Tolerances data

应用 ZEMAX 软件进行公差分析，分析结果如图 5 所示。

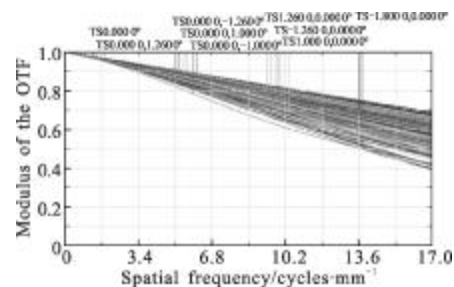


图 5 公差分析后系统传递函数图

Fig.5 MTF figure after analyzing tolerances

根据上面仿真结果,公差分析后,系统的传递函数最差也可达到0.4,满足系统成像要求。

2 成像测试实验

为了测试光学系统的设计结果,验证其成像效果,对共形光学系统进行成像测试。测试项目主要有两个:室外对民航客机的跟踪测试及室内不同框架角成像测试。试验装置如图6所示。



图6 共形光学系统试验装置图

Fig.6 Equipments of conformal optical system experiments

跟踪民航客机测试结果如图7所示。其中,图(a)为飞机离共形光学镜头距离较近时的靶面图像;图(b)为飞机飞离成像镜头时的靶面图像,位于图中中间部位的白色物体为飞机,位于图左下部位的是树。室内成像测试结果如图8所示。图中分别表示出在不同框架角下的成像照片。

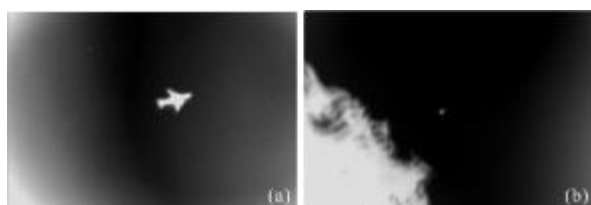


图7 民航飞机跟踪图

Fig.7 Photo of tracking plane

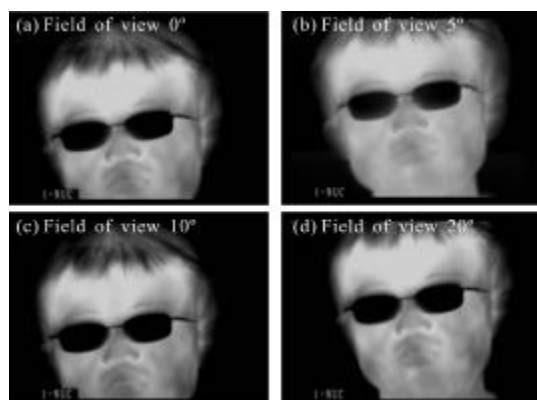


图8 室内成像测试图

Fig.8 Photo of inside imaging test

3 结论

文中研制了一种共形光学系统,经过一些成像测试试验,验证共形光学系统的光学成像质量清晰,符合设计结果。

共形光学系统是一种新型的光学系统,这种光学系统的设计改变了传统的以光学主导的设计方法,变成以系统为主导的设计目标。共形光学技术的研究,将提高很多光学仪器(特别是军用光学仪器)的整体性能,但共形光学系统的设计、加工、检测及装调对目前的光学技术人员都是一项新的挑战。

参考文献:

- [1] Zhang Xuecheng, Xu Rong, Liu Li. Application of conformal optics on seeker [J]. Ordnance Industry Automation, 2010, 29(4): 30-37. (in Chinese)
- [2] Sun Jinxia, Sun Qiang. Stray light out of IFOV in conformal optical system [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(2): 225-228. (in Chinese)
- [3] Li Dongxi, Lu Zhenwu, Sun Qiang, et al. Design of conformal optical system based on real ray tracing [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(5): 834-838. (in Chinese)
- [4] Jiang Yang, Sun Qiang, Sun Jinxia, et al. Design of infrared staring conformal optical system with wide field of view [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6): 1575-1580. (in Chinese)
- [5] Sun Jinxia, Sun Qiang, Fang Wei. Conformal optical system aberration correction with later holding fixed corrector [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 1005-1009. (in Chinese)
- [6] Sun Jinxia, Liu Jianzhuo, Sun Qiang, et al. Athermal design for hybrid refractive/diffractive conformal optical system [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 792-797. (in Chinese)
- [7] Jia Lide. Coordinate measurement of steep conformal optics [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18 (4): 792-797. (in Chinese)
- [8] Jia Lide, Wang Jiawu, Li Ting, et al. Application of profile matching method in ultra-precise coordinate measurement of optical aspherics [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2010, 46(3): 12-17. (in Chinese)
- [9] Wei Qun, Ai Xingqiao, Jiang Huhai, et al. Optimizing design of dome figure for supersonic seekers [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(2): 384-385. (in Chinese)
- [10] Texas Instruments. Wassermann-wolf algorithm [R]. US: Texas Instruments Technical, 1997: 22.