

文章编号: 1672-8785(2017)03-0006-06

自由曲面在离轴光学系统中的应用

周 鑫^{1,2} 肖锡晟¹ 孙胜利¹

(1 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083 ;

2 上海科技大学, 上海 201210)

摘 要: 针对自由曲面能提升成像光学系统的性能和校正像差的特点, 分析了自由曲面在离轴光学系统中的应用优势。光学系统选用视场角为 $30^\circ \times 11^\circ$ 、焦距为 150 mm、 F 数为 3 的 Cook-TMA。本设计中, 离轴三反光学系统的主反射镜采用自由曲面设计。分析了使用 Zernike 多项式曲面在大视场离轴反射式光学系统中对离轴光学系统性能的提升效果, 并与使用常规非球面的情况进行了比较, 分析了自由曲面的优缺点。结果表明, 自由曲面在提高离轴光学系统的成像质量方面具有更大的优势, 系统的平均传递函数比常规非球面提升了 15.9% 以上, 系统接近衍射极限。Zernike 多项式曲面在离轴三反系统中的应用效果良好, 系统的成像性能得到了较大的提升。

关键词: 自由曲面; 大视场; 离轴三反光学系统; Zernike 多项式

中图分类号: TH703 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.03.002

Application of Free-form Surface in Off-axis Optical Systems

ZHOU Xin^{1,2}, XIAO Xi-sheng¹, SUN Sheng-li¹

(1 Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2 Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China)

Abstract: According to the features of free-form surfaces which can improve the performance of optical systems and correct aberration, the advantages of using free-form surfaces in off-axis optical systems are analyzed. The optical system used is a Cook-TMA with a field angle of $30^\circ \times 11^\circ$, a focal length of 150 mm and a F number of 3. In this design, the main reflector in the off-axis three-mirror optical system is designed by using a free-form surface. The performance improvement of using Zernike polynomial surface in a wide field off-axis reflecting optical system is analyzed and compared with that of the use of conventional aspheric surface. The advantages and disadvantages of free-form surfaces are analyzed. The results show that free-form surfaces have more advantages in the improvement of imaging quality of off-axis optical systems. The average transfer function of using free-form surface is 15.9% higher than that of using conventional aspheric surface. The system is close to the diffraction limit. The use effectiveness of Zernike polynomial surface in the off-axis three-mirror optical system is good and the imaging performance of the system is improved greatly.

Key words: free-form surface; large field of view; off-axis three-mirror optical system; Zernike polynomial

收稿日期: 2017-02-13

作者简介: 周鑫(1991-), 男, 浙江湖州人, 硕士研究生, 主要研究大视场航天遥感器光学设计理论与实践。

E-mail: zhouxin1991@hotmail.com

0 引言

与折射式和同轴反射式光学系统相比, 离轴反射式光学系统具有无色差、无遮拦等优点。随着人们对遥感影像的要求越来越高, 常规的球面或非球面已难以消除因离轴光学系统视场、分辨率等性能提升带来的像差影响。自由曲面拥有复杂多变的面形变量, 可为光学系统提供足够的设计自由度, 尤其在离轴光学系统中可以实现很多以前无法达到的指标, 常被用来增大光学视场和矫正系统像差。光学自由曲面^[1]是指区别于球面、二次曲面和偶次非球面等传统面形, 具有非旋转对称特性的曲面。不同于照明领域^[2], 光学成像领域^[3]需要镜片面形的形状精度在几个微米内。以前由于受加工工艺和检测方案的制约和没有非常完善的设计方法, 自由曲面在离轴成像光学系统中并未得到广泛应用。如何才能高效、完善地将自由曲面的面形用电脑可计算、机械可加工的形式表征出来, 一直是困扰研究人员的一大难题。

随着科技的进步, 自由曲面在离轴光学系统中变得越来越重要。2008 年, 浙江大学的孙旭涛^[4]在研制的超薄投影光学系统中, 采用自由曲面设计了其中的离轴反射光学系统, 实现了视场角的扩展, 达到了 130°。清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室的朱钧^[5]等人利用自由曲面研制了一个 F 数为 1.38、视场角为 4° × 5° 的离轴三反光学系统, 用于红外系统中时测试效果良好。2006 年在夏威夷岛上建成的 James Clerk Maxwell 望远镜上的 SCUBA-2^[6]广角成像仪, 通过用 9 块自由曲面反射镜增大视场角, 扩大了视野。2016 年 1 月成功建造完成、坐落于夏威夷的 4.2 m 直径的 Daniel K. Inouye 太阳能望远镜 (DKIST)^[7]的离轴主反射镜是采用 Zernike 多项式设计的, 这种离轴光学设计将杂散光减小到了最小化, 实现了约 20 km 的空间分辨率。

本文将分析考虑离轴成像光学系统的设计指标需求和光学自由曲面的相关特性, 研究光学自由曲面在离轴光学系统中的应用效果, 将离

轴三反光学系统的主反射镜设计为自由曲面, 并分析对比自由曲面和常规非球面的优劣。

1 自由曲面描述方法

1.1 NURBS 曲面

NURBS 曲面^[8]可用离散的网格状多边形控制节点向量表示。形式为

$$Q(u, \nu) = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} w_{i,j} B_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(\nu)}{\sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} w_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(\nu)} \quad (1)$$

式中, $B_{i,j}$ 为曲面的控制顶点, 对应控制顶点 $B_{i,j}$ 的权重值, 该值实际上表示各控制顶点对曲面形状的影响程度。在实际应用中, 结合所需曲面面形, 并通过控制顶点、权重值及曲面上的已知点三者的关系变化, 找到控制变量与面形之间的关系, 以此来实现 NURBS 曲面的面形优化。需要注意的是, 如果想要获得复杂的面形, 控制点的数量也需相应增多, 这势必会导致复杂程度的增加, 而且在设计之前需要确定控制点。因此, 该方法在光学自由曲面中的应用不如多项式描述法广泛。

1.2 Zernike 多项式

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_i^n A_i Z(x, y) \quad (2)$$

式中, N 为多项式的项数^[9], A_i 为第 i 项的系数, c 为顶点的曲率, r 为径向口径, ρ 为极坐标的半径, φ 为极坐标的角度。Zernike 多项式是多项式描述法中最常用的一种。ZEMAX 软件中可选取 Zernike fringe sag (泽尼克边缘矢高) 来设计离轴三反光学系统的主镜。Zernike 多项式表征函数具有优秀的全局面形表征能力, 而且它具有一个很重要的特性, 就是在单位圆域上正交。在优化过程中, 如果设计需要添加新的高阶项来进一步完善自由曲面, 由于正交性, 新的项加入并不会引起其他项的系数的变化, 而且还可以根据结果找出贡献非常小的项, 将其删减。更重要的是, Zernike 多项式与 Seidel 像差具有

很好的对应关系^[10]，见表1。进行像差校正时可以方便地利用这种对应关系，优化过程更具简便性和针对性。

表1 Zernike 多项式的系数表达式及与 Seidel 像差的对应关系

Z	多项式表达式	对应 Seidel 像	像差图样
1	1	常量	
2	$\rho \cos \theta$	X 轴向倾斜	
3	$\rho \sin \theta$	Y 轴向倾斜	
4	$\rho^2 \cos 2\theta$	初级像散	
5	$2\rho^2 - 1$	离焦	
6	$\rho^2 \sin 2\theta$	Y 轴 45° 像	
7	$\rho^3 \cos 3\theta$	X 轴三阶彗	
8			

2 主要内容

本文中，离轴成像光学系统的参数由其所在轨道高度、刈幅宽度、地面像元分辨率 (Ground Sampling Distance, GSD)、光谱范围以及探测器像元尺寸等参数决定。具体参数见表2。

表2 光学系统设计的指标要求

指标项	参数值
轨道高度	100 km
刈幅宽度	53.6 km
地面像元分辨率 GSD	4 m
光谱范围	0.4~1.4 μm
CCD 像元尺寸	6 μm × 6 μm

通过焦距与地面像元分辨率、探测器像元尺寸和轨道高度之间的关系，我们可以计算得到：

$$\begin{aligned} \text{焦距: } f &= \frac{\text{探测器像元尺寸} \times \text{轨道高度}}{\text{GSD}} \\ &= \frac{6 \times 100}{4} = 150 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3)$$

刈幅宽度、轨道高度和全视场角的关系如图1所示。由此可计算得到光学系统的全视场角。

$$TFOV = 2 \arctan\left(\frac{W}{2H}\right) = 30^\circ \quad (4)$$

为了实现设计所需的 GSD，要求 $\frac{GSD}{H} \geq \frac{\lambda}{D}$ ，所以光学系统的相对口径应大于 35 mm。综合考虑系统的技术指标和整体的外形尺寸，可以确定相对孔径为 1/3，即系统 F 数为 3。最终的系统参数见表3。

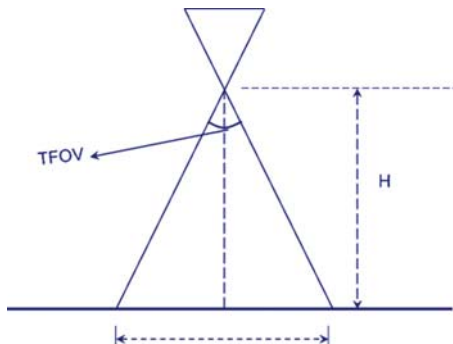


图1 刈幅宽度、轨道高度和全视场角的关系示意图

表3 离轴三反光学系统的参数

指标项	参数值
焦距 /mm	150
入瞳直径 /mm	50
F 数	3
视场角 / °	30×11
波长范围 /nm	400~1400

本文采用离轴三反光学系统，根据所需的技术指标来计算出光学系统的初始结构参数，并设定初始结构为同轴三反光学系统，然后将同轴三反光学系统进行偏心和倾斜，得到离轴三反光学系统，并对其进行结构优化。

设计步骤可分为以下几步：(1) 利用设定的结构参数求解反射镜的曲率半径和三面反射镜的间距；

(2) 求解三面反射镜的偶次非球面的圆锥系数；

(3) 求解完同轴系统参数后进行偏心和倾斜，以此来消除由同轴系统引起的中心遮拦，然后利用 Zemax 进行进一步的结构和面形优化，以完善成像质量。

本文设计的系统是无中间像的 Cook-TMA，其 F 数为 3，视场角为 $30^{\circ} \times 11^{\circ}$ ，焦距为 150 mm。得到的光学系统光路和参数如图 2 和表 4 所示。

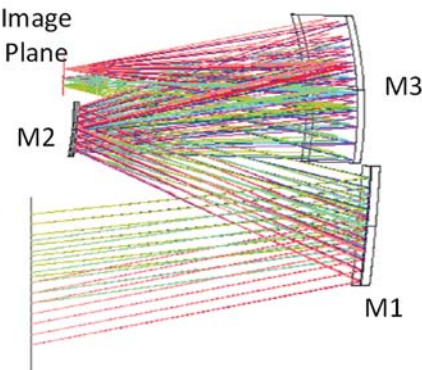


图 2 离轴三反光学系统的仿真图

3 成像质量评价及对比分析

本文的重点在于，设计偶次非球面组成的离轴三反光学系统后，利用自由曲面替换离轴

三反光学系统的主镜面形，并评价自由曲面在离轴光学系统中的矫正像差的应用效果。分析比较自由曲面和常规非球面对离轴光学系统成像质量的提升优劣。在 Zemax 中将离轴三反光学系统的主镜面形修改为 Zernike 多项式，将多项式系数 (本文选定前 8 项进行优化) 设定为优化变量，得到最终的结果，具体结果见表 5。

本文采用调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 曲线、畸变图和点列图来评价该离轴光学系统的成像质量。

MTF 值越大，说明该空间频率处的明暗锐度越大，越能被清晰分辨。从图 3 中可看出，在 50 lp/mm 处，偶次非球面的全视场 MTF 值约为 0.5，而 Zernike 多项式曲面的全视场 MTF 值在 0.6 以上，可认为在离轴光学系统中，自由曲面在提升成像性能方面比偶次非球面有更大优势。

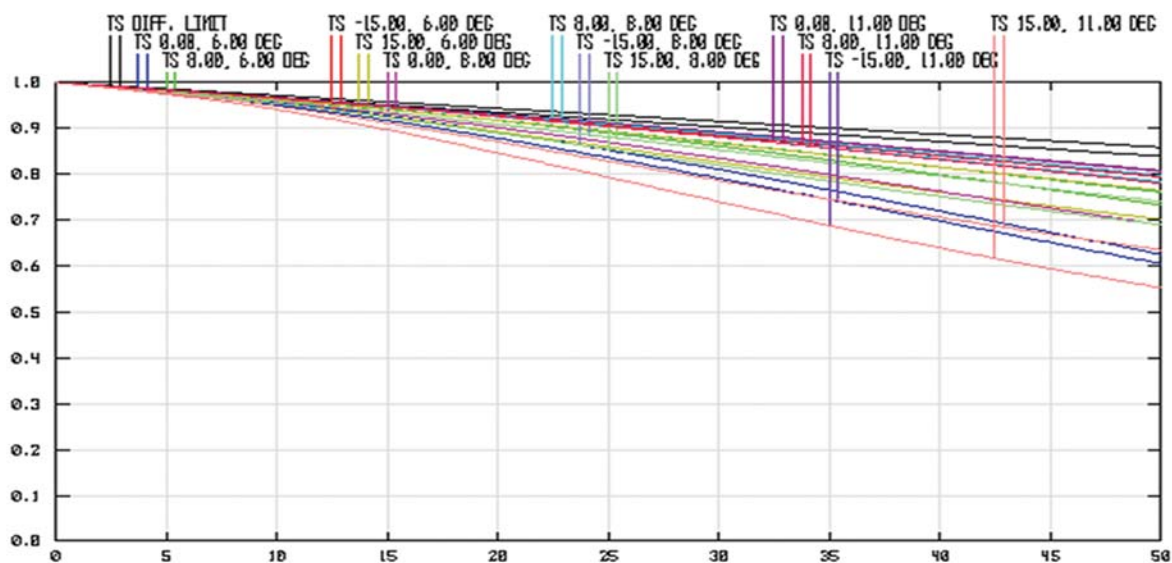
从图 4 可以看出，该系统存在一定的畸变，但该畸变处在系统误差范围内。

表 4 离轴三反光学系统的参数

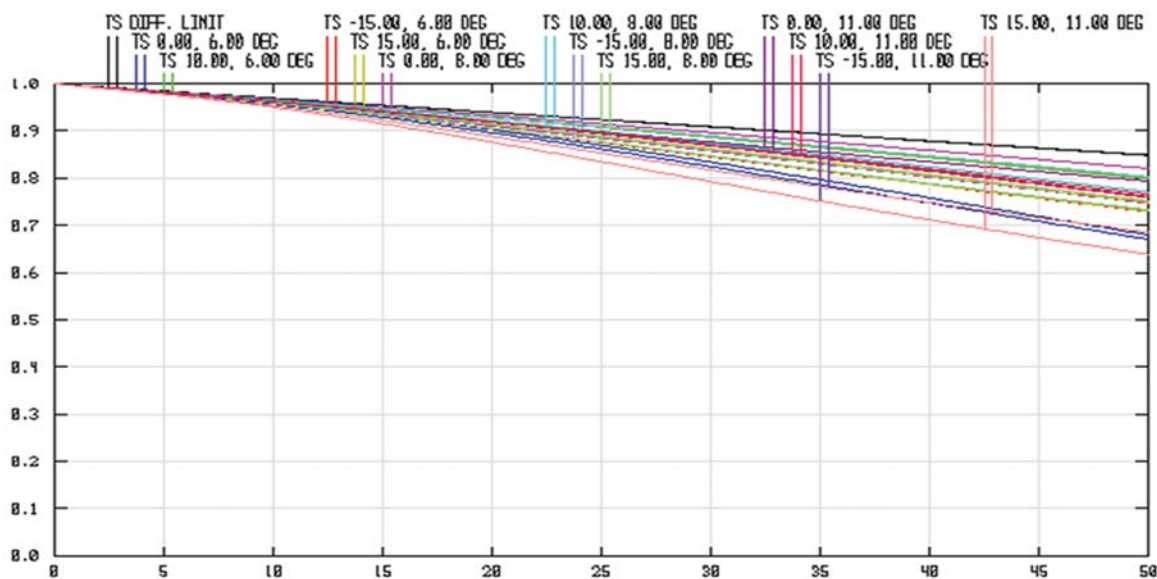
离轴三反	M1	M2	M3
曲率半径 /mm	-1505.46301	-254.933457	-292.252032
镜间距 /mm	-236.196637	222.031592	-233.932948
圆锥系数	-1.915422	3.435673	0.202390
尺寸 /mm	150 × 48	38 × 22	150 × 59
Decenter X		0	
Decenter Y		34.211390	
Tilt X		1.761231	
Tilt Y		0	
系统总长 /mm		275.00	

表 5 Zernike 多项式的系数值

多项式系数项	系数值
Z1	0
Z2	0
Z3	4.32e-7
Z4	9.42e-7
Z5	4.43e-5
Z6	-4.53e-6
Z7	-2.43e-10
Z8	4.83e-6



(a) 偶次非球面



(b) Zernike 多项式曲面对应的 MTF 曲线

图 3

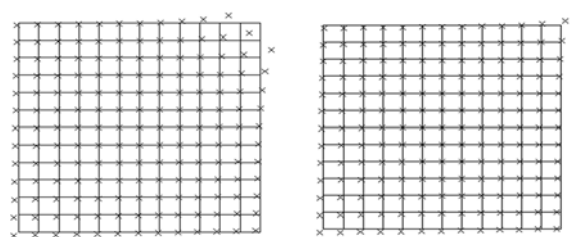


图 4 (a) 偶次非球面 (b) Zernike 多项式曲面对应的畸变图

Zernike 多项式的系统在 $+15^\circ$ 视场处的最

大畸变值为 3.9683%，而偶次非球面在 $+15^\circ$ 视场处的最大畸变值为 9.6704%。Zernike 多项式曲面带来的畸变更小。

点列图表示像面的弥散斑。弥散斑越小，就越接近或者小于艾里斑，系统就越完善。从图 5 中可以看出，整个离轴三反光学系统在像面上的成像质量良好，并且 Zernike 多项式的弥散斑比偶次非球面的小。

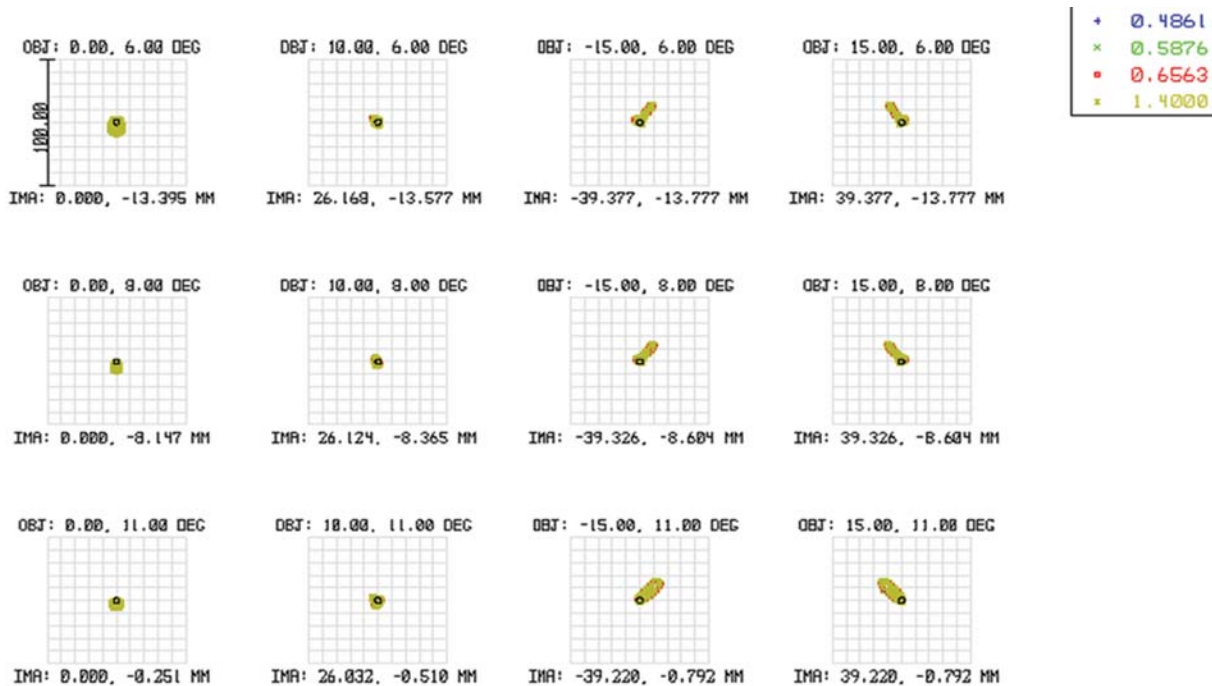
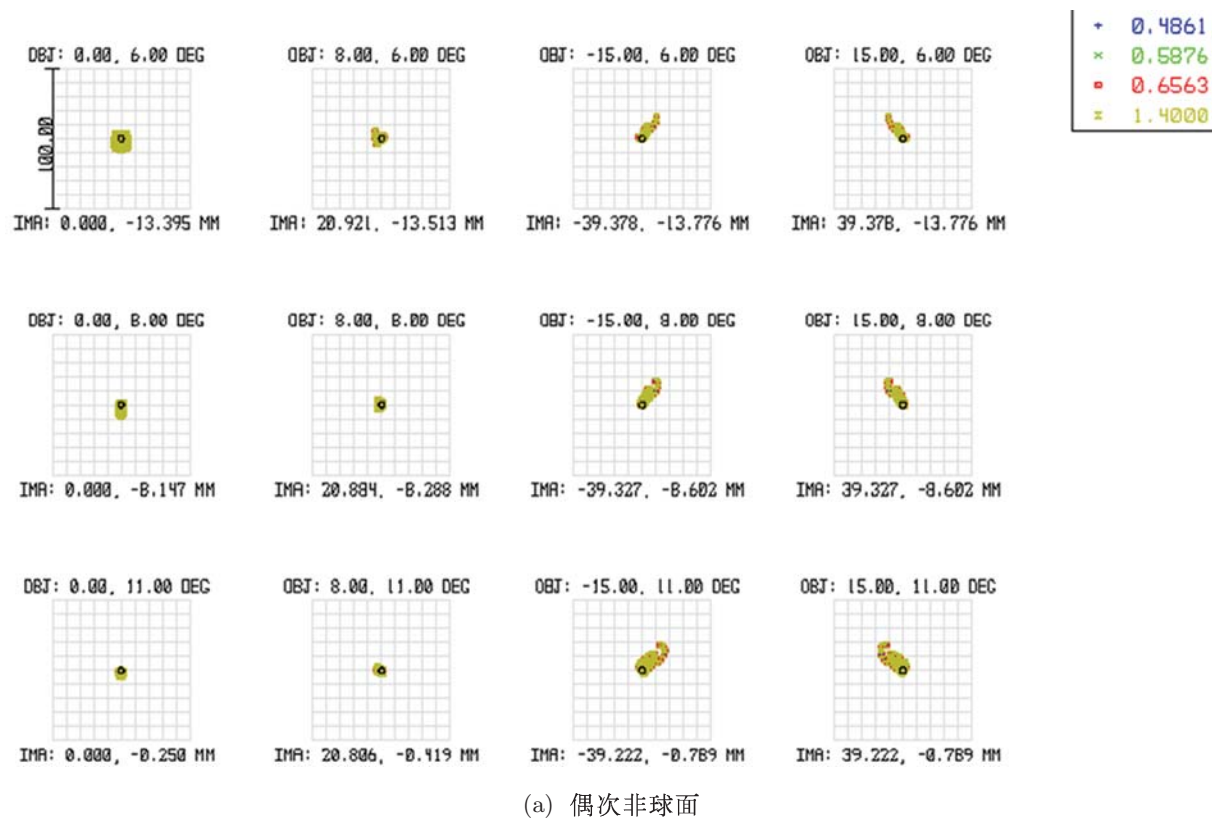


图 5

(下转第 16 页)