

引用格式:潘思豪,潘枝峰,陈建发.紧凑型离轴三反光学系统的自由曲面设计[J].电光与控制,2019,26(3):97-102. PAN S H, PAN Z F, CHEN J F. Design of freeform surface in compact, off-axis, three-mirror system[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(3):97-102.

紧凑型离轴三反光学系统的自由曲面设计

潘思豪^{1,2}, 潘枝峰², 陈建发²

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000;

2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 光学加工和检测技术的提高为自由曲面的应用开拓了新的领域, 紧扣空间光学对压缩系统体积和实现系统性能提升的需求, 提出一种可快速获得的紧凑型离轴三反光学系统初始结构, 通过3个镜面折叠交叉排布, 极大地压缩了系统体积; 另外, 节点像差理论为自由曲面应用提供了强大的理论基础, 在优化过程中, 两片镜子采用了泽尼克多项式面形。通过设计实例验证发现, 最终系统具有结构紧凑、大视场、小F数等优点, 同时该设计方法的优化过程具有收敛速度快等特点。

关键词: 离轴三反光学系统; 自由曲面; 紧凑型; 泽尼克多项式曲面

中图分类号: TB133 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.03.020

Design of Freeform Surface in Compact, Off-Axis, Three-Mirror System

PAN Si-hao^{1,2}, PAN Zhi-feng², CHEN Jian-fa²

(1. Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang 471000, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

Abstract: The technological advancement in optical fabrication and testing has exploited a new field for the application of freeform surfaces. Based on the requirements of volume compression and performance promotion for space optics, an initial configuration of a compact, off-axis, three-mirror optical system is presented. The three mirrors are folded, which greatly compresses the volume. In addition, since the nodal aberration theory has laid a theoretical foundation for the application of freeform surfaces, two Zernike polynomial surfaces are adopted in the optimization process. With the verification of a designed example, it can be found that the final optical system possesses the advantages of compact structure, wide field-of-view and small F number, while the optimization process based on this design method can converge to the expected result with a fast speed.

Key words: off-axis three-mirror optical system; freeform surface; compact; Zernike polynomial surface

0 引言

离轴三反式光学系统以其天然的优势, 在空间光学领域发挥着越来越大的作用, 这些优势包括: 不存在色差; 避免中心遮拦, 提高光能收集效率, 提高信噪比与作用距离; 材料选择灵活, 无热化设计更加方便; 若选用碳化硅材料, 能明显降低载荷。然而, 离轴三反系统固有的离轴、非对称特点引入了非对称像差, 传统的

球面、非球面和二次曲面不能很好地校正这类非对称像差。随着数控加工和面形检测技术的进步, 自由度更高的自由曲面已经在离轴系统中得到应用, 自由曲面的引入可以平衡系统非对称像差、扩大系统视场, 压缩系统体积, 制造出性能更高、包装更加紧凑的航空航天光学系统^[1]。

自由曲面没有统一的光轴, 具有非旋转对称性, 无法用非球面系数进行描述, 主要可以分为以下三类: 非球面度很大的曲面; 有面形突变的非连续曲面; 没有旋转对称的复杂非常规连续曲面。其中, 第三类自由曲面在空间光学领域具有重要的应用价值, 这类自由曲面又可以细分为以下几类: 复曲面、镗面、XY 多项式曲面、泽

收稿日期: 2018-07-11

修回日期: 2018-12-28

作者简介: 潘思豪(1994—), 男, 河南孟州人, 硕士生, 研究方向为光学设计与杂散光分析。

尼克多项式曲面、非均匀有理 B 样条曲面等。目前,国内采用最多的是泽尼克多项式曲面与 XY 多项式曲面,这种面形易于加工、检测与装调,与面形设计可实现无缝衔接^[2]。

1 离轴三反系统自由曲面设计思路

传统离轴三反光学系统的设计起点为共轴三反光学系统。首先根据共轴三反光学系统的像距、系统尺寸要求和焦距要求,求出遮拦比和放大率等结构参数,再结合赛德尔像差方程,求出各镜面非球面系数,得到零视场接近衍射极限的初始共轴系统;然后对共轴系统进行镜面离轴偏心,每次离轴偏心一个微小的量,都会引入非对称像差,需要重新优化成像质量。按照这种步骤,离轴优化循环操作,直到满足系统无中心遮拦和成像质量要求,这种设计方法的流程如图 1 所示^[3-5]。

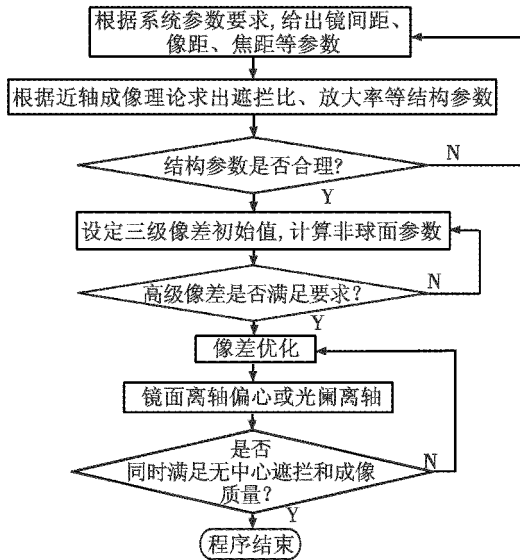


图 1 传统离轴系统设计流程图

Fig. 1 Flow chart of design program for traditional off-axis system

传统设计方法具有一定的局限性。经过每一片镜子的光线没有重叠交叉,使得系统空间利用率低、体积大^[3-4],并且这种方法需要逐步离轴优化循环迭代,每次增大视场后,会把原视场光束成像质量破坏,过程复杂。

与传统离轴三反光学设计思路不同,本文设计用两片平面镜和一片抛物面反射镜组成无中心遮拦的初始布局,这种初始布局非常简易,不需要像差方程解算初始构型,直接利用抛物面完美聚焦的特点,实现 0° 视场完美成像,同时利用平面镜折叠光路的特点,直接构造出无中心遮拦的离轴系统,节省大量时间,在优化过程中也无需针对某种像差进行特殊约束,需要控制的主要约束条件为边界光线到镜面的距离,这种优化方法最终却可以实现优异的光学系统性能。该设计思

路的特点在于:在初始布局的规划中,没有结合赛德尔像差理论计算镜面面形参数,主要关注光路折反交叉对体积压缩的影响以及有无中心遮拦的问题,在后期系统优化中,依靠自由曲面的高自由度特点,并具有消除离轴偏心系统非对称像差的能力,CODEV 软件可以使系统成像很快达到衍射极限。本文设计方法的流程如图 2 所示。

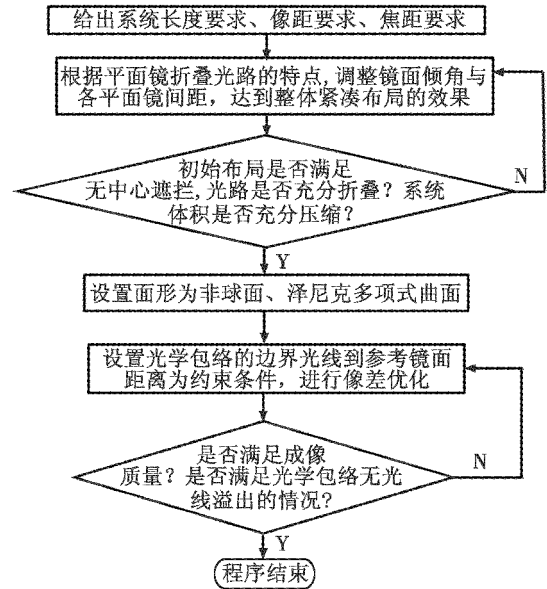


图 2 新型离轴系统设计流程图

Fig. 2 Flow chart of design program for new off-axis system

相比于传统设计方法,本文设计方法的优势在于,设计起点无中心遮拦,无需对镜面离轴优化迭代;设置光学包络的边界光线到参考面距离为约束条件,易于实现对系统体积的压缩,操作方便,易于软件与工程实现;引入自由曲面优化像差,可以校正系统本身离轴偏心引入的非对称像差,这是其他传统面形不能校正的^[6-10]。用本文方法设计的系统,成像光束在三面镜子之间折叠交叉,极大地提高了空间利用率,相比于传统离轴三反光学系统,体积被明显压缩。

2 设计实例

2.1 设计过程

选用 CODEV 作为光学设计软件,该光学设计的起始点如图 3 所示,主镜和次镜采用平面镜,起折叠光路作用,三镜采用抛物面镜,起会聚光束作用。由于主镜和次镜都采用平面镜,因此经过主镜和次镜的光线为平行光,主镜和次镜与 Z 轴的夹角分别为 22.5° 和 67.5° ,实现次镜的出射光束与 Y 轴平行;三镜面形为抛物面,顺时针旋转 90° ,曲率半径为 -850 mm ,可以通过改变三镜的倾角来改变像面的位置。为了实现紧凑布局,使会聚光束成像在主镜和次镜之间,初始结构参数见表 1。

表1 初始结构参数

Table 1 Initial configuration parameters

名称	曲率半径/mm	间距/mm	倾斜角度/(°)
光阑	—	-700	0
主镜	∞	275	-22.5
次镜	∞	455	-67.5
三镜	-850	—	-90

由于三镜面形为抛物面,可以对来自0°视场的平行光完美聚焦,0°视场调制传递函数直接达到衍射极限,加上其他视场光线增大视场后,其对应的光路图和传递函数曲线如图3所示,可以看出轴外视场成像质量相对较差,这在后期优化中进行校正。

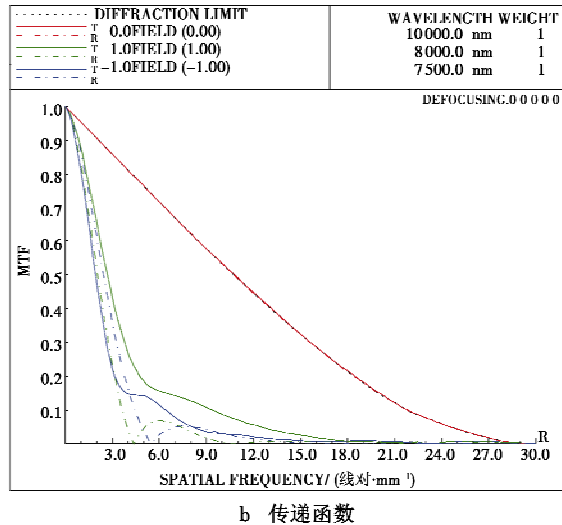
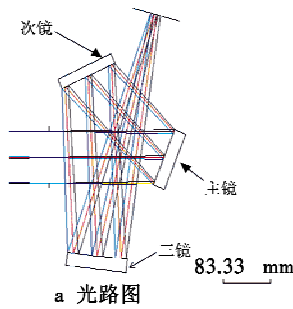


图3 初始结构及调制传递函数
Fig.3 Initial configuration and MTF

针对离轴系统的像差特点,如果像差校正类型与视场无关,可以在入瞳处设置面形变量,校正球差,如果校正像差类型与视场相关,应在离入瞳较远的面设置自由曲面,校正与视场相关的像差^[5-8]。在设计实例中,在离入瞳较近的主镜设置旋转对称非球面,在离入瞳较远的次镜、三镜处设置泽尼克多项式曲面,但在最初优化时,只把第一面镜子设置为非球面,其他两面镜子不设为变量,只对焦距进行约束,经5次迭代优化发现,像面会聚在主镜的成像光束之间,如图4a所示,这时需要加入其他约束,控制像面到光线2的距离,设置边界光线2到像面的距离小于-5 mm,使像面成像在理想位置,加入

约束前后对应的系统优化图和弥散斑图如图4所示。

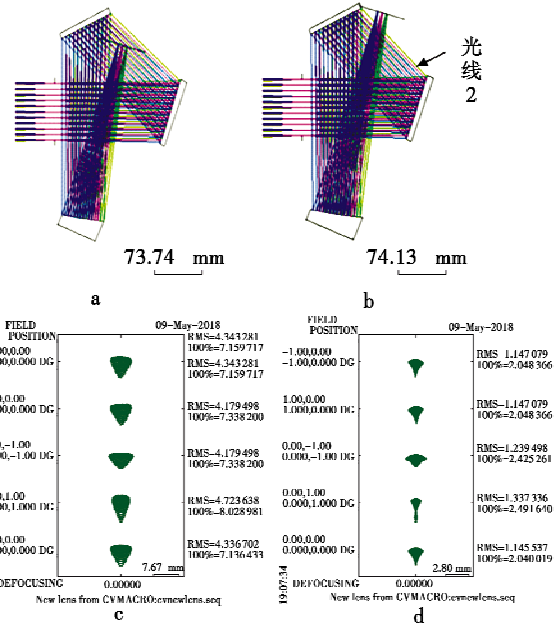


图4 约束前后弥散斑图

Fig.4 Spot diagrams with and without constraints

优化后,系统成像质量明显提升,各视场平均弥散斑大小由4.38 mm下降到1.2 mm,但此时的弥散斑仍很大,需要进一步引入其他面形校正像差。在离轴偏心系统中,镜子的离轴偏心会使系统引入较严重的轴外像差,这种像差由传统的二次曲面和非球面等轴对称面形无法校正,自由曲面为非旋转对称结构,在校正轴外像差方面具有天然优势,因此本文把二镜和三镜的面形设置为自由曲面^[11]。

泽尼克多项式曲面在校正离轴系统像差时有明显优势,Shack通过对波像差理论的修正,已经得出泽尼克多项式每一项对系统波像差的贡献量,泽尼克多项式的表达式为^[5-7]

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

式中: Z 表示矢高; r 表示径向值; c 为顶点曲率半径; k 为二次曲面系数;第一项整体为标准二次曲面; A_i 为泽尼克子项系数; Z_i 为泽尼克多项式第*i*项。由于泽尼克多项式各项在单位圆域内满足正交条件,高次项与低次项不相互干扰,并且泽尼克多项式曲面已经应用于光学加工和干涉检测,因此直接用泽尼克多项式设计自由曲面可以与加工、检测实现无缝衔接^[9-10]。

把次镜和三镜同时设置为泽尼克多项式曲面,设置1阶系数和5阶到25阶系数为变量进行优化,依然按照约束以上边界光线的方法进行优化,但会出现其他边界光线偏离的情况,如图5所示,这时需要全局控制所有边界光线,精确设定光学包络边界光线到镜面

的距离,从而实现光线不会溢出三面镜子围绕的中心区域,并实现体积压缩。

如图 5 所示,光线 1~光线 5 代表了整个光学系统的包络边界,通过压缩这些边界光线到镜面的距离就可以实现整体光学系统体积压缩,如果不加入这些约束条件,可能出现图 5 的情况,在优化过程中,控制以上边界光线到各镜面距离如表 2 所示。

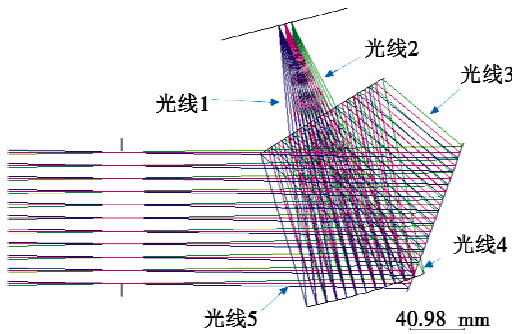


图 5 光线溢出示意图

Fig. 5 Optical system with overflowing rays

表 2 约束条件

Table 2 Constraints			mm		
光线	参照面	距离	光线	参照面	距离
光线 1	镜面 2	>20	光线 4	镜面 1	< -5
光线 2	镜面 1	>20	光线 5	镜面 3	< -5
光线 3	像面	< -5			

除了表 2 中所列约束条件外,还要对焦距进行约束,设置焦距为 200 mm,对系统进行优化迭代。经过验证,这种控制边界光线的优化方法具有很高的收敛速度,易于实现大视场、高成像质量,系统弥散斑收敛速度可用图 6 所示的迭代曲线表示。

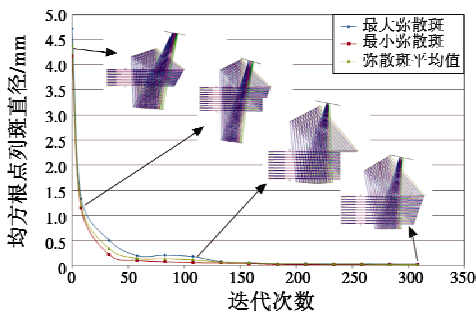


图 6 收敛曲线

Fig. 6 Converging curves

由图 6 可看出,系统优化迭代时,弥散斑直径接近指数速度收敛,经过 158 次优化迭代,弥散斑平均尺寸由 4.8 mm 缩减到 0.05 mm 以下;经过 258 次迭代,弥散斑平均尺寸已经达到 0.025 mm,最大弥散斑直径为 0.032 mm,最小弥散斑尺寸为 0.019 mm。按照如上方法迭代系统,并在迭代过程中逐步增加视场,就能实现系统的最终性能。这种优化方法不仅收敛速度快,而

且具有如下特点:1) 可直接控制系统包络边界光线到参照面的距离,便于压缩系统体积,操作方便,易于实现;2) 初始布局没有中心遮拦,在后续优化过程中省掉了从同轴系统到离轴系统的优化过程,节省大量时间。

按照以上设计方法,最终得到视场为 $8^\circ \times 8^\circ$ 、焦距为 200 mm, F 数为 2、系统长度为 200 mm 的紧凑型离轴三反系统,系统图和光学参数分别见图 7 和表 3、表 4。

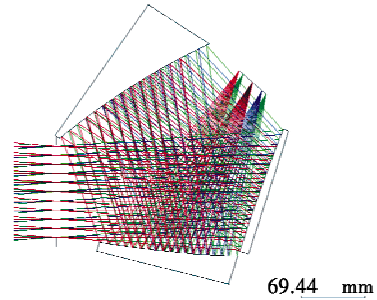


图 7 设计结果图

Fig. 7 Final layout of the system

表 3 光学系统数据

Table 3 Optimized parameters of the

optical system				mm
反射镜	曲率半径	反射镜面形	间隔	
主镜	3 628.3	非球面	-399.9	
次镜	552.8	自由曲面	133.3	
三镜	376.4	自由曲面	266.6	

表 4 泽尼克面形系数

Table 4 Coefficients of Zernike mirrors

泽尼克系数对应项	次镜	泽尼克系数对应项	三镜
二次曲面常数	0	二次曲面常数	-3.3625
A1	50.0466	A1	-75.7303
A5	-17.3349	A5	-44.0441
A6	-0.0282	A6	-0.0012
A7	-0.0590	A7	-0.0087
A8	-0.0109	A8	-0.0033
A9	-4.3910	A9	9.5107
A10	-5.9838	A10	4.3530
A11	-3.1922	A11	2.6287
A12	0.9244	A12	0.4626
A13	-1.7827	A13	-1.7163
A14	0.0031	A14	0.0012
A15	0.0385	A15	0.0060
A16	0.30088	A16	0.0013
A17	-0.0007	A17	-0.00005
A18	-0.0014	A18	-0.0003
A19	-0.6440	A19	0.6630
A20	-1.3400	A20	0.8884
A21	-0.2671	A21	0.1163
A22	-0.7342	A22	0.1133
A23	-1.1084	A23	0.0671
A24	-0.9646	A24	-0.1782
A25	-0.5173	A25	-0.1752

2.2 成像质量评估

图8采用均方根点列斑和畸变网格对系统像质评估,全视场点列斑平均尺寸为 $19.4\ \mu\text{m}$,满足 $24\ \mu\text{m}$ 探测器像元尺寸要求。对每个视场像质评估发现,除了个别边缘视场弥散斑略大于探测器像元尺寸外,其他视场弥散斑都满足要求。从畸变网格可以看出全视场畸变值在 2.34% 以内。

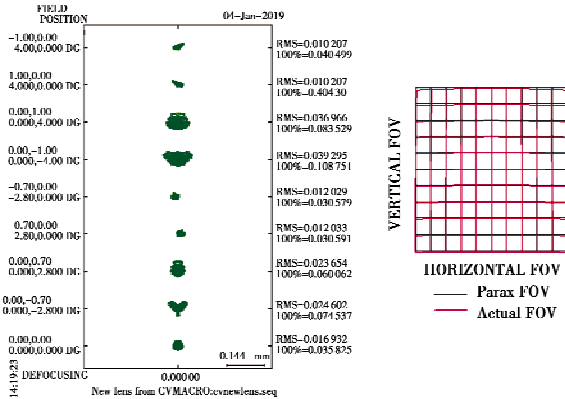
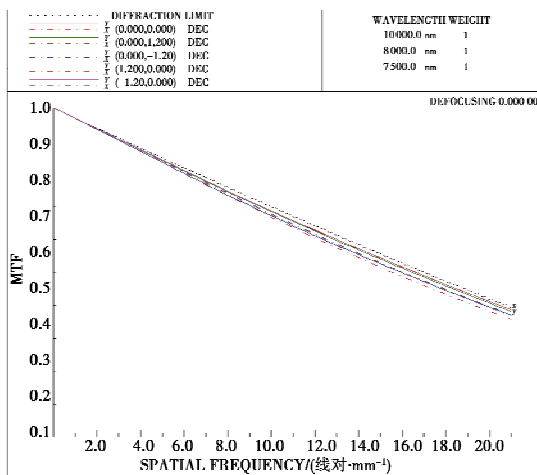


图8 均方根点列斑

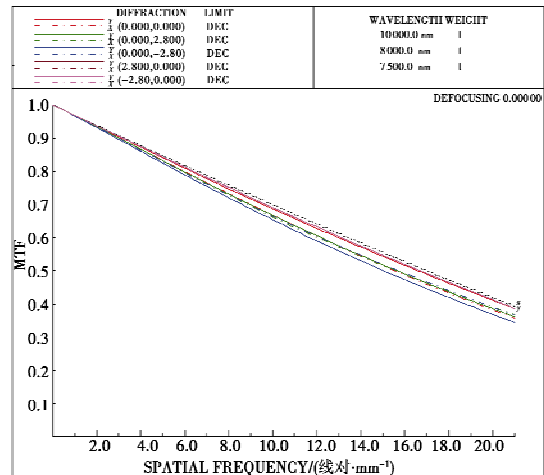
Fig.8 Spot diagram

图9采用调制传递函数分别对中心视场、0.3视场、0.7视场和边缘视场进行像质评估。 $24\ \mu\text{m}$ 探测器像元尺寸对应奈奎斯特频率为 $20.8\ \text{lp/mm}$ 。从结果可见,中心视场和0.3视场调制传递函数基本达到衍射极限,21 lp/mm处MTF接近0.4;0.7视场传递函数略低于衍射极限,21 lp/mm处传递函数高于0.35;边缘视场奈奎斯特频率对应的传递函数除了在俯仰 $+4^\circ$ 弧矢面为0.26左右,其他位置都达到0.3。

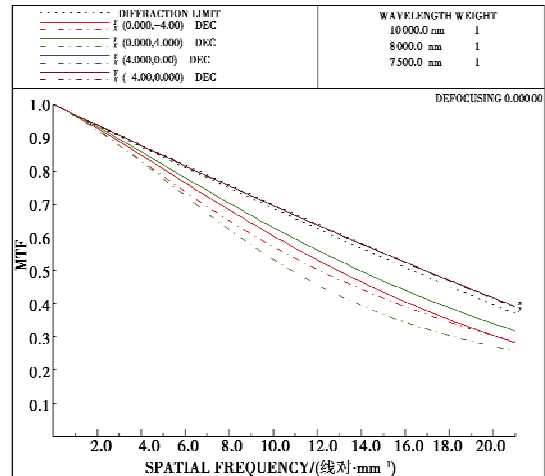
为了满足一般加工装配精度要求,在公差分析中选用CODEV公差自动填充选项,并利用像面作为补偿器对21 lp/mm处调制传递函数进行分析。结果显示,除了 $(0^\circ, -4^\circ)$ 视场处MTF为0.277外,其他视场MTF均为0.3以上,平均MTF达到0.35以上。



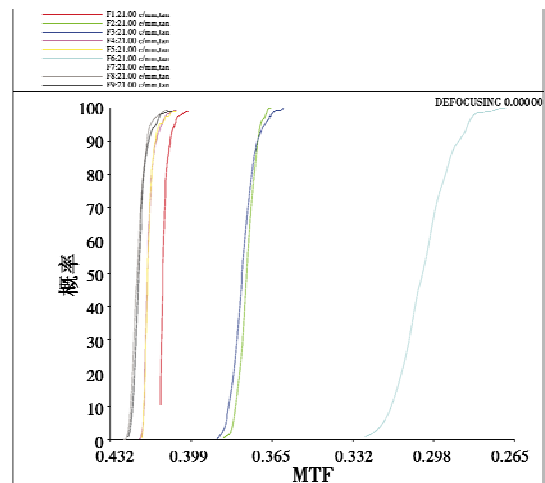
a 中心视场和0.3视场



b 0.7视场



c 边缘视场



d 公差

图9 视场调制传递函数及公差

Fig.9 MTF and tolerance

从整体子午弧矢面的像质评估来看,弧矢面的MTF普遍低于子午面的MTF,这说明系统有较大像散,但弧矢面的最低MTF也在0.3以上,从综合评估来看,系统成像性能满足需求。

该光学系统的波像差RMS设计值为 0.052λ ($\lambda =$

8000 nm),从设计和加工装配两部分等效贡献的情况考虑,该系统的理论波像差值可以达到 0.42 μm 。

光学系统一共由 3 片反射镜组成,3 片反射镜对波像差的贡献量按均等因子计算,即

$$r_{\text{rms}} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 r_{\text{rms}i}^2} \quad (2)$$

计算得到单片反射镜的加工精度为 0.24 μm ,满足自由曲面加工精度的要求。同时考虑镜面加工精度、热变形以及微小装配应力变形等形成的误差,系统装配中各镜面位置和角度的微小偏差,会引起像质进一步下降,依据经验约下降 30%,因此最终系统能够实现的波像差为 0.6 μm 。

3 结 论

基于空间光学系统体积压缩的需求,本文提出了一种高度压缩的离轴三反光学系统。通过引入自由曲面,弥补了传统二次曲面、非球面不能校正非对称像差和像质低的缺点。与传统离轴三反光学系统的设计思路不同,该设计方法不是逐步离轴优化共轴系统,而是直接给出一个特殊的离轴三反构型,优化过程主要靠控制边界光线到镜面的距离来实现紧凑布局,最终实现了 $8^\circ \times 8^\circ$ 视场、焦距为 200 mm、F 数为 2、工作波长为 7.5 ~ 10 μm 的紧凑型压缩离轴三反光学系统。

参 考 文 献

[1] 朱钧,吴晓飞,侯威,等.自由曲面在离轴反射式空间光学成像系统中的应用[J].航天返回与遥感,2016,

37(3):1-8.

[2] YANG T, ZHU J, WU X, et al. Direct design of freeform surfaces and freeform imaging systems with a point-by-point three-dimensional construction-iteration method [J]. Optics Express, 2015, 23(8):10233-10246.

[3] 赵亮.离轴三反射式光学系统设计[J].光电技术应用,2014,29(4):1-4,29.

[4] 郭永祥,李永强,廖志波,等.新型离轴三反射光学系统设计[J].红外与激光工程,2014,43(2):546-550.

[5] 宋岩峰,邵晓鹏,徐军.离轴三反射镜光学系统研究[J].红外与激光工程,2008,37(4):706-709.

[6] JOHN R R. Origins and fundamentals of nodal aberration theory [C]//International Optical Design Conference, SPIE, 2017:105900R.

[7] KEVIN P T, KYLE F, JANNICK P R. An analytic expression for the field dependence of fringe Zernike polynomial coefficients in optical systems that are rotationally non-symmetric [C]//Proceedings of SPIE, 2010:784906.

[8] JANNICK P R, KYLE F, GREGG E D, et al. Pamplousse: the optical design, fabrication, and assembly of a three mirror freeform imaging telescope [C]//Proceedings of SPIE, 2014:92930L.

[9] ZHANG X, ZHENG L, HE X, et al. Design and fabrication of imaging optical systems with freeform surfaces [C]//Proceedings of SPIE, 2012:848607.

[10] 朱浩,崔庆丰,朴明旭,等.圆周式无遮拦三反射镜光学系统设计[J].光子学报,2014,43(10):167-172.

(上接第 83 页)

面特征的均方根误差值将立体金属目标从干扰平面金属中区分出来的可行性,用实验数据验证了合理的阈值可以有效识别立体装甲目标。

参 考 文 献

[1] 张彦梅,赵治贝.坦克目标 8 mm 波段信号探测及目标识别技术[J].红外与毫米波学报,2009,28(3):177-180.

[2] 冯建利,赵裔昌,张效民.毫米波被动探测信号的熵特征研究[J].计算机测量与控制,2016,24(1):223-225.

[3] 张恒伟,高山,张明.目标面积与被动毫米波探测概率的仿真计算[J].红外,2014,35(3):27-32.

[4] 李兴国,李跃华.毫米波近感技术基础[M].北京:北京理工大学出版社,2009.

[5] 时翔,娄国伟,李兴国.装甲目标毫米波辐射温度的建模与计算[J].红外与毫米波学报,2007,26(1):43-46.

[6] 陈绍勇,郎量,张刚,等.装甲目标毫米波辐射测量的天线温度对比度研究[J].弹箭与制导学报,2009,29(5):297-300.

[7] 张祖荫,林士杰.微波辐射测量技术及应用[M].北京:电子工业出版社,1995.

[8] 李晓东,白桂明,谭晓晨.典型目标 RCS 的初步估算及仿真[J].雷达科学与技术,2006,4(6):332-334,338.

[9] 时翔.被动毫米波探测及其隐身技术研究[D].南京:南京理工大学,2007.