



共形光学系统设计研究*

The Research of Conformal Optical System Design

常军¹ 冯萍¹ 何伍斌^{2/1} 北京理工大学光电学院 2 华北光电技术研究所

摘要: 共形光学整流罩在保证光学指标的前提下,与后端的其他结构外形轮廓平滑连接,从而提高了飞行器空气动力学的性能,在航空航天领域具有重要的应用价值。然而,采用特殊面型的整流罩给共形光学系统的像差校正以及加工、检测方面带来了极大的挑战。本文首先分析了共形整流罩像差特性,并在此基础上介绍了两种典型的光学设计。

Abstract: A conformal dome is typically an optical window that conforms smoothly to the external shape of a system platform to improve the performance of aircraft aerodynamics, based on the premise of conformal optical system to ensure the optical indicators. And it has important in the field of aerospace. However, adopting domes with special surfaces brings great challenge to the aberration correction, processing and detection. This paper first analyzes the conformal fairing aberration characteristics. Then it introduces two typical optical designs.

关键词: 共形光学;整流罩;像差特性;光学设计

Keywords: conformal optics, domes, aberration characteristics, optical design

0 引言

随着高速飞行器的不断发展,对其空气动力学性能及光学性能要求也越来越高,共形光学技术应运而生。传统飞行器的光学整流罩一般为球形头罩,它的光学系统的设计、加工和检测技术已经很成熟,但是没有从空气动力学性能考虑,飞行器高速飞行时,球形整流罩就会暴露其劣势,产生很大阻力的同时产生很高的热量,阻碍了飞行器的飞行速度,光学系统的成像质量也大幅度降低。而在共形光学系统中,首要的就是共形光学整流罩。共形光学整流罩首先考虑的是与飞行器的外形结构平滑地连接以改善空气动力学性能,其次才是符合光学性能。共形整流罩采用的是流线型的非球面,可以是抛物面、椭球面以及二次圆锥曲面等,既可以同轴应用也可以是离轴部分。由于共形整流罩的特殊

面型,它将带来大量不规则的像差,在设计、加工与检测方面都给设计者带来了极大的挑战。因此,共形光学成为了国内外光学制造技术的重点课题。

国内对共形光学的设计研究相对起步比较晚,北京理工大学光电工程系较早的对共形光学系统展开了设计研究,长春光机所、国防科技大学等多家单位都开始从事共形光学系统的研究^[1-3]。

1 整流罩像差分析

为了更好地描述共形光学系统和传统光学系统的像差区别,下面以具有不同整流罩的光学系统为例,分析和比较不同面型整流罩带来的像差特性。

由于跟踪视场变化范围较大,所以各项像差的变化受其影响比较大。瞬时视场一般比较小,对像差造成的影响比较小。通常在像差分析中,从软件的计算

速度和分析的简洁性上考虑,一般不计算瞬时视场对像差造成的影响,仅取瞬时视场的中心点的光线进行像差的计算。为了准确分析整流罩所引入的像差特性,并排除其他因素的干扰,后续成像光学元件通常设置为理想透镜。

在以下的像差分析中,理想透镜需要进行旋转,以完成系统对不同跟踪视场的扫描成像,因此系统的建模需要在多重结构下进行。为了便于比较几种典型整流罩光学系统的像差特性,规定以下系统中所共同选用的参数为:

1) 工作波长为 $4\mu\text{m}$; 2) 整流罩厚度为 4mm ; 3) 系统的F系数为2; 4) 整流罩的材料为 ZnS ; e. 跟踪视场角为 $0^\circ\sim 50^\circ$ 。

1.1 同心半球形光学整流罩像差分析

在传统的光学系统中,通常采用半球形的整流罩,半球形整流罩在设计、加工和检测等技术上都已经相对成熟。

半球整流罩的整个系统都是一个旋转对称的系统,不存在偏心和倾斜。图

* 基金项目:“十一五”优秀航空科学基金(20060112012)项目资助。

1为理想透镜在所有跟踪视场下成像时的系统图。

为了分析系统的像差特性,将系统在出瞳处的波像差用泽尼克(Zernike)边缘多项式进行拟合,这项工作可在光学设计软件的分析功能中完成^[3-5]。为了分析不同种类的像差随跟踪视场角的变化情况,通常需要做出二者的函数关系曲线图。

根据泽尼克边缘多项式的前16项在出瞳处对波前像差拟合的结果,得知只有Z1,Z4,Z9以及Z16这几项的系数是非零的,且当跟踪视场角变化时,这些像差基本不变,如图2所示。

1.2 共形光学整流罩像差分析

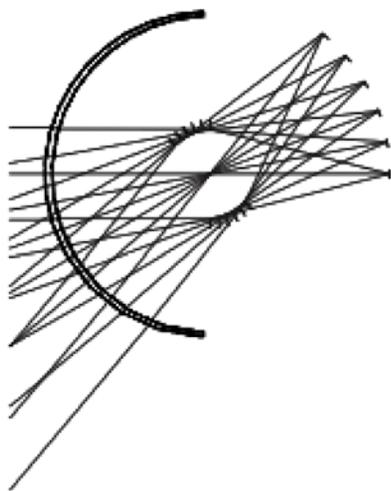


图1 同心半球整流罩的成像系统图

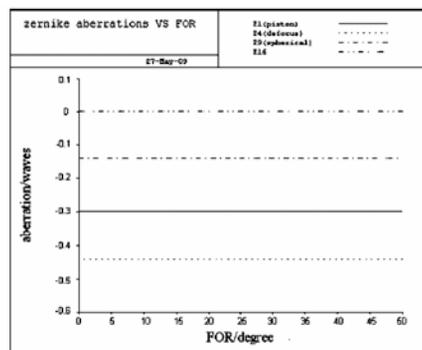


图2 同心半球整流罩系统的泽尼克像差曲线

在共形光学的像差分析中,泽尼克多项式是用来进行波前分解的常用工具。二次曲面整流罩的形状可由多种不同的复杂数学方程来描述。本文选用较为具有代表性的椭球面共形光学整流罩作为研究对象。

虽然椭球形共形光学整流罩的表面面型是轴对称的,但是当后面的成像光学系统对不同的目标进行跟踪扫描时候,所构成的光学系统将不具有轴对称性。因此,整流罩表面为系统带来显著的像散和彗差等轴外像差,并且它们的大小随着跟踪视场的变化而产生非线性变化。

图3为三阶以上各项泽尼克像差随着跟踪视场的函数变化曲线。与偏心球形整流罩类似,椭球共形整流罩也为系统引入各种随跟踪视场的变化而产生非线性变化的动态像差,其中量值较大仍为像散(Z5)和彗差(Z8)。此外,球差也有微小的变化,但没有像散和彗差的变化显著。当跟踪视场为0°时,共形光学系统为轴对称系统,所以,此时所呈现出来的像差特性类似于同心球形整流罩系统。而随着跟踪视场的增大,整流罩越来越趋向于柱面的一部分,这时其像差特性又与偏心球形整流罩类似,除了低阶像差之外,其高阶像差也是非零的,并且随着跟踪视场的变化而产生非线性变化^[4-7]。

2 典型的共形光学系统设计实例

2.1 含抛物面整流罩光学系统设计

本方案设计的参数如下:整流罩选为抛物型,长

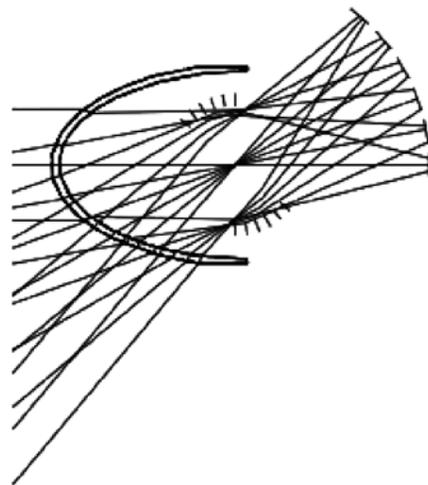


图3 FR=1.0的二次曲面共形整流罩

径比2,底面直径140mm,厚度5mm。图5为系统结构图,图6为MTF曲线。从图中可以看出,系统成像质量已接近衍射极限,满足要求。由此证明抛物面可以很好的应用于导引头整流罩光学系统的设计^[8]。

2.2 偏心倾斜光学系统设计

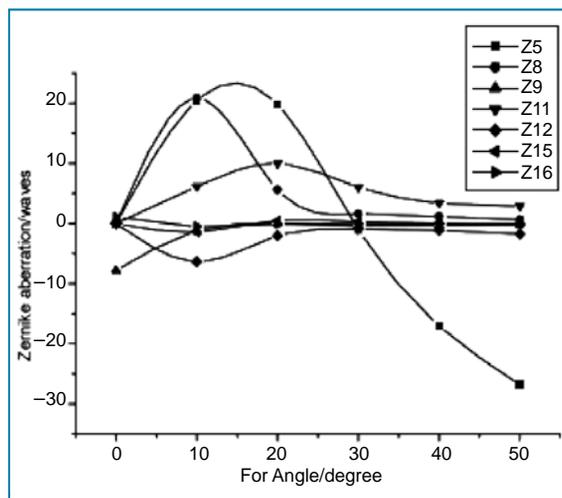


图4 FR=1椭球共形整流罩的泽尼克像差随跟踪视场的变化曲线

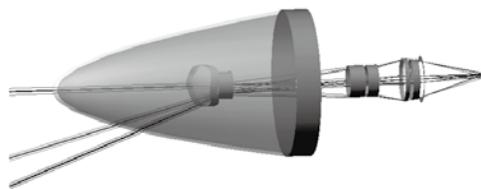


图5 系统结构图

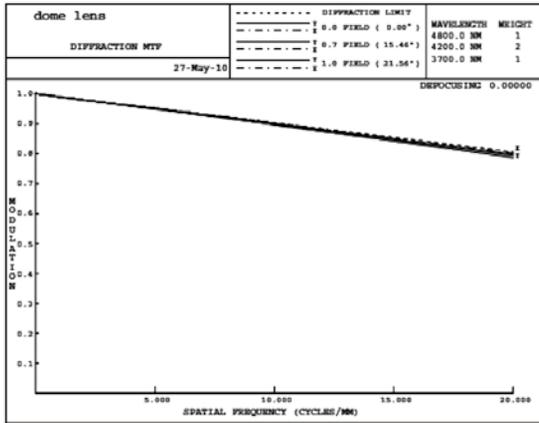


图6 MTF曲线

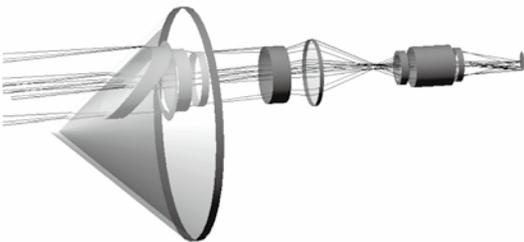


图7 系统结构图

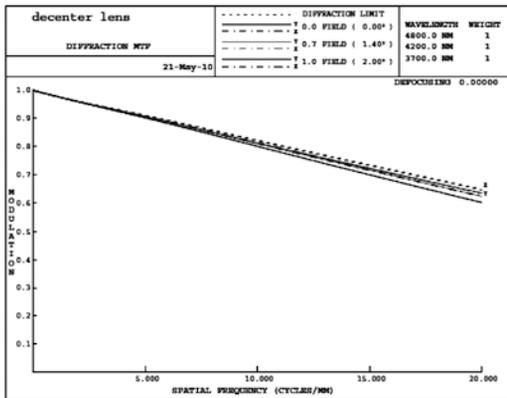


图8 MTF曲线图

本方案^[8]采用的探测器是 320×240 元制冷型红外探测器,像元尺寸为 $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$ 。整流罩选为圆锥面,长径比为1.2,底面直径为100mm,厚度为4mm,偏心量为20mm。

图8为各个视场下系统的MTF曲线。由图可知,系统在 20lp/mm 达到0.601,接近衍射极限的0.631。图9为各

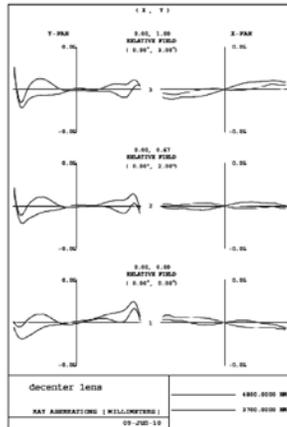


图9 垂轴像差曲线

波长各视场下的垂轴像差曲线图,从图中可以看出,慧差和像散已校正到很小。从各个图中可以得出,系统在整这谱段和视场内成像质量接近衍射极限,成像质量满足要求。

3 总结与展望

本文对共形光学系统的整流罩像差进行分析,并设计了传统共轴和偏心两个光学系统,通过不同的矫正器都很好地校正了系统的像差,提高了系统的光学性能。

多年来,国内外多家研究机构在进行共形光学系统的设计、性能分析和检测等工作。我们也在共形光学设计方面提出了很多新的思路,并针对不同的应用设计了不同面型的共形光学系统。然而考虑系统的实际需求和加工、检测的难易程度以及系统的稳定性,采用常规轴对称非球面透镜作为基本校正器的基础上,针对具体应用附加其他矫正器进行系统方案设计,将更切合工程需求。

参考文献

- [1] 李林,刘家国,李卓等.共形光学设计研究[J].光学技术,2006,32:509-515.
- [2] 李东熙,卢振武等.共形光学系统设计研究[J].红外技术,2008,30(3):128-132.
- [3] Blake C, Dean M, James M. Aberrations of Optical Domes. International Optical Design Conference 1998 [C]. Proc. SPIE, 1998, 3482:48-61.
- [4] 常军,刘莉萍等.含特殊整流罩的红外光学系统设计[J].红外与毫米波学报,2009,28(3):205-210.
- [5] Whalen M R. Correcting variable third order astigmatism introduced by conformal aspheric surfaces [J]. SPIE, 1998, 3482:62-73.
- [6] Knapp D J. Fundamentals of conformal dome design [J]. SPIE, 2002, 4832:394-409.
- [7] 程德文,常军等.特殊整流罩窗口的非对称像差研究[J].光学技术,2006, 32(8):362-368.
- [8] 何伍斌.变焦距共形红外光学系统的设计研究[J].红外与激光, 2012, 42(8):914-916.
- [9] 常军,何伍斌,宋大林.含非球面整流罩的大视场扫描红外光学系统[P],中国专利:201110150431,2012-01-18.

作者简介

常军,教授,博士生导师,主要从事光电系统设计、检测和光电对抗等领域研究;

冯萍,硕士研究生,主要从事光学设计研究;

何伍斌,工程师,主要从事光学设计研究。

红外探测器技术航空科技重点实验室

Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Infrared Detector

红外探测器技术航空科技重点实验室于2012年经中国航空工业集团公司批准成立，并正式投入运行，依托单位为中航工业空空导弹研究院。该实验室的研究方向有：

- 阵列焦平面探测技术
- 双色及多光谱探测技术
- 低温与真空技术
- 探测器仿真与测试分析技术

实验室主要承担国防科技与型号发展和未来武器装备研制所需的红外探测器基础理论、应用基础和关键技术研究任务。通过构筑先进探测器预先研究平台，突破大阵

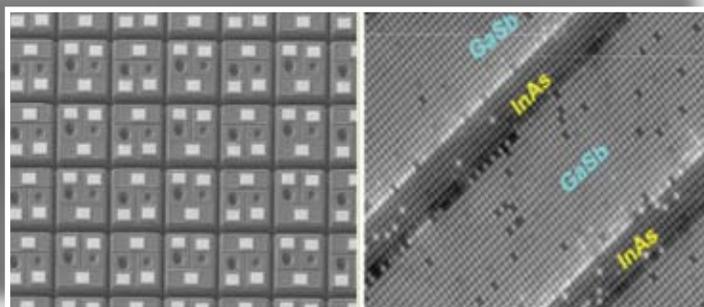
列焦平面探测器关键技术，探索多光谱探测器技术，推动红外制导武器与机载光电设备跨越式发展。

目前，实验室承担着多项国家科研任务，固定科研人员30人，建筑面积7000m²，其中超净厂房3000m²，配备分子束外延系统、激光脉冲沉积系统、电感耦合等离子体反应离子刻蚀系统等设备25台（套），设备资产6000多万元。

重点实验室将致力于推动探测器探索性、创新性的应用基础研究和关键技术研究，以引领探测器行业技术发展为目标，不断培养探测器领域的领军人才和中坚力量，为武器装备做出贡献。



红外探测器技术航空科技重点实验室主任 樊会涛



双色超晶格探测器芯片及原子层界面



320 × 256焦平面探测器



快速制冷器