

基于固定校正元件的凝视型共形光学系统设计

张 羽 崔庆丰 朱 浩

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为提高凝视型共形光学系统的成像质量,提出了采用共形整流罩内表面设计与Zernike Fringe Sag面固定校正板设计相结合的固定校正方法。根据建立的人射光线与出射光线方向的偏离角与整流罩参数的关系,设计整流罩内表面参数,减小共形整流罩引入的部分像差。在此基础上,利用Zernike Fringe多项式各项与像差的对应关系,构建Zernike Fringe Sag面固定校正板。基于该设计方法设计了一个凝视型共形光学系统,其 F 数为1,焦距 f 为30 mm,观察视场为 $\pm 35^\circ$ 。分析了校正前后系统的像差特性。设计结果表明,该方法有效地减小了共形光学系统存在的主要像差,整个观察视场范围内调制传递函数(MTF)曲线在17 lp/mm处均达到0.748以上,成像质量良好。

关键词 光学设计; 椭球形整流罩; 内表面; 泽尼克多项式; 凝视成像系统; 像差校正

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0122004

Design of Staring Conformal Optical System Based on Fixed Corrector

Zhang Yu Cui Qingfeng Zhu Hao

Department of Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to enhance the imaging quality of the staring conformal optical system, a static correction method which combines the optimized inner surface of the conformal dome and fixed correctors with Zernike Fringe Sag surfaces is proposed. On the base of the relationship between the parameters of dome and the shift in the direction of a ray as it passes through a conformal dome, the parameters of the inner surface of the dome are projected, which reduce some aberrations of the conformal optical system. Then, the correspondence between the Zernike Fringe polynomial terms and aberrations is used to build the fixed corrector with Zernike Fringe surfaces. Based on this method, a staring conformal optical system is designed, whose F is 1, focal length is 30 mm, the field of view is $\pm 35^\circ$. The characters of the aberrations are analyzed before and after correction. The result shows that this method has a good effect on correcting the main aberrations, and the modulation transfer function (MTF) of optical system is higher than 0.748 at the spatial frequency of 17 lp/mm across the entire field of view. The imaging quality is favorable.

Key words optical design; ellipsoidal dome; inner surface; Zernike polynomials; staring imaging system; aberration correction

OCIS codes 220.1000; 220.1250; 080.2740

1 引 言

为提高导引头的空气动力学性能,人们采用共形整流罩代替传统的球形整流罩^[1]。但是共形整流罩引入了大量不规则的像差,降低了系统的成像质量。现有的校正共形光学系统像差的方案主要分为动态校正^[2-5]与

收稿日期: 2014-06-09; 收到修改稿日期: 2014-08-13

基金项目: 国家重大科技专项高分专项(51-H34D01-8358-13/16)

作者简介: 张 羽(1988—),女,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: zyzyzy02270201@163.com

导师简介: 崔庆丰(1954—),男,教授,博士生导师,主要从事光学设计和衍射光学等方面的研究。

E-mail: qf_cui@163.com。(通信联系人)

静态校正^[6-9]两大类。动态校正系统是在光学系统中加入动态校正元件,在搜索不同的目标视场时通过精确控制像差补偿单元的旋转、移动、偏心等提供相应的像差补偿量,这样可以实现大视场像差的校正,但是需要较高的光机电精度,这样降低了系统的稳定性。静态校正系统也称为固定校正系统。固定校正系统是将旋转对称结构的固定校正板置于整流罩与成像系统之间的某个位置,固定在整流罩上,对不同观察视场产生的像差起到补偿的作用,这样校正像差的同时提高了系统的稳定性,更有利于实际应用。固定校正板面形的选取影响最终的设计结果,具有足够自由度的表面类型,可以为系统的设计提供更多自由度,进而降低设计的难度,例如二次曲面、偶次非球面、扩展样条曲面、衍射面等。

以往的共形光学系统大部分使用扫描成像系统,需要复杂的机械结构实现其对目标的定位,机械运转就会带来的不稳定性。采用凝视成像系统可以避免复杂的光机扫描机构,使整个成像系统结构简单,并且增大了积分时间,有利于探测器在远距离观测目标和消除图像的运动模糊^[10]。使用长焦距凝视成像系统可以提高较远目标的分辨率,为获得大视场目标则需要较大规模的探测器,大规模的探测器可以通过探测器的拼接技术实现^[11]。

本文提出了一种新的校正方案,即共形整流罩内表面的优化设计与 Zernike Fringe Sag 面固定校正板设计相结合的固定校正系统,实现对共形光学系统像差的校正,同时使用凝视成像系统,成像系统焦距为 30 mm。最终使成像质量得到明显的提高。

2 整流罩内表面的优化设计与 Zernike Fringe Sag 面形描述

优化整流罩内表面可以减小共形整流罩引入的部分像差,这样减小了后续固定校正板校正像差的负担,并且简化了校正系统结构。Zernike Fringe Sag 面固定校正板的设计思想是:根据非球面的主要像差与 Zernike 系数之间的关系^[12],建立适当的二次曲面校正板,再加入偶次非球面的高次项,最后加入合理的 Zernike Fringe 项,即用 Zernike Fringe Sag 面替换原固定校正板上任何一个或多个偶次非球面。

2.1 共形整流罩内表面的设计

在等厚椭球形整流罩中,其内外表面均为椭球面,这种非球面使平行光束通过整流罩后不再是平行光。将共形整流罩的最初的椭球面内表面设为偶次非球面或更复杂面形进行优化设计^[13,14],可以减小出射光与入射光的偏离角,并且内表面为偶次非球面优化设计后,整流罩的边缘厚度大于顶点厚度。由于共形整流罩内表面是较深的曲面,使用复杂面型不易于整流罩的加工与检测。文献[15]建立了入射光线与出射光线的偏离角与共形整流罩内外表面参数的关系,确定了在保证整流罩外表面参数不变的情况下,调整内表面参数,即减小整流罩的边缘厚度,可以减小光线的偏离角,可以达到减小几何像差的目的。

图 1 为共形整流罩受到外部冲击波影响的示意图^[16],从图中可以看出,冲击波对整流罩顶端的影响明显大于边缘部位,所以适当减小边缘厚度仍可以保障系统的机械强度。保证内表面仍为椭球面的情况下,减小整流罩的边缘厚度来减小像差,避免了增加整流罩的加工难度。减小整流罩边缘厚度的内表面可以利用椭球面具有两个焦点的几何特点进行元件的检测^[17],而对于内表面为非球面的共形整流罩的检测较为复杂。



图 1 冲击波

Fig.1 Shock wave

2.2 Zernike Fringe Sag 面形的描述

Zernike Fringe Sag 面属于 Zernike 面的一种,它描述的是表面变形,是由偶次非球面加上由 Zernike Fringe 系数定义的非球面多项式,在光学设计软件 Zemax 中的表达式为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^8 \alpha_i r^{2i} + \sum_{i=1}^N A_i Z_i(\rho, \varphi), \quad (1)$$

式中 N 为序列中 Zernike Fringe 系数的序号, A_i 是第 i 个 Zernike Fringe 多项式的系数, r 是径向的光线坐标, ρ 是归一化的径向光线坐标, φ 是以角度表示的光线坐标。其中 ρ 和 φ 转化为 XY 坐标系中的表达式为

$$\rho \rightarrow \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (2)$$

$$\cos \varphi \rightarrow \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (3)$$

$$\sin \varphi \rightarrow \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (4)$$

Zernike 多项式是互为正交,线性无关而且可以唯一地,归一化地描述系统圆形孔径的波前畸变的表达式,所以设计时能够更加方便地处理各种像差, Zernike 多项式各项通常用作参数的分析,每一项都对应特定种类、特定级次的像差,这样可以将 Zernike 面用在校正元件中作为像差发生器。表 1 为 Fringe Zernike 多项式前 9 项及其相应像差的描述。

表 1 Zernike Fringe 多项式前 9 项

Table 1 First nine terms in the Zernike Fringe polynomial expansion

Term	Radial coordinator polynomial	XY coordinator polynomial	Aberration description
Z_1	1	1	Piston
Z_2	$\rho \cos \varphi$	x	Tilt about Y
Z_3	$\rho \sin \varphi$	y	Tilt about X
Z_4	$2\rho^2 - 1$	$2(x^2 + y^2)$	Defocus
Z_5	$\rho^2 \cos(2\varphi)$	$x^2 - y^2$	X astigmatism
Z_6	$\rho^2 \sin(2\varphi)$	$2xy$	Y astigmatism
Z_7	$(3\rho^3 - 2\rho) \cos \varphi$	$3x(x^2 + y^2) - 2x$	X coma
Z_8	$(3\rho^3 - 2\rho) \sin \varphi$	$3y(x^2 + y^2) - 2y$	Y coma
Z_9	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	$6(x^2 + y^2)^2 - 6(x^2 + y^2) + 1$	3 th spherical aberration

选择 Zernike Fringe Sag 面作为固定校正板的面形的最大优势是,它可以针对共形光学系统存在的主要像差进行针对性的校正。为实现系统像差的校正,可根据表 1 的描述,选取与系统存在的像差相对应的 Zernike 项系数设为变量,进行优化设计,同时为了降低加工、检测的难度也要保证固定校正板的旋转对称性。

3 设计实例

3.1 椭球面整流罩模型

图 2 为凝视型等厚共形整流罩的光学系统结构图,其中共形整流罩的长径比为 1,顶点与边缘厚度均为 4 mm,材质为氟化镁,整流罩外表面口径 D 为 100 mm。将理想透镜作为光学成像系统置于孔径光阑处,其 F 数为 1,焦距 f 为 30 mm。系统的工作波段为 3~5 μm ,观察视场(FOV)为 $\pm 35^\circ$,由于共形整流罩为旋转轴对称结构,所以以半视场进行像差的分析与校正。

3.2 共形整流罩像差的分析

采用 Zernike Fringe 多项式像差理论对图 2 描述的共形光学系统进行像差分析。Zernike Fringe 多项式进行像差分析的方法是基于出瞳处波前的 Zernike 多项式拟合,它不受光学系统倾斜、偏心等影响,Zernike Fringe 各项与像差之间的关系见表 1。图 3 为共形光学系统存在的主要像差随观察视场的变化情况(波长为 4 μm)。

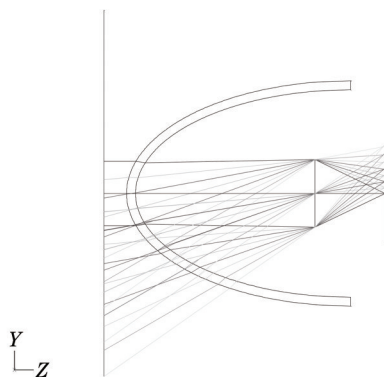


图 2 凝视型共形光学系统

Fig.2 Staring conformal optical system

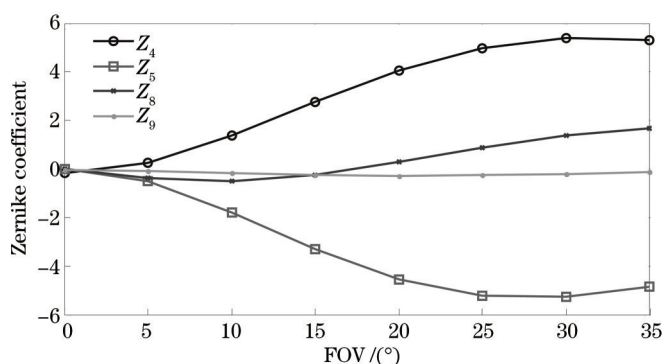


图 3 系统主要像差对应的 Zernike 像差系数随观察视场的变化曲线

Fig.3 Dome aberrations corresponding Zernike aberration versus FOV of the conformal dome

由图 3 可知,像差随视场的不同而不断变化,并且在较大视场处像差更加严重,其中初级像散 Z_5 、离焦 Z_4 的影响最大,同时也有部分初级彗差和三阶球差。产生这种不规则像散的主要原因是共形整流罩在轴上观察视场是近似于旋转对称的球形结构,在非零观察视场,随着视场的增大,椭球面逐渐失去这种对称性,并趋近于柱面的结构。相比之下,球差 Z_9 的影响最小,它主要与所选的光学系统的相对孔径的大小有关。

3.3 像差的校正

在共形光学系统中,存在光瞳像差,应注意使入射光线充满整个实际光阑。

为了保证整流罩可以承担对外界空气阻力的冲击,设计中不改变共形整流罩外表面形状,并保持头罩顶点厚度 4 mm 不变的情况下,调整内表面曲率半径和圆锥系数,使边缘厚度减小到 3 mm。图 4 为非等厚整流罩的光学系统结构图,图 4 为整流罩减小边缘厚度后像差的变化情况。通过图 3 与图 5(波长为 4 μm)的对

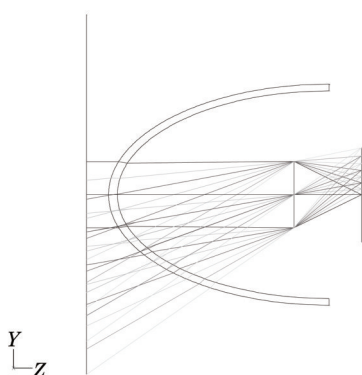


图 4 非等厚共形整流罩

Fig.4 Unequal thickness conformal dome

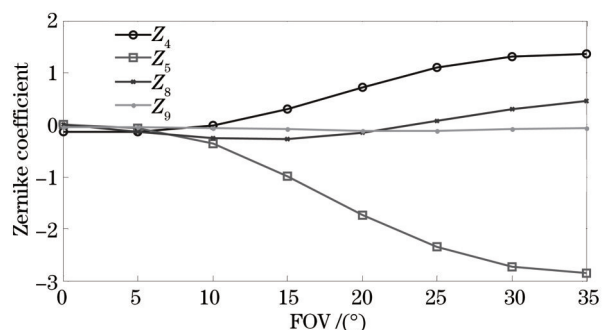


图 5 非等厚共形整流罩的 Zernike 像差特性曲线

Fig.5 Zernike aberrations characteristics of unequal thickness conformal dome

比可以看出,减小边缘厚度使像差几乎减小到原来的一半。表2为等厚与非等厚整流罩结构参数。

表2 等厚与非等厚整流罩结构参数

Table 2 Structure parameters of the equal and unequal thickness domes

Parameters	Equal thickness dome	Unequal thickness dome
Out surface radius/mm	25	25
Out surface conic constant	-0.75	-0.75
Inner surface radius/mm	22.042	23.010
Inner surface conic constant	-0.77	-0.76
Vertex thickness/mm	4	4
Edge thickness/mm	4	3

根据上述设计思想,在非等厚整流罩与成像系统之间构建两块面形均为二次曲面的固定校正板,两块校正板的材料依次选用锗和硒化锌。将面形由二次曲面转换为偶次非球面,利用非球面与孔径光阑的分离实现轴外视场像差的校正。在优化的过程中可以将透镜中心厚度、透镜间距设为变量参与优化。经过反复优化,成像质量有所提高,但仍有大量像差影响成像质量,此时小视场的像点弥散斑半径的均方根(RMS)值在艾里斑范围内,而大视场的像点弥散斑半径仍较大,存在严重的离焦现象。仅用一个Zernike Fringe Sag面参与像差的校正,并不能达到很好的成像效果,所以选择将两块校正板的后表面用Zernike Fringe Sag面替换原来的偶次非球面,同时保证原有非球面参数不变。将两个Zernike Fringe Sag面中与离焦对应的 Z_4 项的系数设为变量,参与像差的校正,减小大视场的离焦现象。反复优化后,像散的影响并未减小,所以加入像散 Z_5 参与优化设计,同时为了球差的减小,也将球差 Z_9 项系数设为变量。经过反复优化,使像差大幅度减小。而且 Z_4 , Z_5 和 Z_9 保证了固定校正板的旋转对称性。从以上对共形整流罩像差的分析可知,彗差并不大,所以在校正像差的过程中利用非球面与孔径光阑的分离实现了彗差的校正。在设计的过程中,根据各个视场的像差量,对每个视场选取适当的权重。图6为校正后的系统结构图。

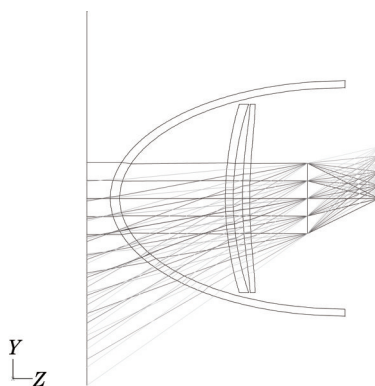


图6 带固定校正板的共形光学系统

Fig.6 Conformal optical system with fixed correctors

表3为两个Zernike Fringe Sag面固定校正板的面形参数。最终得到的固定校正板面形平缓,并且Zernike Fringe Sag面方程最高次为6次,次数较低,面形简单,且两个Zernike Fringe Sag面的最大去除量较小,分别为0.059 mm与0.489 mm,这样元件加工比较容易。

经过上述对共形整流罩像差的校正,最终得到的像差随视场的变化曲线如图7所示(波长为4 μm)。

从像差校正前后像差随视场的变化曲线图的对比可以看出,在主波长为4 μm的条件下,优化后共形光学系统的彗差,球差,像散和离焦均明显地减小,其中初级像散 Z_5 项和离焦 Z_4 项的峰谷(PV)值由原来的±6个波长减小到±0.2个波长范围内,彗差 Z_8 项的PV值由原来的1.6个波长减小为0.13个波长范围内。与以往使用Wassermann-Wolf曲面固定校正板将像散 Z_5 项的PV值校正到0.5个波长范围内相比,该方法使像差的校正得到进一步的改善,这样可以进一步减小后续成像系统的设计难度。

表 3 固定校正板面形参数

Table 3 Surface parameters of the fixed correctors

Surface number	Radius /mm	Conic constant	4 th	6 th	Zernike 4	Zernike 5	Zernike 9
1	121.995	-14.053	2.498×10^{-7}	7.356×10^{-11}	-	-	-
2	114.527	-12.569	5.025×10^{-7}	7.137×10^{-11}	-0.093	0.325	-0.084
3	181.219	5.2	-9.677×10^{-8}	-2.385×10^{-10}	-	-	-
4	214.404	-9.855	-3.003×10^{-7}	-1.601×10^{-10}	0.071	-0.679	0.137

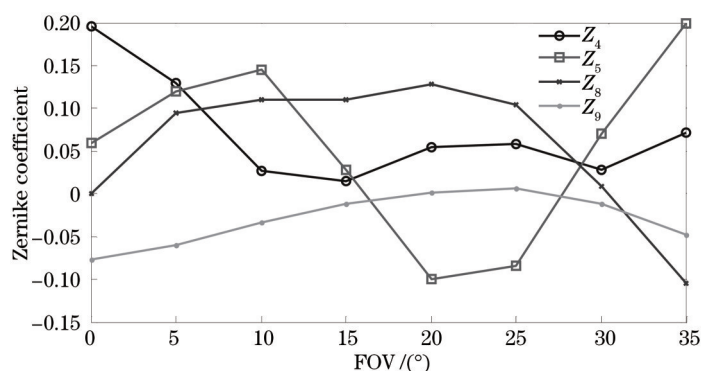


图 7 带有固定校正板的共形光学系统像差特性曲线

Fig.7 Aberration characteristic curves of conformal optical system using fixed correctors

4 像质评价

用调制传递函数(MTF)评价了光学系统的综合成像质量,图 8 为校正像差后系统的 MTF 曲线。各个观察视场范围内的 MTF 曲线在 17 lp/mm 处均达到 0.748 以上,共形整流罩的像差得到了很好的校正。

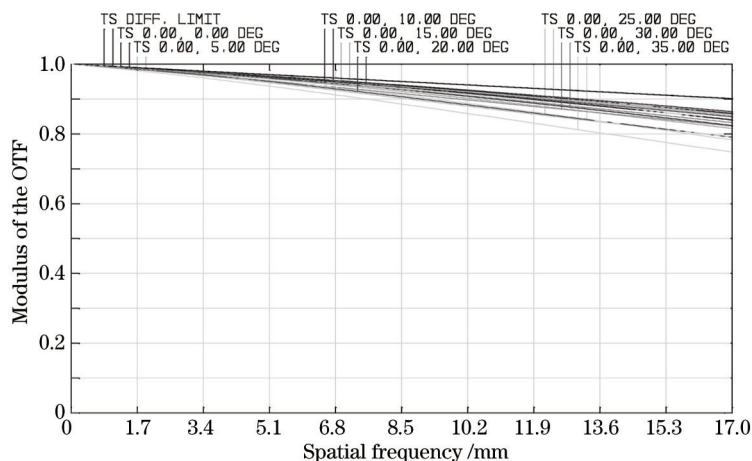


图 8 共形光学系统的 MTF 曲线

Fig.8 MTF curves of conformal optical system

图 9 是波长为 4 μm 对应的点列图。该系统艾里斑半径为 5.517 μm,校正像差后各视场像点弥散斑半径的 RMS 值减小到 4.846~9.419 μm,大约是艾里斑半径的 0.8~1.71 倍,而且各视场像点弥散斑几何半径最大为 29.288 μm。

5 公差分析

由于理论设计与实际加工系统存在差异,为了保证光学系统在现有的加工装调水平下满足系统的性能要求,对上述设计的校正系统进行了公差分析。公差值是依据典型的加工公差设置的,并使用后焦距进行补偿,不同参数对应的公差设置如表 4 所示。

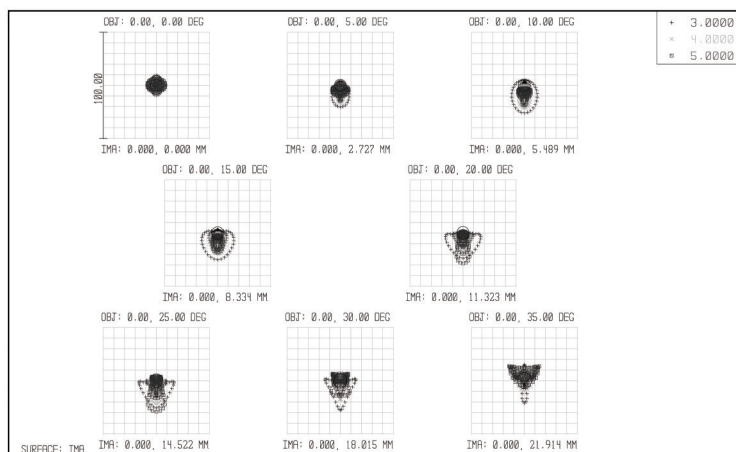


图9 点列图

Fig.9 Spot diagrams

表4 系统公差设置

Table 4 Tolerance data of system

Parameter	Tolerance
Thickness /mm	±0.05
Surface tilt x /($^{\circ}$)	±0.016
Surface tilt y /($^{\circ}$)	±0.016
Element decenter x /mm	±0.05
Element decenter y /mm	±0.05
Element tilt x /($^{\circ}$)	±0.016
Element tilt y /($^{\circ}$)	±0.016
Surface irregularity (Fringe)	±0.5
Refractive index	±0.001
Abbe number /%	0.8
Test wavelength / μ m	0.6328

用Zemax光学设计软件进行公差分析,最终得到的MTF曲线如图10所示。

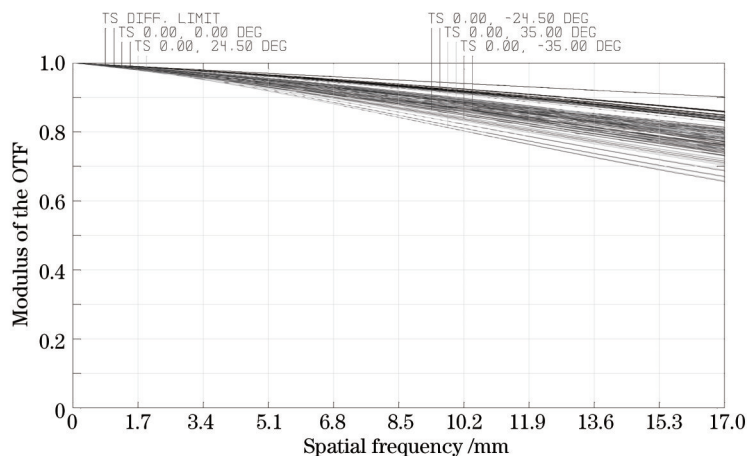


图10 公差分析后系统的MTF曲线

Fig.10 MTF curves after tolerance analysis

公差分析后得到的MTF曲线在17 lp/mm处在0.656以上,满足系统的设计要求。

6 结 论

采用整流罩内表面的优化设计与Zernike Fringe Sag面固定校正板相结合的校正方法,使凝视型共形光

学系统的像差大幅度下降。在不改变整流罩面形的情况下,仅减小整流罩的边缘厚度消除了系统的部分像差,降低了后续校正系统的设计难度,同时也克服了以往将内表面设计成复杂面形使整流罩加工困难的问题。Zernike Fringe Sag 面固定校正板对非等厚整流罩的像差做了进一步的校正。设计的固定校正板表面较为平缓,两个 Zernike Fringe Sag 面的最大去除量较小,表面的最高次项仅为 6 次,这样有利于元件的加工。采用凝视成像系统进一步加强了系统的稳定性,简化了系统结构,可以对目标进行实时成像。

参 考 文 献

- 1 R R Shannon. Overview of conformal optics [C]. SPIE, 1999, 3705: 180-188.
- 2 Michael R Whalen. Correcting variable third order astigmatism introduced by conformal aspheric surfaces [C]. SPIE, 1998, 3482: 62-73.
- 3 James P Mills, Scott W Sparrold. Conformal dome aberration correction with counter-rotating phase plates [C]. SPIE, 1999, 3705: 201-208.
- 4 Scott W Sparrold. Arch corrector for conformal optical systems [C]. SPIE, 1999, 3705: 189-200.
- 5 Thomas A Mitchell, Jose M Sasian. Variable aberration correction using axially translating phase plates [C]. SPIE, 1999, 3705: 209-220.
- 6 Song Dalin, Chang Jun. Conformal optical system design with a single fixed conic corrector [J]. Chin Phys B, 2011, 20(7): 1-5.
- 7 David J Knapp. Fundamentals of conformal dome design [C]. SPIE, 2002, 4832: 394-409.
- 8 Li Dongxi, Lu Zhenwu, Sun Qiang, *et al.*. Research on conformal optical system design using Wassermann-Wolf principle [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(4): 776-779.
李东熙,卢振武,孙 强,等. 利用 Wassermann-Wolf 原理设计共形光学系统[J]. 光子学报, 2008, 37(4): 776-779.
- 9 Sun Jinxia, Sun Qiang, Li Dongxi, *et al.*. Conformal dome aberration correction with diffractive elements [J]. Chin Phys B, 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.
- 10 Wang Chunsheng, Yu Songlin, Gao Shan. A design of staring IR imaging system applied in precise seeker [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(4): 332-334.
王春生,喻松林,高 山. 一种精确制导用凝视红外成像系统设计[J]. 激光与红外, 2007, 37(4): 332-334.
- 11 Yong Chaoliang, Lin Jianchun, Zhao Ming, *et al.*. Mosaic of spatial large scale CMOS focal plane array [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(10): 2561-2566.
雍朝良,林剑春,赵 明,等. 空间大规模 CMOS 面阵焦平面拼接技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2561-2566.
- 12 Zhang Yimo. Applied Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008, 475-477.
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 475-477.
- 13 Zhang Wang, Zuo Baojun, Chen Shouqian, *et al.*. Design of conformal dome inner surface shape beneficial to aberration correction [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1122001.
张 旺,左宝君,陈守谦,等. 利于像差校正的共形整流罩内表面面形设计[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1122001.
- 14 Li Yan, Li Lin, Huang Yifan, *et al.*. Conformal optical design with combination of static and dynamic aberration corrections [J]. Chin Phys B, 2009, 18(2): 565-570.
- 15 R I Joseph, M E Thomas. Ray path deviation in a non-hemispherical dome [C]. SPIE, 2001, 4375: 160-170.
- 16 Wei Qun, Bai Yang, Liu Hui, *et al.*. Optimized design of the inside surface of supersonic missile's elliptical dome [C]. SPIE, 2009, 7384: 7380E.
- 17 Scott A Lerner, Jose M Sasian, John E Greivenkamp, *et al.*. Interferometric metrology of conformal domes [C]. SPIE, 1999, 3705: 221-226.

栏目编辑: 韩 峰