

引用格式: SUN Yanling, LI Jiangbo, CAI Xin, et al. Design of Diffractive Optical System Conformal to Fairings (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(10):1022001

孙艳玲,李江波,蔡鑫,等.与整流罩共形的衍射光学系统设计(特邀)[J].光子学报,2021,50(10):1022001

与整流罩共形的衍射光学系统设计(特邀)

孙艳玲,李江波,蔡鑫,廖家莉

(西安电子科技大学 物理与光电工程学院,西安 710071)

摘要:针对口径为 300 mm 的三种不同面型整流罩,利用衍射光学元件实现了整流罩像差校正。进一步设计了后端成像系统,与像差校正后的整流罩组成共形衍射成像系统。该系统在 1.5~1.6 μm 波段范围、 $\pm 1^\circ$ 瞬时视场、 $\pm 20^\circ$ 扫描视场内实现了良好的成像质量。

关键词:衍射元件;共形光学系统;光学系统设计;整流罩;像差

中图分类号:O435.2

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215010.1022001

Design of Diffractive Optical System Conformal to Fairings (Invited)

SUN Yanling, LI Jiangbo, CAI Xin, LIAO Jiali

(College of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The diffractive optical element is designed to correct the aberration on the inner surface of the fairing of 300 mm aperture and three different shapes. The imaging system is also designed and the well imaging quality obtained for $\pm 1^\circ$ instantaneous field of view and $\pm 20^\circ$ scanning field of view in the wavelength range of 1.5~1.6 μm .

Key words: Diffractive optical element; Conformal optical systems; Optical design; Fairing; Aberration

OCIS Codes: 220.2740; 220.4610; 120.4610; 120.4570

0 引言

共形光学是指在整流罩满足空气动力学性能的前提下实现高质量成像。随着整流罩面型由球面发展为二次曲面或高次曲面,整流罩的像差也变得越来越复杂,使得光学系统很难实现良好的成像质量,因此必须对整流罩的像差进行校正^[1-3]。目前的校正方式主要是采用折射式校正器,其与整流罩构成共形光学系统。这种方式可以使系统的成像质量有明显的提升,但同时增加了光学系统的质量、限制了系统的扫描视场。相较于折射式元件,衍射元件也可以实现对任意波像差的补偿,而且具有重量轻、易于批量加工的特点^[4-6]。如果将衍射元件应用于共形光学系统,可以在提高光学系统成像质量的同时降低总系统的质量,这对于飞行器、共形制导等装备来说具有非常重要的意义。

将衍射元件应用于共形光学系统最早是由 FISCHER R E 等提出的,将整流罩的内表面加工成二元衍射表面,根据衍射元件来对入射波前进行相位补偿,从而实现整流罩像差的校正^[7]。20 世纪末期,在美国国防高级计划局和美国军事导弹研究发展工程中心的共形光学技术研究计划支持下,研究人员通过对整流罩像差的分析 and 整流罩加工技术的研究,2001 年初步完成了共形导引头的设计和制造,并取得了良好的成像质量^[8-10]。

国内对于共形光学的研究起步较晚。中科院长春光机所对整流罩的像差做了详细的分析,并通过设计

基金项目:国家自然科学基金(No. 62005207)

第一作者:孙艳玲(1971—),女,副教授,硕士,主要研究方向为光学信息处理、光学相控阵技术。Email: ylsun@mail.xidian.edu.cn

收稿日期:2021-07-20;录用日期:2021-09-01

<http://www.photon.ac.cn>

校正器对椭球形整流罩的像差进行了校正^[11-14]。哈尔滨工业大学和北京理工大学对二次曲面型整流罩的像差特性进行了分析^[15-17]。孙金霞等将衍射元件应用于共形光学系统中,通过在折射式校正器上设计衍射元件,更好的校正了系统的像差^[18];2010年,他们将衍射元件设计于椭球形整流罩内表面,设计出了折-衍混合消热差的共形光学系统^[19]。与整流罩共形的衍射光学系统研究在国内外均处于起步阶段,目前主要针对椭球形整流罩,进行了共形衍射光学系统的设计和验证,而对于其他二次曲面共形衍射系统的研究工作较少。

本文针对椭球形、抛物面形和双曲面形三种不同的面型,在整流罩内表面设计衍射光学元件,对三种整流罩的像差进行校正;在此基础上设计与三种整流罩共形的光学成像系统,以MTF为评价标准,对系统在±20°扫描视场下的成像质量进行评价。

1 整流罩模型及衍射元件的设计理论

二次曲面共形整流罩的面型主要包括椭球形、抛物面形和双曲面形整流罩等,数学模型可以表示为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)cr^2}}$$

式中, c 是该曲面的曲率; r 为径向坐标; k 为二次曲面的系数。 k 的取值决定了面型的形状;当 $k=0$ 时,二次曲面为球面; $-1 < k < 0$ 时,二次曲面为椭球面; $k=-1$ 时,二次曲面为抛物面; $k < -1$ 时,二次曲面为双曲面,如图1所示。

衍射元件是指基于光的衍射理论,通过在基底材料上设计微纳结构,利用光的衍射来实现对光束相位改变的光学元件。旋转对称的衍射面的相位函数可以表示为

$$\phi = m \sum_i^N A_i \rho^{2i}$$

式中, A_i 是衍射相位系数, m 是衍射级次, N 是衍射元件的环带个数。通过改变衍射系数可以获得预期的透射波前,且衍射元件可以在任意基底材料上进行设计和制作,因此可将衍射元件设计在整流罩的内表面,利用衍射元件对整流罩不同扫描视场的像差进行校正。采用衍射元件的共形光学系统的示意图如图2所示。

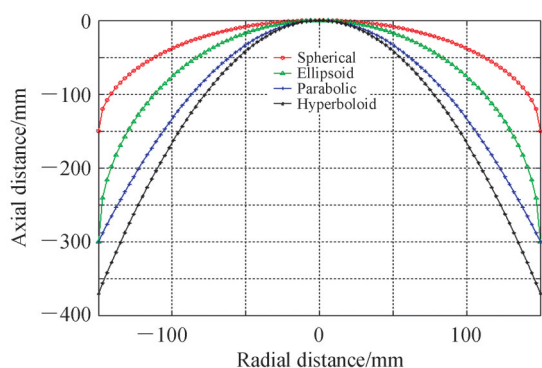


图1 不同二次曲面的整流罩形状

Fig.1 Fairing shapes of different quadric surfaces

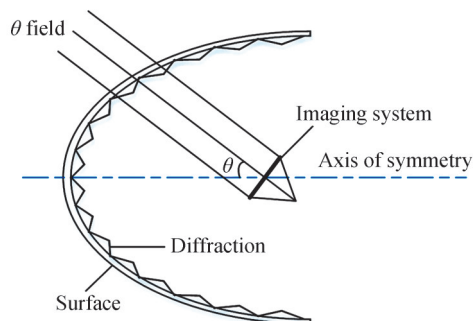


图2 共形衍射光学系统系统图

Fig.2 Schematic diagram of conformal diffracted optical system

在本文的仿真设计中,整流罩的材料选择氟化镁,整流罩口径大小为300 mm、厚度为5 mm。针对上述三种不同面型的整流罩,实现对整流罩像差的校正。在进行整流罩像差时,由于整流罩在非零视场参与成像的部分失去旋转对称性,因此利用Zernike多项式对不同扫描视场内的像差进行表述。对于初级像差,Zernike多项式的分析主要集中前9项,表示为

$$\begin{aligned} W(\rho, \theta) = & Z_1 + Z_2 \rho \cos \theta + Z_3 \rho \sin \theta + Z_4 (2\rho^2 - 1) + \\ & Z_5 \rho^2 \cos 2\theta + Z_6 \rho^2 \sin 2\theta + Z_7 (3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta + \\ & Z_8 (3\rho^3 - 2\rho) \sin \theta + Z_9 (6\rho^4 - 6\rho^2 + 1) \end{aligned}$$

式中, Z_5 代表像散, Z_8 代表彗差, Z_9 代表球差,这三项对成像系统的影响较大,主要分析这三种像差。在进行优化时,将这三项作为优化的主要目标,其他像差为次要目标,通过优化衍射元件最终实现对整流罩的像

差。为了保证不同波长经过衍射元件的衍射效率,将衍射元件的衍射级次设置为1,不同波长的衍射效率如图3所示。图3表明在衍射级次为1时,衍射元件在各个波长的衍射效率在99.6%以上,说明对成像质量的影响不大。

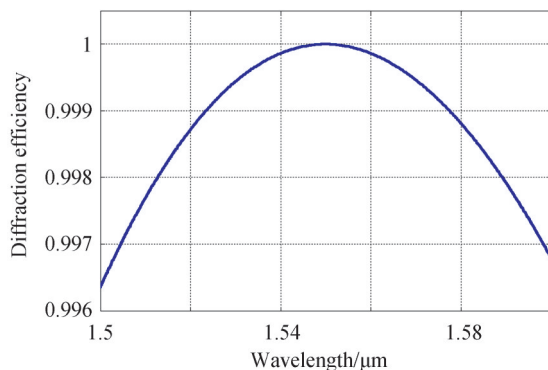


图3 不同波长的衍射效率
Fig.3 Diffraction efficiency vs wavelength

2 整流罩的像差校正

2.1 椭球形整流罩的像差及校正

椭球形整流罩共形的光学系统如图4所示,在整流罩的内表面优化设计衍射光学元件,但由于衍射元件的厚度为微米量级,因此图中并未显示出。图中还给出了0°、10°、20°扫描视场下的光路图。

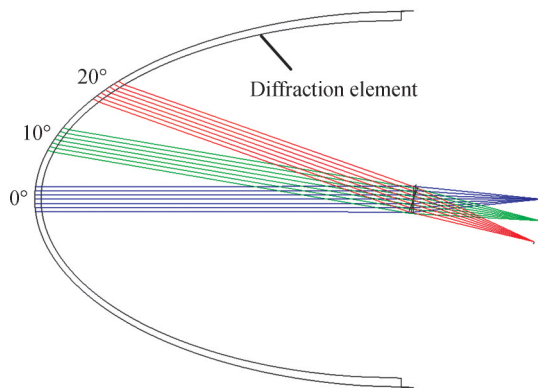
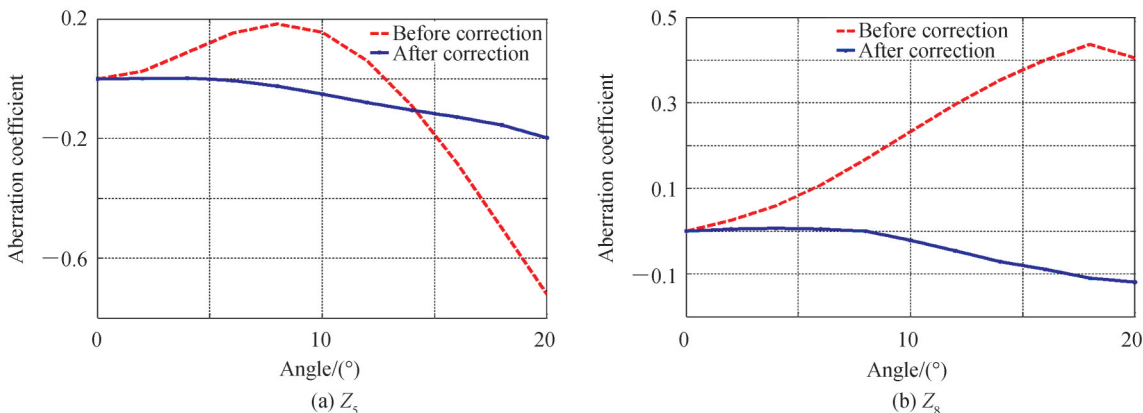


图4 椭球形整流罩下扫描视场示意图
Fig.4 Schematic diagram of scanning field of ellipsoid fairing

添加衍射元件前后,椭球形整流罩在不同扫描视场下的像差对比结果如图5所示,其中红色和蓝色曲线分别代表校正前后的像差大小。仿真结果表明,衍射元件对椭球形整流罩的像差进行校正后,不同扫描视场下的像差得到了明显的改善。



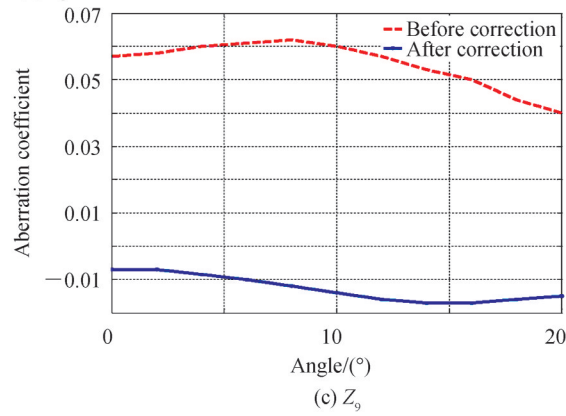


图5 椭球形整流罩不同扫描视场校正前后的像差对比

Fig.5 Aberration comparison of different scanning fields of an ellipsoid fairing before and after correction

2.2 抛物面形整流罩的像差及校正

在抛物面形整流罩的内表面设计衍射元件的过程与2.1节类似,添加衍射元件前后的系统像差对比结果如图6所示。抛物面形整流罩的像差明显大于椭球形整流罩,且对于系统成像质量影响最大的是像散。在添加衍射元件后,抛物面整流罩在20°扫描视场内的像差明显减小,其中像散的校正最为显著。

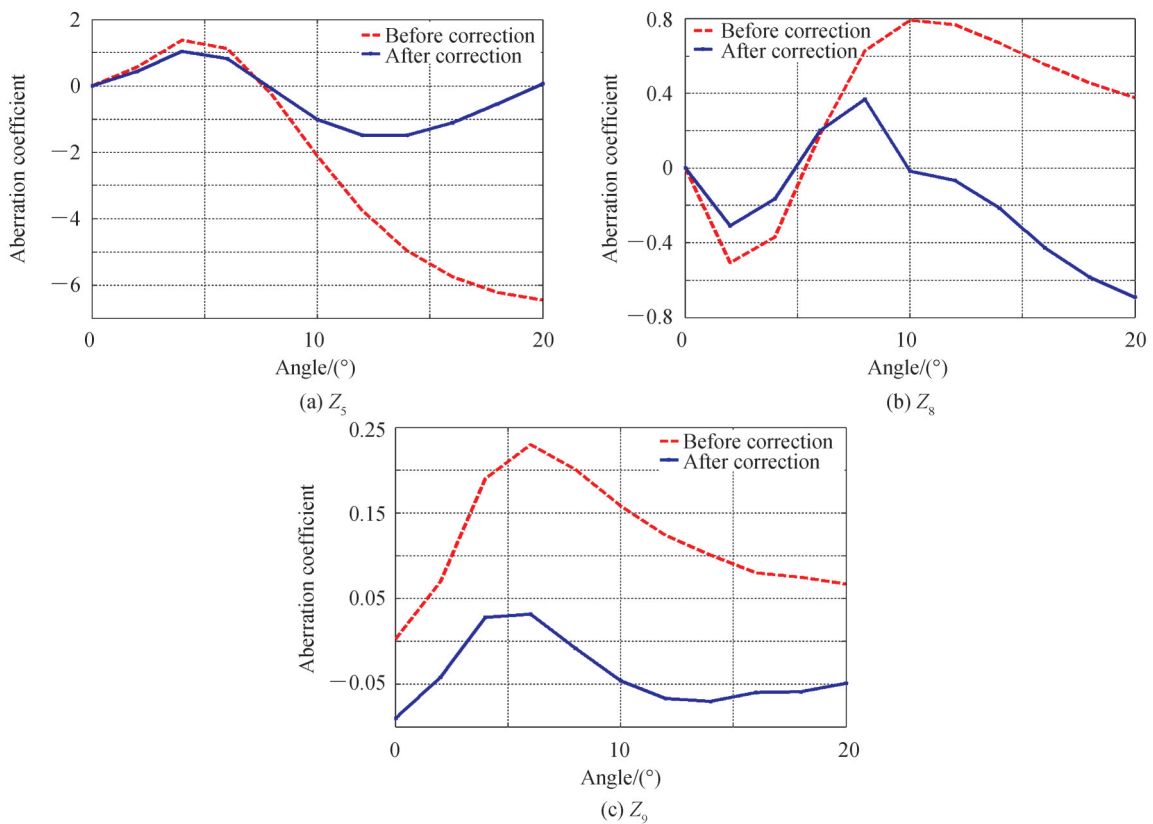


图6 抛物面形整流罩不同扫描视场校正前后的像差对比

Fig.6 Aberration comparison of different scanning fields of a parabolic fairing before and after correction

2.3 双曲面形整流罩的像差及校正

双曲面形整流罩相对于椭球形和抛物面形来说,其表面曲率更大,因此整流罩的像差也会更大。添加衍射元件前后的像差对比结果如图7所示。仿真结果表明,除了小角度视场外,整体像差明显减小,其中像散的校正最为明显。

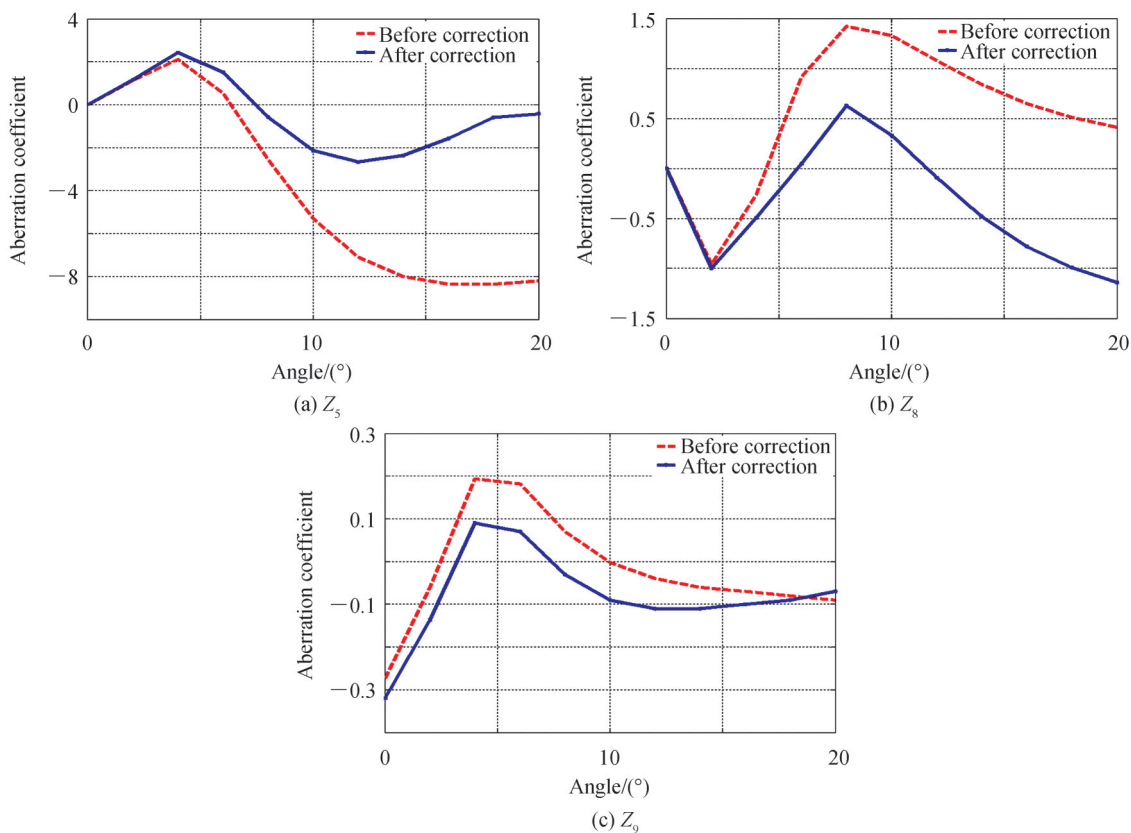


图7 双曲面形整流罩不同扫描视场校正前后的像差对比

Fig.7 Aberration comparison of different scanning fields of a hyperboloid fairing before and after correction

仿真结果表明,衍射元件对于椭球形、抛物面形和双曲面形整流罩的像差校正效果良好。

3 共形光学系统的设计

在采用衍射元件对整流罩像差进行校正的基础上,需要设计后续的成像系统,使包含整流罩的整个光学系统在不同的扫描视场方向,都有良好的成像质量。成像系统的设计要求如表1所示。

表1 成像系统的设计参数

Table1 Design parameters of the imaging system	
Parameter	Specification
Fairing caliber	300 mm
Entrance pupil	20 mm
Fineness ratio	2
Instantaneous field	$\pm 1^\circ$
Scanning field	$\pm 20^\circ$
Wavelengths	1.5~1.6 μm

根据设计参数,本文分别针对椭球形、抛物面形和双曲面形三种不同的面型,设计了与整流罩共形的衍射成像系统。

3.1 椭球形整流罩共形衍射光学系统的设计

椭球形整流罩共形衍射光学系统的结构和光路图如图8所示,图9给出了 0° 、 10° 、 20° 扫描视场下共形衍射光学系统的MTF,其中红色、绿色和蓝色线分别对应 0° 、 1° 和 -1° 的视场,虚线和实线分别对应子午面和弧矢面的MTF。

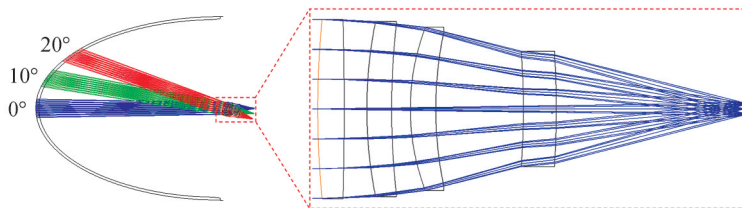


图8 椭球形整流罩共形衍射光学系统不同扫描视场光路示意图

Fig.8 Schematic diagram of different scanning fields of conformal diffractive optical system in ellipsoidal fairing

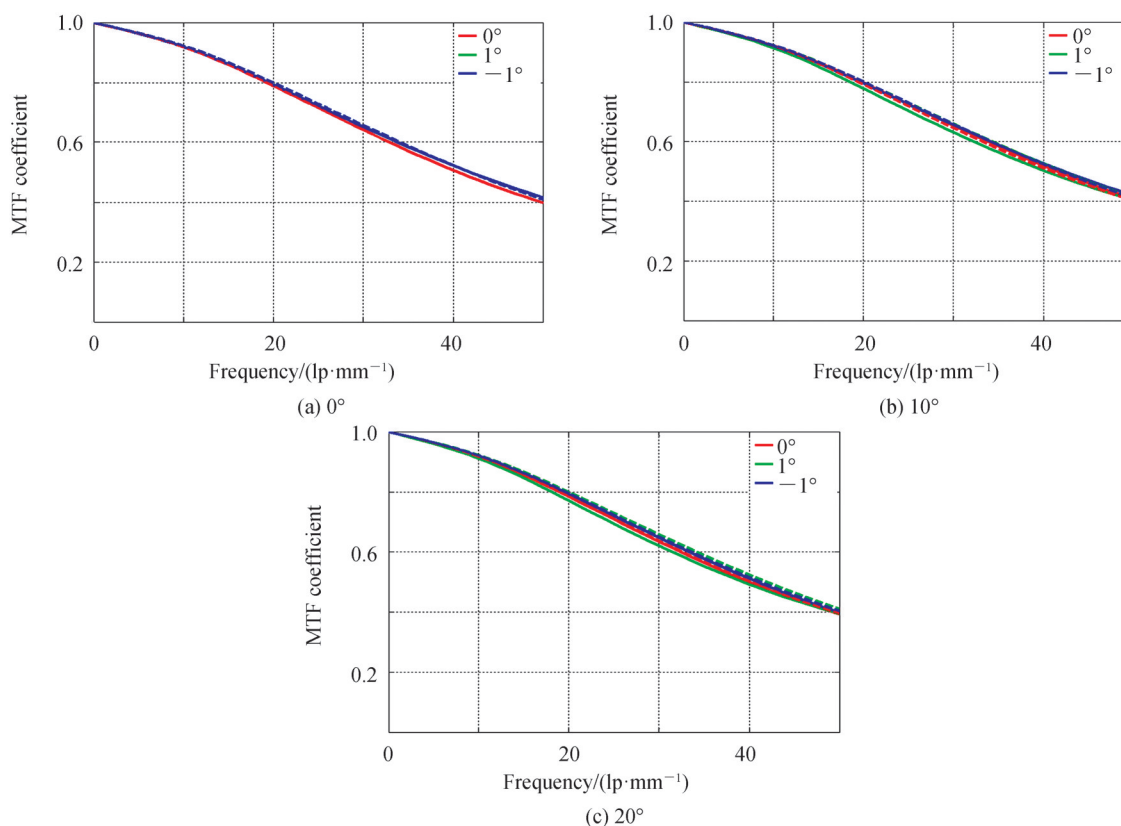


图9 椭球形整流罩不同扫描视场的MTF

Fig.9 MTF of different scanning fields in an ellipsoid fairing

通过对衍射元件和成像光学系统的设计,在 $\pm 20^\circ$ 扫描视场内,共形衍射成像系统的MTF在50 lp/mm处都大于0.4。衍射元件的最小特征尺寸为 $40.727 \mu\text{m}$,目前对衍射元件的加工精度在零点几微米^[6],说明该光学系统的成像质量良好,满足目前的加工精度。

3.2 抛物面形整流罩共形衍射光学系统的设计

抛物面形整流罩的共形衍射成像系统的结构和光路图如图10所示;以光学传递函数MTF对系统在不同扫描视场下的成像质量进行评价,图11给出了 0° 、 10° 、 20° 扫描视场下共形衍射光学系统的MTF。

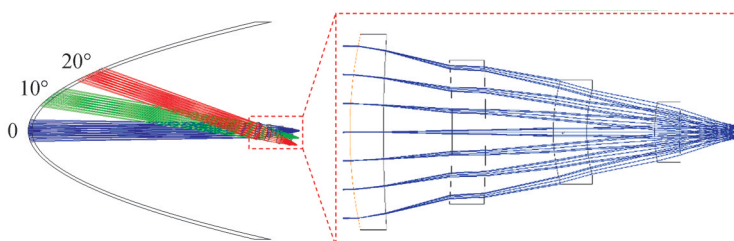


图10 抛物面形整流罩共形衍射光学系统不同扫描视场光路示意图

Fig.10 Schematic diagram of different scanning fields of conformal diffractive optical system in parabolic fairing

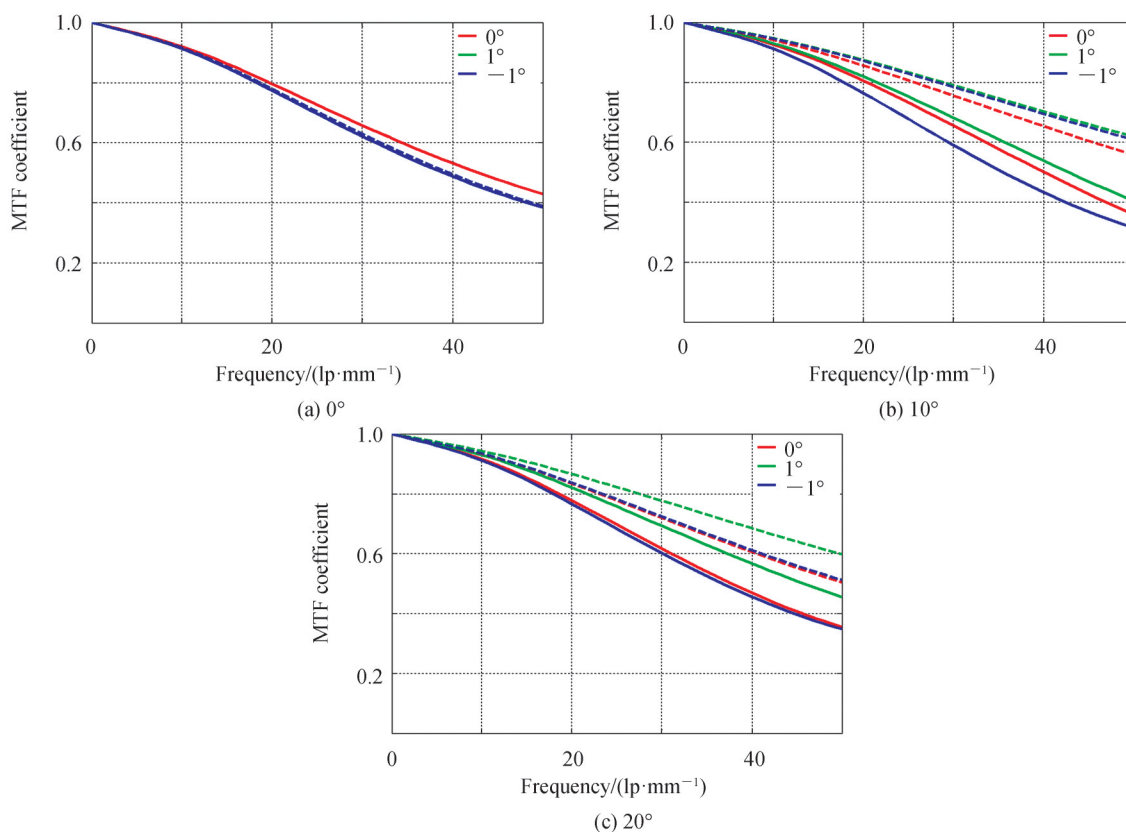


图11 抛物面形整流罩不同扫描视场的MTF
Fig.11 MTF of different scanning fields in a parabolic fairing

通过对衍射元件和成像光学系统的设计,在 $\pm 20^\circ$ 扫描视场内,抛物面共形衍射成像系统的MTF在50线对/mm处都大于0.36,衍射元件的最小特征尺寸为 $37.844\ \mu\text{m}$,说明该光学系统的成像质量良好且能满足加工精度的要求。对比3.1节的仿真结果可以看出,抛物面形整流罩的MTF小于椭球形整流罩,说明椭球形整流罩共形衍射光学系统成像质量更好,即抛物面形整流罩的像差更大。

3.3 双曲面形整流罩共形衍射光学系统的设计

双曲面形整流罩的共形衍射成像系统的结构和光路图如图12所示;图13给出了 0° 、 10° 、 20° 扫描视场下共形衍射光学系统的MTF。

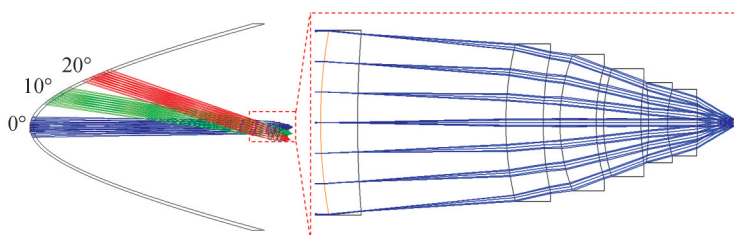


图12 双曲面形整流罩共形衍射光学系统不同扫描视场光路示意图
Fig.12 schematic diagram of different scanning fields of conformal diffractive optical system in hyperboloid fairing

与3.2节和3.3节不同的是,双曲面形整流罩的像差比椭球形和抛物面形整流罩更加复杂,采用传统四片镜头已很难实现良好的成像质量,因此设计中增加了双胶合透镜,衍射元件的最小特征尺寸也缩小了一个数量级,为 $3.069\ \mu\text{m}$ 。最终所设计的共形衍射成像系统在 $\pm 20^\circ$ 的扫描视场下,MTF在50线对/mm处都大于0.4,说明该光学系统的成像质量良好,衍射元件特征尺寸虽然大大减小,但仍然满足加工的要求。

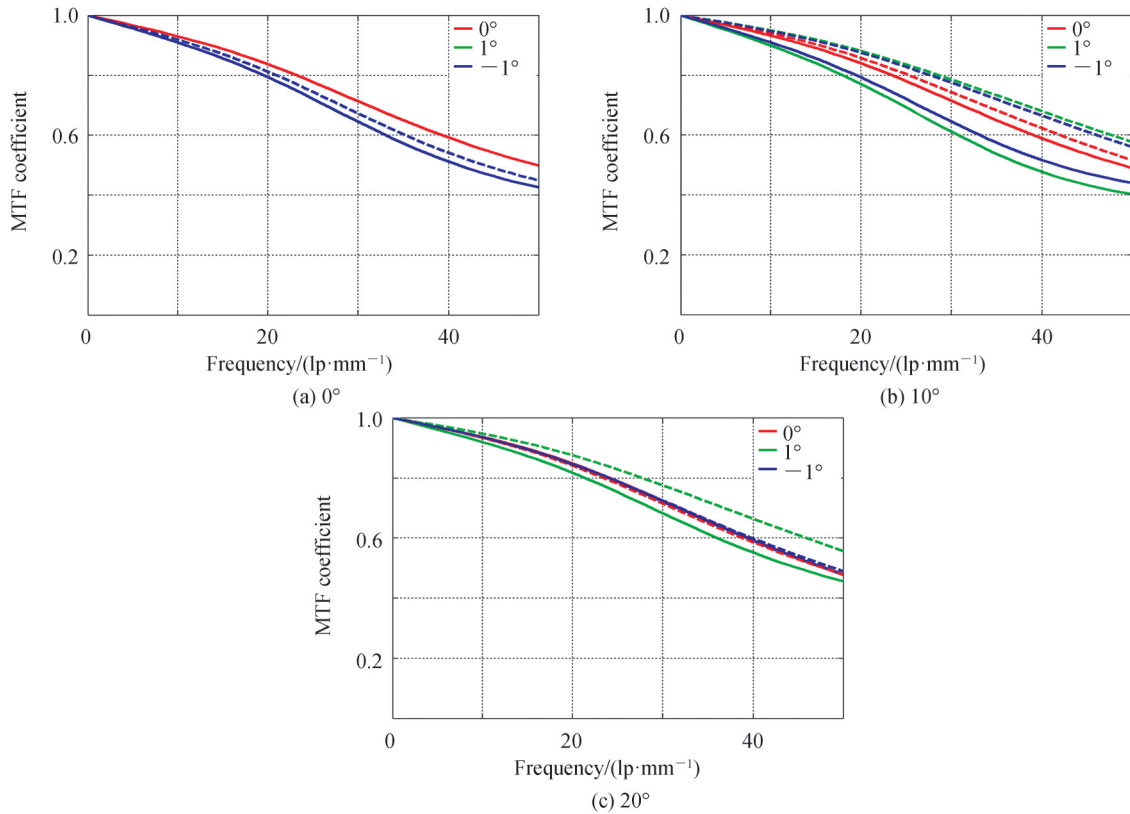


图13 双曲面形整流罩不同扫描视场的MTF示意图
Fig.13 MTF of different scanning fields in a hyperboloid fairing

4 结论

针对椭球形、抛物面形和双曲面形三种不同面型的整流罩,本文在整流罩的内表面设计了衍射光学元件。仿真结果表明:经过衍射元件校正后,三种不同面型整流罩的像差均得到了明显的改善。在利用衍射元件进行整流罩像差校正的基础上,进一步设计后端的成像系统,与像差校正后的整流罩组成共形衍射成像系统。以光学传递函数MTF对不同扫描视场下系统的成像质量进行评价,结果表明:当空间频率在50线对/mm处时,三种整流罩在 $\pm 20^\circ$ 扫描视场下的MTF都能满组成像质量的需要。

参考文献

- [1] WHALEN M R. Correcting variable third order astigmatism introduced by conformal aspheric surfaces[C]. SPIE, 1998, 3482:62-73.
- [2] ELLIS K S. The optics of ellipsoidal domes[D]. The University of Arizona, 1999.
- [3] HUANG Qiu, CHEN Yiqing, GAO Zhifeng. Conformal optics technology[J]. Optical Technique, 2009, 35(5): 729-731+735.
黄秋,陈亦庆,高志峰.共形光学技术[J].光学技术, 2009, 35(5):729-731+735.
- [4] LEGER J R, HOLZ M, SWANSON G J, et al. Coherent laser-beam addition: an application of binary-optics technology [J]. MIT Lincoln Laboratory, 1988, 1:225-246.
- [5] JIN Guofan, YAN Yingbai, WU Minxian. Binary optics[M]. National Defence Industry Press, 1998.
金国藩,严瑛白,邬敏贤等.二元光学[M].国防工业出版社, 1998.
- [6] YAN Shuhua. Design of diffractive micro-optics[M]. National Defence Industry Press, 2011.
颜树华.衍射微光学设计[M].国防工业出版社, 2011.
- [7] FISCHER R E, SIEGEL L R, KORNISKI R J, et al. New developments in optical correction for non-spherical windows and domes [C]. SPIE, 1992, 2286: 471-479.
- [8] SHANNON R R. Overview of conformaloptics[C]. SPIE, 1999, 3705:180-188.
- [9] TROTTA P A. Precision conformal optics technology program[C]. 2001, 4375:96-107.
- [10] TROPF W C, THOMAS M E, et al. Windows and domes: past, pre-sent and future[C]. SPIE, 2003, 5078:80-89.
- [11] SUN Jinxia, SUN Qiang, LU Zhenwu, et al. Characteristic analysis and correction of conformal radome aberration[J].

- Journal of Applied Optics, 2008, 29(5):713-718.
- 孙金霞,孙强,卢振武,等.共形整流罩像差特性分析及校正方法[J].应用光学, 2008, 29(5):713-718.
- [12] JIANG Yang, Aberration correction discuss of conformal dome[D]. Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2013.
- 姜洋.共形光学系统像差校正研究[D].中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2013.
- [13] JIANG Yang, SUN Qiang, SUN Jinxia. Design of infrared staring conformal optical system with wide field of view [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6):1575-1580.
- 姜洋,孙强,孙金霞.大视场凝视型红外共形光学系统设计[J].红外与激光工程, 2012, 41(6):1575-1580.
- [14] YU Linyao, WEI Qun, ZHENG Jinggao, et al. A compact top-view conformal optical system based on a single rotating cylindrical lens with wide field of regard[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2016, 20(1):64-69.
- [15] SHI Yaotao, ZHAI Jinlong, CHEN Shouqian, et al. Research on aberration characteristics of conicoidal conformal domes [J]. Aero Weaponry, 2016, 4(1):50-54.
- 史要涛,翟金龙,陈守谦,等.二次曲面共形整流罩像差特性研究[J].航空兵器, 2016, 4(1):50-54.
- [16] ZHANG Wang, WANG Dongsheng, QIN Lanqi, et al. Design on surface shape of conicoidal conformal optical dome[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12):265-270.
- 张旺,汪东生,秦兰琦,等.二次曲面共形光学整流罩面型设计[J].光学学报, 2014, 34(12):265-270.
- [17] ZHANG Yunqiang, CHANG Jun, PAN Guoqing. Analysis of influence factors on aberrations introduced by quadric conformal domes[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(6):965-972.
- 张运强,常军,潘国庆.二次曲面共形整流罩像差影响因素分析[J].应用光学, 2019, 40(6):965-972.
- [18] SUN Jinxia, SUN Qiang, LI Dongxi, et al. Conformal dome aberration correction with diffractive elements[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(7):3900-3905.
- 孙金霞,孙强,李东熙,等.利用衍射光学元件进行共形整流罩像差校正的研究[J].物理学报, 2007, 56(7):3900-3905.
- [19] 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.
- 孙金霞,刘建卓,孙强,等.折/衍混合消热差共形光学系统的设计[J].光学精密工程, 2010, 18(4):792-797.