

# 含有自由曲面的大视场低畸变同轴三反射 光学系统设计

巩 盾 王 红

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要** 遥感测绘应用要求光学系统焦距长、幅宽大、畸变低、体积小,并且可以实现与卫星平台的一体化设计。经过结构优选,采用改进型同轴三反结构,同时实现了长焦距、大幅宽和低畸变。由于二次遮拦和大视场的影响,一般的非球面优化设计成像质量不能满足要求。自由曲面的加入有效地增加了光学系统优化的自由度,经过优化设计后,光学系统设计传递函数大于 0.418(72 lp/mm),最大相对畸变小于 0.00145%,光学系统成像质量明显提高。利用计算全息(CGH)技术实现了自由曲面的检测与精磨加工,设计残余波像差均方根(RMS)值为 0.007 $\lambda$ ,峰谷(PV)值为 0.027 $\lambda$ ,满足自由曲面的面形公差要求。加工、装调后实测光学系统的实验室静态传递函数,弧矢方向最低静态传递函数为 0.225(72 lp/mm),满足系统技术指标要求。

**关键词** 光学设计;同轴三反;自由曲面;计算全息

中图分类号 V248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0722001

## Optical Design of Large Field and Low Distortion Coaxial Three Mirror System with Free-Form Surface

Gong Dun Wang Hong

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract** Remote sensing mapping applications need optical system with long focal length, wide width, low distortion, small volume, and the optical system can be designed for integration on satellite platform. Through the structure selection, modified coaxial three mirror system is adopted to realize long focal length, wide width and low distortion at the same time. Because of the influence of the second obscuration and large field, the image quality of general aspheric optimization design cannot meet the requirements. Degrees of freedom are increased efficiently by the introduction of free-form surface. After optimization design, the optical design modulation transfer function (MTF) is greater than 0.418 at 72 lp/mm, and the maximum relative distortion is less than 0.00145%. Imaging quality is improved significantly. The free-form surface is tested and fine grinded by the application of computer-generated holography (CGH) technology, the root mean square (RMS) of remnant wavefront error is 0.007 $\lambda$ , and the peak to valley (PV) value is 0.027 $\lambda$ , remnant wavefront error meet the requirements of free-form surface irregularity tolerance. Laboratory static MTF is tested after processing and adjustment, the minimum static MTF is 0.225 at 72 lp/mm, the image quality meet the requirements of technical indicators.

**Key words** optical design; coaxial three mirror system; free-form surface; computer-generated holography

**OCIS codes** 220.1250; 220.4830; 220.4840

## 1 引 言

目前,空间遥感光学系统正朝着长焦距、大幅宽、

小体积和轻量化方向发展,其中反射式光学系统由于具有无色差、小体积、轻量化等优势而在空间遥感系

收稿日期: 2014-01-06; 收到修改稿日期: 2014-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(60507003)

作者简介: 巩 盾(1982—),男,博士,副研究员,主要从事光学设计和光学仪器总体设计等方面的研究。

E-mail: gongdun@sina.com

统中得到了广泛应用。反射系统主要包括两反射系统和三反射系统等。两反射光学系统轴外成像质量较差;三反射光学系统增加了系统优化自由度,能够提高成像质量、增大幅宽并减小畸变。三反射系统按照结构形式可分为同轴三反射系统和离轴三反射系统,离轴三反系统无遮拦、视场大、成像质量高,但相对于同轴三反系统有筒长较长、体积较大的缺点。由于发射运载能力有限,为了减小载荷体积与重量,许多空间遥感光学系统仍采用同轴三反结构<sup>[1-2]</sup>。

随着现今空间遥感对地探测需求的不断提高,要求遥感光学系统有更大的视场。为了满足空间遥感测绘要求,必须增大光学系统的视场并减小畸变,同时要保证系统的结构紧凑与成像质量,这就大大增加了光学系统设计的难度。因此在长焦距、高成像质量的前提下如何增大同轴三反系统的视场并减小畸变,成为现在空间遥感测绘的热点研究课题。

增大同轴三反系统的视场会带来更大的二次遮拦,降低光学系统传递函数(MTF),并且要兼顾光学系统的畸变与体积,造成了光学系统成像质量的下降,必须在同轴三反系统原有非球面的基础上增加系统的优化自由度,提高光学系统的成像质量。

自由曲面光学元件近年来已经成为光学元件的一个发展趋势,美国和欧洲等多家科研机构都对相关领域展开了研究。自由曲面无法用球面或者非球面表达式来表示,主要是指非旋转对称的曲面。比较常用的自由曲面数学模型是 Zernike 多项式和 XY 多项式类型。它具有灵活的空间布局和设计自由度,可以使光学系统的结构得到简化,成像质量得到有效提高。本文采用自由曲面与非球面相结合,提高了长焦距、大视场、低畸变同轴三反光学系统的成像质量,并减小了系统的体积与重量<sup>[3-5]</sup>。

## 2 光学系统参数

空间遥感光学系统的系统参数由遥感器的轨道高度、幅宽、地面像元分辨率和像元尺寸等技术指标决定。讨论的空间遥感测绘光学系统的技术指标主要有:

- 1) 轨道高度:650 km;
- 2) 幅宽:26 km;
- 3) 地面像元分辨率:1 m;
- 4) 像元尺寸:7  $\mu\text{m}$ ;
- 5) 光谱范围:510~690 nm;
- 6) 实验室静态传递函数:大于 0.18(72 lp/mm);
- 7) 相对畸变:小于 0.003%。

### 2.1 光学系统传递函数

静态传递函数  $F_s$  由光学设计传递函数  $F_{\text{des}}$ 、加工和装调的衰减因子  $F_m$ 、几何传递函数  $F_g$  和电子学传递函数  $F_e$  的乘积确定<sup>[5-6]</sup>:

$$F_s = F_o \times F_{\text{det}} = F_{\text{des}} \times F_m \times F_e \times F_g, \quad (1)$$

式中  $F_e$  为 0.90,  $F_g$  为 0.637, 根据工程经验取  $F_m$  为 0.8。计算得静态传递函数大于 0.18(72 lp/mm)时,光学设计传递函数应大于 0.4(72 lp/mm)。

### 2.2 光学系统焦距

地面像元分辨率(GSD) $d$  与焦距  $f'$ 、CCD 像元尺寸  $\alpha$ 、轨道高度  $H$  之间存在下列关系:

$$f' = \alpha \times H/d, \quad (2)$$

本项目拟采用的 CCD 像元尺寸为  $\alpha = 7 \mu\text{m}$ ,  $H = 650 \text{ km}$ ,  $d = 1 \text{ m}$ , 确定的光学系统焦距为  $f' = 4550 \text{ mm}$ 。

### 2.3 光学系统视场

相机的幅宽  $W$  与轨道高度  $H$ 、半视场角  $\omega$  关系如下:

$$W = 2 \times H \times \tan \omega. \quad (3)$$

根据技术指标要求,轨道高度 650 km 对应地面幅宽 26 km,计算得到相机的全视场角为 2.29°。

### 2.4 光学系统相对口径

为保证光学系统有足够高的曝光量,光学传递函数满足技术指标要求,并且要平衡光学系统的外形尺寸,光学系统的相对口径应大于 1/6.5,光学系统入瞳口径应大于 700 mm<sup>[6]</sup>。

## 3 光学系统结构的选择

空间遥感光学系统一般采用全反射式结构,两镜系统成像质量不能满足要求,四镜以上的多镜系统结构复杂,因此主要采用三镜系统。三反射镜系统可分为同轴三反和离轴三反两类,常用的三反射镜光学系统主要有三种结构: Cook 型离轴三反系统、Rug 型离轴三反系统和同轴三反系统,三种结构如图 1~3 所示<sup>[7]</sup>。

由图可知,在焦距相同的情况下,离轴三反光学系统成像质量好、幅宽大、畸变小,但筒长较长、体积较大,不适合较小的卫星平台和载荷与平台一体化设计;同轴三反光学系统体积较小、筒长较短,可以应用于小卫星平台并有利于卫星平台的集成化设计。图 3 中的视场倾斜同轴三反系统虽然没有二次遮拦,但在大视场情况下畸变较大,遥感测绘光学系统对畸变要求较高,因此,采用没有视场倾斜的改进型同轴三反结构。为了使筒长更短、结构更紧凑,在

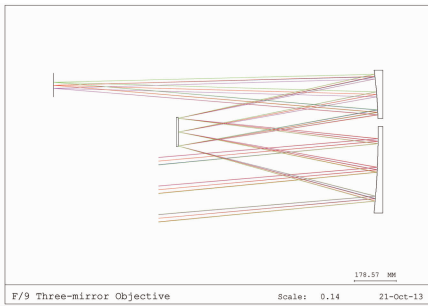


图 1 Cook 型离轴三反系统

Fig. 1 Cook off-axis three mirror system

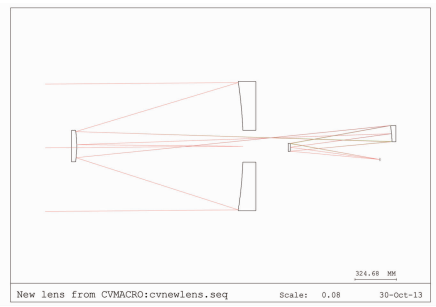


图 3 同轴三反系统

Fig. 3 Coaxial three mirror system

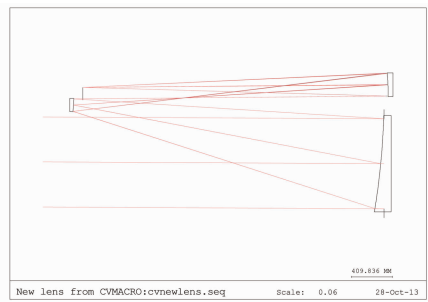


图 2 Rug 型离轴三反系统

Fig. 2 Rug off-axis three mirror system

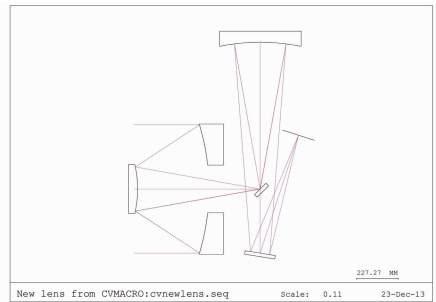


图 4 改进型同轴三反系统

Fig. 4 Improved coaxial three mirror system

一次像面处加入折叠反射镜使光路折转  $45^\circ$ ，光学系统结构如图 4 所示。

## 4 光学系统设计

### 4.1 光学系统的优化设计

根据光学系统技术指标计算，光学系统焦距为

4550 mm，全视场角为  $2.29^\circ$ ，相对口径为  $1/6.5$ 。光学系统焦距长、视场大、畸变小、成像质量要求高，设计难度较大。确定光学系统结构后，根据光学系统参数进行优化设计，严格校正畸变。优化设计后的光学系统结构如图 5 所示，光学系统主镜为高次非球面，次镜与三镜分别为双曲面和椭球面，主、次、三镜面型参数如表 1 所示。光学系统传递函数和畸变曲线分别如图 6 和图 7 所示，奈奎斯特频率下的光学系统传递函数值和各视场畸变如表 2、表 3 所示。

表 1 反射镜面型参数

Table 1 Surface parameters of mirrors

Mirror	Parameter				
	Aperture	Radius	Conic	6 <sup>th</sup> coefficient	8 <sup>th</sup> coefficient
Primary	700	-1179.622	-0.94	$-3.329 \times 10^{20}$	$-3.271 \times 10^{26}$
Second	259	-567.391	-2.959		
Third	426 × 270	1112.223	-0.418		

表 2 奈奎斯特频率下的光学系统传递函数值

Table 2 MTF of optical system at Nyquist frequency

MTF (Nyquist)	Field			
	0	0.5	0.7	1
Rad	0.432	0.431	0.431	0.400
Tan	0.394	0.389	0.394	0.375

这种结构的同轴三反光学系统虽然为轴对称系统，但由于光学系统第一像面的折叠反射镜为矩形，由它引起的二次遮拦也为矩形，即子午面与弧矢面

的遮拦比不同，因此光学系统子午与弧矢面的成像质量并不一致。

由图 6 和表 1 可知，弧矢面的光学系统传递函数要明显高于子午面，光学系统最低传递函数为最大视场的子午面传递函数，数值为  $0.375(72 \text{ lp/mm})$ 。推扫型遥感测绘光学系统的感光元件为线阵 CCD，线阵 CCD 在穿轨方向曝光成像，再对沿轨方向图像进行推扫拼接。对于光学系统，弧矢面为穿轨方向，子午面为沿轨方向，光学系统的单次曝光成像在穿轨

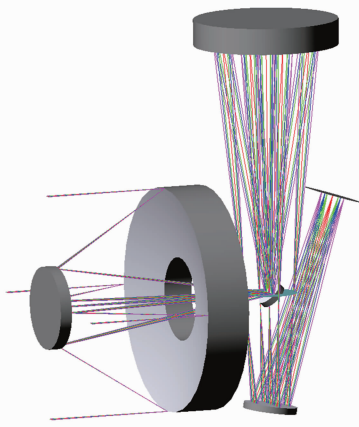


图 5 优化后的光学系统结构

Fig. 5 Structure of optical system after optimization

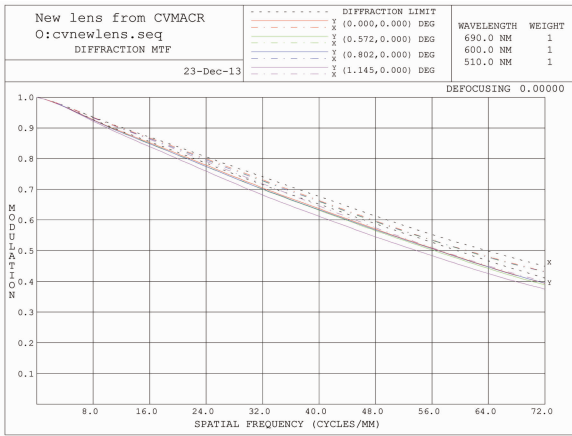


图 6 优化后的光学系统传递函数

Fig. 6 MTF curves of optical system after optimization

方向即弧矢面,推扫成像在沿轨方向即子午面。为了满足推扫成像图像拼接要求,子午面的成像质量也必须达到静态传递函数大于0.18的技术指标要

表 3 光学系统各视场畸变

Table 3 Every field distortion of optical system

Fields	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1
Distortion / %	0	0	-0.00002	-0.00006	-0.00017	-0.00025

#### 4.2 含有自由曲面的光学系统成像质量

自由曲面可以在不改变光学系统结构的基础上大大增加优化的自由度,提高成像质量。自由曲面的种类较多,可以应用于不同用途的光学系统。对于成像光学系统,像差校正是提高成像质量的主要手段,因此,光学系统采用与 Sediel 像差系数有对应关系的 Zernike 多项式自由曲面提高系统的成像质量。

Zernike 多项式与光学设计理论中的 Sediel 像差系数的对应关系如表 4 所示,其中  $R$  为正交坐标系内的旋转半径, $A$  为旋转角度,常用的标准 Zernike 系数一般取 36 项,表中只列出与初级像差对应的项<sup>[8]</sup>。

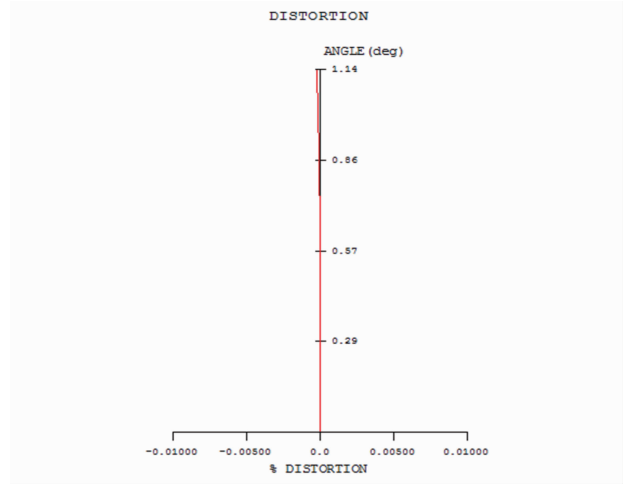


图 7 优化后的光学系统畸变曲线

Fig. 7 Distortion curve of optical system after optimization

求。经过优化并采用高次非球面的同轴三反光学系统仍然有残余像差,子午面传递函数(72 lp/mm)小于 0.4。经计算,残余像差主要为像散、场曲和高级彗差,为了校正残余像差需要增加系统的优化参数。优化设计过程中发现,增加反射镜的非球面级次已经不能进一步校正系统的残余像差,无法显著地提高成像质量,并且主、次、三反射镜都采用高次非球面会大大增加反射镜的加工和检测难度,不能满足工程需要。由于存在二次遮拦,一般需要增大光学系统的相对口径来提高光学系统的成像质量;同轴三反系统的入瞳口径即为主镜的口径,增大主镜口径会大大增加光学系统的重量与体积,在不增大主镜口径的前提只能采用其他手段增强光学系统的像差校正能力来满足光学系统的成像质量要求。

表 4 Zernike 多项式与 Sediel 像差的对应关系

Table 4 Relationship between Zernike polynomial and Sediel aberration

No.	Polynomial	Meaning
1	1	Bias
2	$R \cos A$	X Tilt
3	$R \sin A$	Y Tilt
4	$R^2 \cos(2A)$	Astg-X
5	$2R^2 - 1$	Power
6	$R^2 \sin(2A)$	Astg-Y
8	$(3R^3 - 2R) \cos A$	Coma-X
9	$(3R^3 - 2R) \sin A$	Coma-Y
13	$6R^4 - 6R^2 + 1$	Sphr

光学系统的次镜为凸非球面,加工和检测难度

较大,不适合加工自由曲面;光学系统的主镜为系统的孔径光阑,在孔径光阑附近增加优化自由度可以同时校正轴上与轴外各个视场的残余像差;三镜则远离孔径光阑,根据设计过程中的计算比较,对残余像差的校正不敏感;为了同时校正各个视场的残余像差并保证反射镜面型的可加工性,选择在光学系统的主镜上加工自由曲面。由于 Zernike 多项式自由曲面为非旋转对称曲面,因此加入自由曲面的光学系统也会存在一定程度的失对称,因此要对轴上

表 5 Nyquist 频率下的含有自由曲面光学系统传递函数值

Table 5 MTF of optical system with free-form surface at Nyquist frequency

MTF (Nyquist)	Field						
	0	0.5	0.7	1	-0.5	-0.7	-1
Rad	0.471	0.462	0.463	0.464	0.462	0.463	0.464
Tan	0.431	0.430	0.434	0.418	0.430	0.434	0.418

表 6 含有自由曲面的光学系统各视场畸变

Table 6 Every field distortion of optical system with free-form surface

Fields	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1
Distortion / %	0.00145	0.00144	0.00143	0.00139	0.00129	0.00120

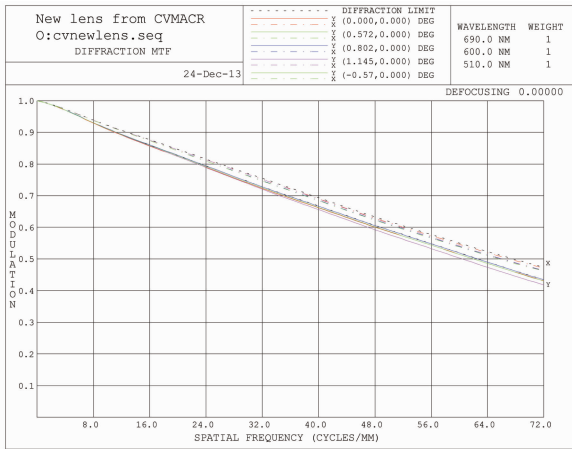


图 8 含有自由曲面的光学系统传递函数

Fig. 8 MTF curves of optical system with free-form surface

经过表 2 与表 5 的比较,加入自由曲面后的光学系统成像质量明显提高,最低传递函数为 0.418 (72 lp/mm),满足光学设计传递函数大于 0.4 (72 lp/mm)的成像质量要求,实现了在保持光学系统结构尺寸和重量不变的前提下提高成像质量。自由曲面的加入虽然在一定程度地增大了光学系统的畸变,但最大相对畸变仍小于 0.003%,满足技术指标要求。

## 5 自由曲面的检测

自由曲面虽然可以增加光学系统优化的自由度、简化系统结构、有效地提高光学系统的成像质

与正、负轴外视场同时校正像差,避免各个视场的成像质量不一致。同时,虽然自由曲面的加入不会显著地影响畸变,但为了防止自由曲面光学系统优化过程中反射镜曲率与二次项系数的变化引起畸变增大,优化过程中仍要严格地控制光学系统畸变。

经过进一步优化设计,主镜为 Zernike 多项式型自由曲面的光学系统传递函数和畸变曲线分别如图 8 和图 9 所示,奈奎斯特频率下的光学系统传递函数值和各视场畸变分别如表 5 和表 6 所示。

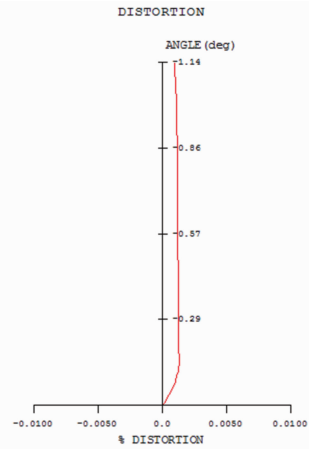


图 9 含有自由曲面的光学系统畸变曲线

Fig. 9 Distortion curve of optical system with free-form surface

量,但自由曲面的检测与加工一直是阻碍其广泛应用的技术难题。无论是非球面还是自由曲面等高精度光学表面都是通过多个加工、检测、再加工的循环完成的,因此,精确的检测手段也是加工自由曲面的基础。近几年,计算全息(CGH)技术的发展为自由曲面的检测提供了新的技术手段,促进了自由曲面技术的进一步发展<sup>[9-10]</sup>。

针对同轴三反光学系统的主镜参数,在完成光学设计后,采用零位补偿与计算全息数字样板相结合的检测方法实现了对大相对口径自由曲面主镜的检测,光路如图 10 所示,波前如图 11 所示。光学设

计模拟的检测结果残余波像差列均方根(RMS)达到  $0.007\lambda$ , 峰谷(PV)值达到  $0.027\lambda$ , 完全可以满足自由曲面主镜的面形公差要求, 为镜面的精磨加工提供了依据。

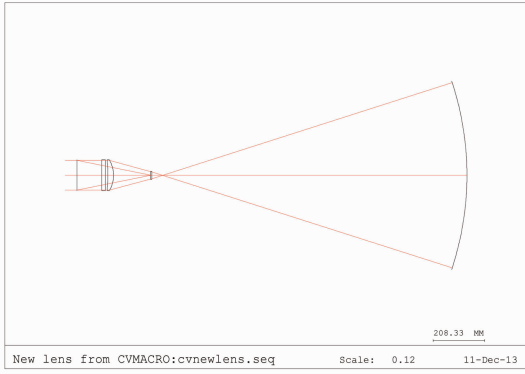


图 10 自由曲面主镜检测光路

Fig. 10 Test optical path of primary mirror of free-form surface

## 6 光学系统的实测成像质量

含有自由曲面的同轴三反光学系统在经过加工、装调后, 对系统的实验室静态传递函数进行实测。检测采用 25 m 平行光管, 将光学系统传递函数

表 7 Nyquist 频率下光学系统的实测传递函数值

Table 7 Test result MTF of optical system at Nyquist frequency

MTF (Nyquist)	Fields						
	0	0.5	0.7	1	-0.5	-0.7	-1
	0.242	0.233	0.230	0.225	0.238	0.237	0.228

## 7 结 论

用于遥感测绘的同轴三反光学系统具有体积小、筒长短、结构简单等优点, 可以实现卫星平台的一体化设计, 采用改进型结构可以同时实现长焦距、大幅宽和低畸变。由于二次遮拦和大视场的影响, 一般的非球面优化设计不能满足成像质量要求, 在不改变光学系统结构的前提下加入自由曲面, 增加了光学系统优化的自由度, 提高了成像质量。光学系统设计成像质量接近衍射极限, 传递函数大于  $0.418(72 \text{ lp/mm})$ , 最大相对畸变小于  $0.00145\%$ , 满足成像质量要求。利用计算全息技术实现了自由曲面的检测与精磨加工, 设计残余波像差 RMS 为  $0.007\lambda$ , PV 为  $0.027\lambda$ , 满足自由曲面主镜的面形公差要求。在加工、装调后对光学系统实验室静态传递函数进行实测, 光学系统弧矢方向最低静态传递函数为  $0.225(72 \text{ lp/mm})$ , 满足系统技术指标要求。

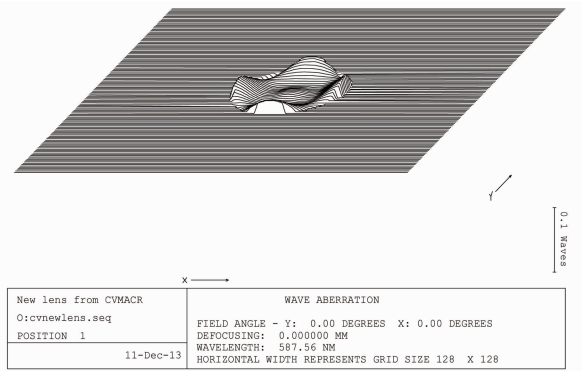


图 11 检测系统的波前差

Fig. 11 Wavefront error of testing system

测量分划板放于平行光管焦点处, 以模拟无穷远处发出的有对比度信息的平行光经过同轴三反光学系统成像, 通过分划板成像的对比度信息计算对比传递函数(CTF), 再将对比传递函数换算为实验室静态传递函数。由于在实验室环境中不能实现推扫, 因此只测试 CCD 方向即弧矢面的静态传递函数, 实测的光学系统实验室静态传递函数如表 7 所示。由实测结果可知, 全视场最低实测传递函数为  $0.225(72 \text{ lp/mm})$ , 正负视场成像质量对称, 满足技术指标要求。

## 参 考 文 献

- 1 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin, *et al.*. Design of long focal length space optical system with three reflective mirror [J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(4): 315-318.  
常 军, 翁志成, 姜会林, 等. 长焦距空间三反光学系统的设计 [J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 315-318.
- 2 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin, *et al.*. Design of optical system for space camera with long focal length, wide coverage and high resolution [J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(1): 55-58.  
常 军, 翁志成, 姜会林, 等. 宽覆盖、离轴空间相机光学系统的设计 [J]. 光学精密工程, 2003, 11(1): 55-58.
- 3 Yang Bo, Wang Yongtian. Computer aided design of freeform reflector [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(6): 721-724.  
杨 波, 王涌天. 自由曲面反射器的计算机辅助设计 [J]. 光学学报, 2004, 24(6): 721-724.
- 4 Li Rongbin, Du Xue, Zhang Zhihui. Design and Advanced Manufacturing Technology for Freeform Optics [D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic, 2005.  
李荣彬, 杜 雪, 张志辉. 自由曲面光学设计与先进制造技术 [D]. 香港: 香港理工大学, 2005.
- 5 R A Hicks. Direct methods for freeform surface design [C].

- SPIE, 2007, 6668: 666802.
- 6 Wang Jiaqi. Total Design of Optical Instrument [M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Textbook, 1998. 3-5.  
王家琪. 光学仪器总体设计[M]. 长春: 长春光学精密机械研究所研究生教材, 1998. 3-5.
- 7 Han Changyuan. Study on optical system of high resolution space camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(11): 2164-2172.  
韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2164-2172.
- 8 Optical Research Associates (ORA) Inc. CODE V Transition Guide for Current Users Version 9.5 [M]. California: Optical Research Associates, 2004. 87-100.
- 9 N Lindlein. Analysis of the disturbing diffraction orders of computer-generated holograms used for testing optical aspherics [J]. Appl Opt, 2001, 40(16): 2698-2709.
- 10 Liu Hua, Lu Zhenwu, Li Fengyou, *et al.*. Analysis for property of CGH on spherical surface used for aspheric surface testing [J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(7): 38-41.  
刘 华, 卢振武, 李凤有, 等. 用于非球面检测的球面计算全息图特性分析[J]. 光电工程, 2004, 31(7): 38-41.

栏目编辑：韩 峰