

文章编号 1004-924X(2011)12-2813-08

基于光学自由曲面的离轴三反光学系统

薛栋林*, 郑立功, 张 峰

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

摘要: 为了研制长焦距大视场离轴三反空间光学系统, 描述了自由曲面光学数理模型, 设计了基于自由曲面的离轴三反光学系统。针对焦距为 4 500 mm, 成像视场角为 11°, 系统总长与焦距的比值为 1/3 的光学系统, 对比分析了传统离轴三反光学系统和次镜为自由曲面的离轴三反光学系统的关键性能。在提出的光学系统中次镜采用自由曲面设计, 提升了光学系统的像差平衡能力; 最终选用相对孔径为 1/9.5 的设计方案, 使光学系统全视场平均波像差优于 0.030λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), 平均传递函数优于 0.434 (71.4 lp/mm), 接近衍射极限; 在同等条件下系统设计传递函数比传统离轴三反系统提高 5% 以上。优化设计后光学系统自由曲面次镜与理论球面偏差为 1.1λ , 采用定制的标准球面镜结合基于数字样板的非零位检测方法可完成面形实时高精度检测, 解决了大口径凸自由曲面检测的难题。结果表明, 采用基于自由曲面次镜的空间光学系统, 具有体积小、技术可实现性强、波像差和传递函数等关键性能优越等优点。

关键词: 光学设计; 长焦距大视场光学遥感器; 离轴三反光学系统; 自由曲面反射镜

中图分类号: TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111912.2813

Off-axis three-mirror system based on freeform mirror

XUE Dong-lin*, ZHENG Li-gong, ZHANG Feng

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

* Corresponding author, E-mail: xuedl@ciomp.ac.cn

Abstract: A freeform off-axis three-mirror system based on a freeform mirror was designed for the long focal length and wide-field off-axis three-mirror system in a space telescope. To obtain a system with a focal length of 4 500 mm, field of view of 11° and the ratio of the total length of system and the focal length in 1/3, the design and performance between traditional off-axis three-mirror system and freeform off-axis three-mirror system were compared. In the designed optical system, the freeform mirror was introduced to the secondary mirror to enhance system optimization and improve the balance capacity for optical aberration. After the comparison and optimization, the relative aperture of 1/9.5 was chosen. In the system, the average of wavefront error of all field of view is better than 0.030λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), and the average of the Modulation Transform Function (MTF) of all field of view is greater than 0.434 (71.4 lp/mm) that is close to the diffraction limitation. Furthermore, the MTF has im-

收稿日期: 2011-05-10; 修订日期: 2011-06-30.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 61036015); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 08663NJ090); 国防创新基金资助项目 (CXJJ-11-M05)

proved more than 5% compared to that of traditional TMA system and the departure of the secondary freeform mirror and theoretical spherical surface is only 1.1λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$). The highly precision testing can be accomplished only by a standard sphere combined with the non-null testing method based on digital mask, which solves the problem of large-aperture convex freeform mirror testing and is helpful for the manufacturing of freeform secondary mirror. The off-axis three-mirror system based on freeform secondary mirror shows its advantages in smaller cubage, better realizability in engineering, better wavefront error and higher MTF.

Key words: optical design; optical remote sensor with long focal length and wide field; off-axis three-mirror system; freeform mirror

1 引言

21 世纪全球范围内的高技术竞争主要体现在信息技术的竞争,其中空间遥感技术水平已被视为衡量一个国家高科技发展水平及潜力的重要标志。利用空间遥感技术能够遏制环境污染和生态破坏,为我们赖以生存的环境提供科学决策依据,保障国民经济和社会持续稳定发展。

目前,空间遥感光学系统正朝着大口径、长焦距、小体积和轻量化方向发展,其中反射式成像光学系统则由于反射式光学系统具有无色差、光学系统可折叠、便于轻量化等优势而在空间遥感系统中得到了广泛应用。反射系统主要包括两反射系统、三反射系统和四反射系统等,两反射光学系统结构简单,但是系统自由度少,能同时校正的像差数有限;三反射光学系统增加了系统优化自由度,能够较好地实现系统像差的校正和平衡^[1-4]。随着科技不断发展,现代空间光学遥感对成像性能和质量提出了更高的要求,这对仅使用球面、非球面的传统光学系统提出了巨大挑战。自由曲面光学元件具有非对称结构形式,能够提供灵活的空间布局,拓展了优化自由度,提升了光学系统的像差平衡能力,尤其提升了轴外像差平衡能力,从而显著改善了光学系统的视场适应能力。基于自由曲面的光学系统研究已经成为新一代高性能空间光学系统发展的重要方向。采用基于自由曲面的离轴反射式光学系统设计技术可以使光学载荷获得更大的成像视场,提升遥感器的成像质量,

避免采用多台相机视场拼接带来的制造成本和发射成本的剧增。

从 20 世纪 90 年代起,自由曲面首先在照明光学、头盔显示等系统中得到了成功应用^[5-6]。近年来,国外欧美发达国家投入大量资金和研究力量,在自由曲面光学系统相关研究技术领域取得了突破,为基于自由曲面的离轴光学系统研制奠定了坚实的技术基础。国际知名研究机构如美国国家航空航天局(NASA)及其 Goddard 飞行中心、喷气实验室(JPL),美国空间防御指挥部,美国 ORA 公司等均在相关的研究领域开展了大量研究,并已取得一系列研究成果。NASA 已经完成了应用自由曲面的空间相机设计、论证工作,进入工程化研制的红外光谱成像仪也采用了自由曲面;国际著名光学系统制造商 Leica 公司为欧空局(ESA)研制的新型 TMA(Three-mirror Anastigmat)相机也采用了自由曲面,全视场波像差由 $\lambda/7\text{ RMS}$ 提高到 $\lambda/20\text{ RMS}$ 。

考虑离轴三反系统的现状与需求,本文研究了基于自由曲面的离轴三反光学系统的设计方法,完成了次镜为自由曲面的离轴三反光学系统设计,设计的系统具有体积小、技术可实现性强,波像差和传递函数等关键性能好等优点。

2 自由曲面光学数理模型描述

自由曲面打破了常规非球面轴对称的限制,增加了优化自由度,提升了系统像差平衡能力,因

此,基于自由曲面设计的光学载荷对视场和口径的适应能力得到了相应的提升。目前,常规非球面的数理方程表述方式见式(1),传统离轴非球面是在常规轴对称非球面反射镜上取其相应子孔径获得的。由于常规非球面具有轴对称的特点,其可供优化的自由度只有二次及高次非球面系数,像差平衡能力有限。自由曲面在打破轴对称特性的同时也打破了常规非球面面型描述的唯一性。自由曲面的数理模型描述多样化,其合理性和最优性是自由曲面光学最为基础的理论性问题。代表性的自由曲面数学模型有泽尼克多项式(2)、XY多项式(3)、高斯多项式(4)等,其各有优缺点。

$$z = \frac{c^2 r^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} + Er^{12} + Fr^{14}, \quad (1)$$

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

$$z = \frac{c^2 r^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}} + \sum_{j=2}^{66} c_j x^m y^n$$

$$j = [(m+n)^2 + m + 3n]/2 + 1, \quad (3)$$

$$z(x, y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(x^2 + y^2)}} + \sum_i \phi_i(x, y) \omega_i. \quad (4)$$

3 基于自由曲面的光学系统设计与性能评价

光学系统设计首要考虑的原则为:在体积、重量允许条件下尽可能提高系统设计成像质量。在光学设计选型和参数确定时要综合考虑:用户提出的技术指标需求;现有采购渠道可获得的探测器的参数和性能;现有的加工、检测、装调、系统集成能力;另外,在设计过程中要兼顾技术发展的先进性。

光学系统的主要参数包括焦距 $f(\text{m})$ 、视场角 $\text{FOV}(\text{°})$ 、相对孔径 D/f 等。当探测器像元尺寸确定后,上述参数在很大程度上决定了系统设

计的传递函数(MTF)、地面像元分辨力(GSD)、成像带宽(SW)、信噪比(SNR)等重要性能指标。如某空间遥感器要求光学系统焦距为 4 500 mm,成像视场角为 11° ,且根据系统总体尺寸和体积的大小,要求光学系统设计总长与焦距的比值不超过 1/3。为了实现大视场设计,作者首先选用 COOK-TMA 离轴三反构型,见图 1,次镜为系统孔径光阑,光学系统基本对称,形成了一次成像的离轴三反射镜系统。针对不同相对孔径 D/f ($D/f=1/9.0$ 、 $D/f=1/9.5$ 、 $D/f=1/10.0$) 条件,完成了基于传统非球面的离轴三反系统光学系统设计,关键性能指标见图 2。

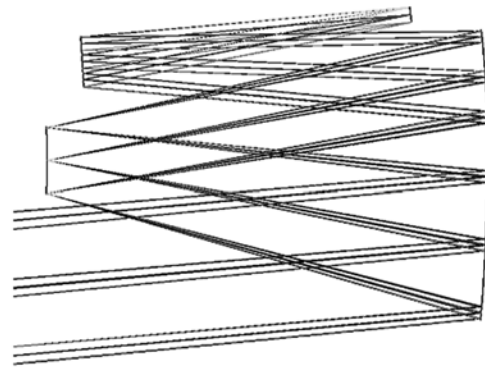
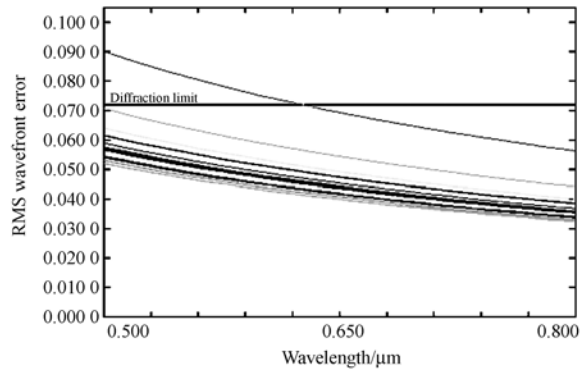
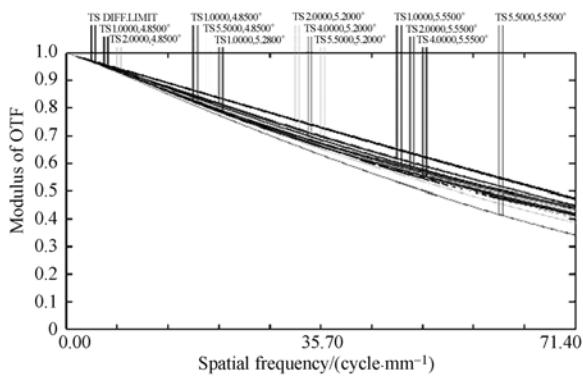


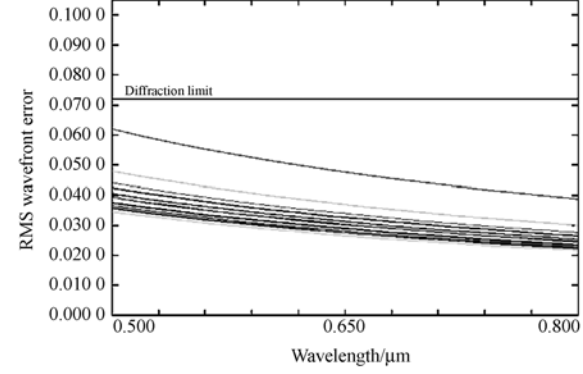
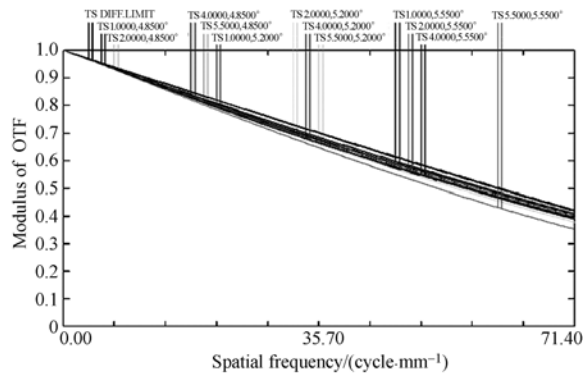
图 1 光学系统设计构型(COOK-TMA)

Fig. 1 Structure of optical system(COOK-TMA)

上述设计结果表明:在结构尺寸约束条件下,为了满足任务指标要求,采用常规离轴三反光学系统的长焦距大视场系统设计,轴外像差相对较大,与中心视场相比轴外视场传递函数下降量超过 10%,系统优化平衡能力有待提升,这对仅使用常规非球面的传统光学系统提出了巨大挑战。因此,本文考虑引入自由曲面来拓展优化自由度,提升光学系统的像差平衡能力。对于 COOK-TMA 系统而言,次镜为孔径光阑位置,地位特殊,全孔径使用,其面型对系统全视场均有贡献。因此,为了兼顾技术的可实现性以及技术发展的先进性,首先考虑光学系统次镜选用自由曲面(XY多项式)进行设计。对应传统离轴三反系统设计过程,针对不同相对孔径 D/f ($D/f=1/9.0$ 、 $D/f=1/9.5$ 、 $D/f=1/10.0$) 条件,完成基于自由



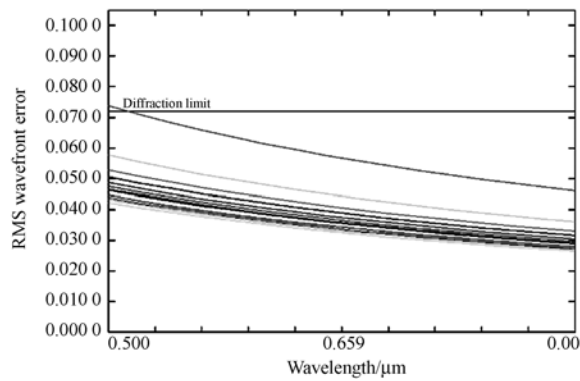
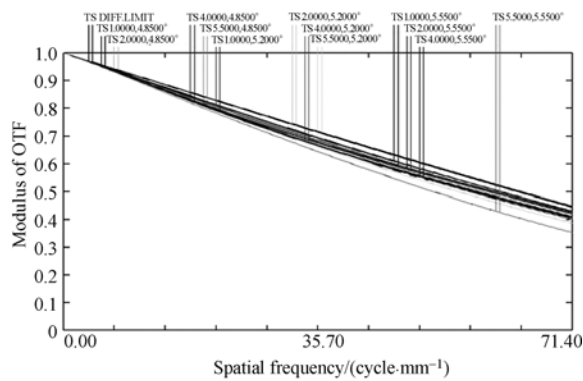
$(D/f=1/9, 0)$



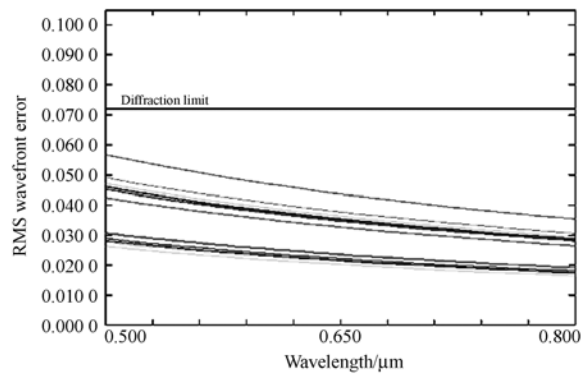
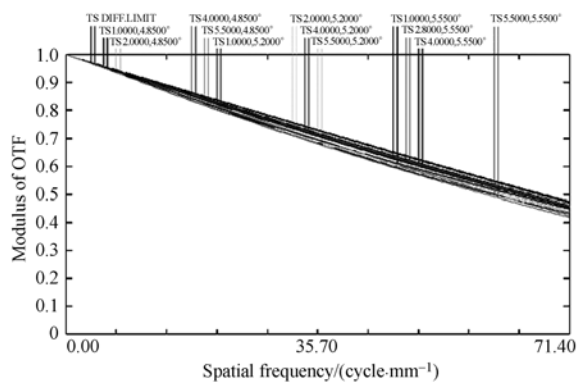
$(D/f=1/10, 0)$

图 2 基于传统非球面的离轴三反系统设计结果

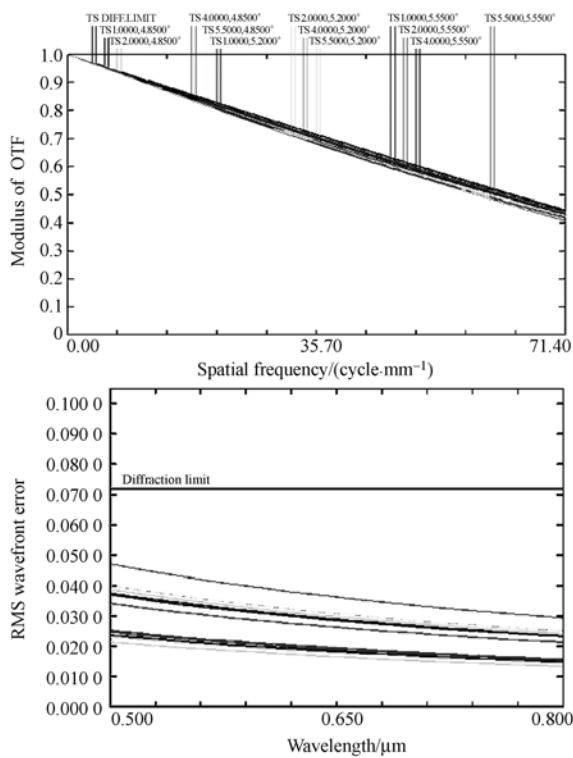
Fig. 2 Design results of off-axis three asphere mirror system



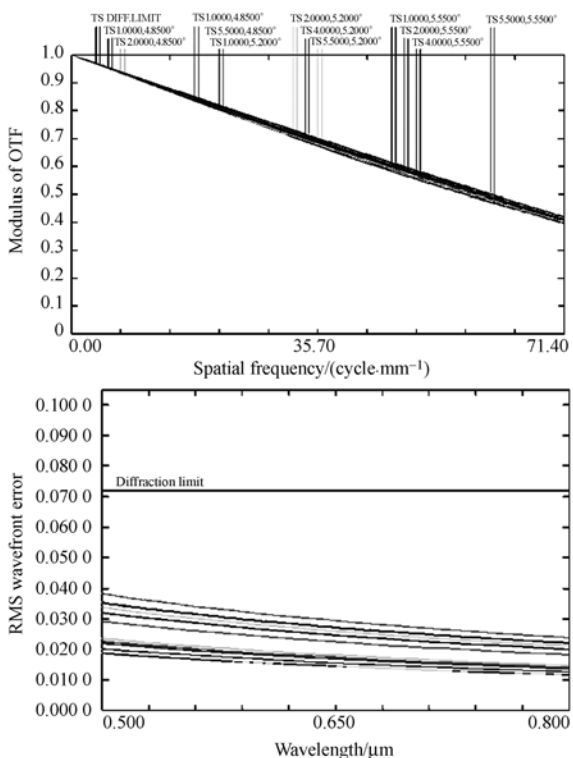
$(D/f=1/9, 5)$



$(D/f=1/9, 0)$



($D/f=1/9.5$)



($D/f=1/10.0$)

图 3 基于自由曲面的离轴三反系统设计结果

Fig. 3 Design results of freeform off-axis three mirror system

曲面次镜的离轴三反系统设计,关键性能指标设计结果见图 3。与基于常规非球面离轴三反系统设计对比结果见表 1。采用基于自由曲面次镜的新型离轴三反光学系统,轴外像质明显提升,全视场像质优势提升了传感器的成像质量。

表 1 设计结果分析对比

Tab. 1 Analysis statistical results of two systems

性能对比	设计条件		
	$D/f=1/9.0$	$D/f=1/9.5$	$D/f=1/10.0$
平均波像差	(1) 0.052λ	0.042λ	0.036λ
(λ=632.8 nm)	(2) 0.035λ	0.030λ	0.025λ
平均传递函数	(1) 0.421	0.412	0.399
(71.4 lp/mm)	(2) 0.455	0.434	0.413

注:(1)常规非球面系统;(2)自由曲面系统

从分析对比结果可以看出:次镜采用自由曲面设计后,相对孔径为 $D/f=1/9.5$ 的新型光学系统的关键性能指标已经明显优于相对孔径 $D/f=1/9$ 的传统离轴 TMA 光学系统,采用该方案能够有效降低光学系统重量,减小传感器的体积。因此,综合考虑系统性能指标需求以及传感器载荷体积、重量限制要求,最终选择相对孔径 $D/f=1/9.5$ 作为光学系统优选方案,光学系统各反射镜的设计参数见表 2。次镜采用基于多项式形式描述的自由曲面,共由 18 项组成,各项参数见表 3。在系统设计过程中综合考虑了次镜的研制难度,有效控制了次镜与标准球面的偏差,系统优化设计后次镜自由曲面与标准球面偏离量仅为 0.000 7 mm($1.1λ, λ=632.8$ nm),采用定制的标准球面镜结合基于数字样板的非零位检测方法即可完成面形实时高精度检测,解决了大口径凸自由曲面反射镜检测难题,能够有效指导自由曲面次镜的加工过程。

表 2 光学系统反射镜参数

Tab. 2 Design parameters of three mirror system

	顶点曲率半径 R/mm	二次项系数 K	通光口径 /mm	最接近球面/mm	
				半径	偏差
主镜	-6 235.3	-2.382 5751	036×511	-6 272.8	0.048
次镜	-2 523.9	-1.128 664	Φ125	-2 524.7	0.000 7
三镜	-4 196.4	-0.493 421	874×347	-4 205.3	0.019

表 3 次镜自由曲面多项式参数

Tab. 3 Polynomial parameters of freeform SM

序号	多项式	对应项系数
1	$X^1 Y^0$	0.001 230 404 6
2	$X^0 Y^1$	$8.520 258 3 \times 10^{-6}$
3	$X^2 Y^0$	-0.002 300 104 1
4	$X^1 Y^1$	0.000 190 622 66
5	$X^0 Y^2$	-0.002 185 315 7
6	$X^3 Y^0$	$-4.968 754 \times 10^{-5}$
7	$X^2 Y^1$	-0.000 120 299
8	$X^1 Y^2$	$-3.384 621 1 \times 10^{-5}$
9	$X^0 Y^3$	$-1.510 860 8 \times 10^{-5}$
10	$X^4 Y^0$	0.001 156 223 4
11	$X^3 Y^1$	-0.000 327 220 86
12	$X^2 Y^2$	0.002 176 800 3
13	$X^1 Y^3$	-0.000 286 250 32
14	$X^0 Y^4$	0.000 979 457 05
15	$X^5 Y^0$	$5.524 888 8 \times 10^{-5}$
16	$X^4 Y^1$	0.000 108 055 12
17	$X^3 Y^2$	$7.817 137 6 \times 10^{-5}$
18	$X^1 Y^0$	0.000 149 010 39

4 自由曲面高精度检测和加工技术

高精度光学元件的制造过程是经过多个“加工-检测-加工”循环完成的。在光学元件的高精度制造过程中,高精度检测手段为加工过程提供准确的反射镜面形误差分布是获得高精度面形加工结果的前提和保障。

4.1 自由曲面次镜凸反射镜检测

大口径凸非球面的检验一直是困扰光学检测技术人员的难题^[7],稳定高效的高精度检测手段是光学元件制造的关键环节。常用的凸反射镜检测方法包括无像差点检测、零位补偿检测、子孔径拼接检测等。在实际工程应用中,绝对“零位条件”是不存在的,非共路误差在光学检测中普遍存在。非零位检测与零位检测的唯一区别就是存在一定的非共路误差,如果非共路误差对检测结果精度的影响可以忽略或者在检测过程中能够有效标定非共路误差并予以去除,那么非零位检测就可以等效成零位检测。由于光学系统设计过程中优化控制了次镜与标准球面的偏差(偏离量仅为 $1.1\lambda, \lambda=632.8 \text{ nm}$),通过特殊定制标准球面镜见图 4,采用基于数字样板的非零位检测方法即

可完成该自由曲面的检测,从而有效指导自由曲面次镜凸反射镜的加工。基于数字样板的检测技术,在测量过程中会生成系统误差文件,利用 Zygo 干涉仪自带 Metropro 软件自动去除系统误差功能,如图 5 所示,可实现测量系统误差在线去除^[8]。

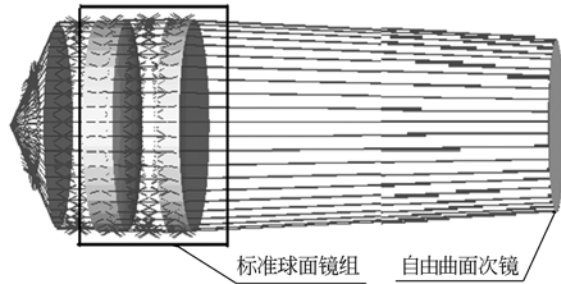


图 4 标准球面镜检测次镜原理图

Fig. 4 Structural drawing of SM testing model



图 5 Metropro 的系统误差去除功能

Fig. 5 Function of subtracting system error automatically

4.2 自由曲面次镜凸反射镜加工

离轴三反光学系统中次镜为自由曲面反射镜,它不具备回转对称性,其表面各点曲率半径不同,因此,其加工过程不可能像加工常规平面或球面那样采用与被加工工件尺寸相当的磨盘来实现^[9]。常用的方法是采取确定性的“子孔径研磨/抛光”技术路线,根据定量的面形检测数据,通过计算机控制一个小磨头,按照确定的加工轨迹对非球面光学表面进行研磨或抛光,通过控制磨头在工件表面的驻留时间、磨头与工件间的相对压力以及磨头的转速来控制材料的去除量。通过检测与加工过程的反复迭代实现自由曲面面形误差逐渐收敛修正,直到满足设计精度要求。加工设

备采用本研究室自行开发的 FSGJ 数控非球面加工中心,见图 6。它是一台建立在计算机控制光学表面成型技术基础上集快速铣磨成形、研磨、抛光以及在线检测于一体的非球面自动制造中心。该加工中心主体结构采用龙门式结构,磨头为主轴摆动式变速平转动方式;借助于汽缸加压和交流伺服电机驱动实现刀具(磨头)主轴沿 Z 方向的进给运动,通过控制汽缸压强来改变磨头与工件间的相对压力;V 轴可实现 $\pm 60^\circ$ 摆动,使小磨头总是能够以非球面表面法线方向为轴转动,磨头压力方向与法线方向一致。

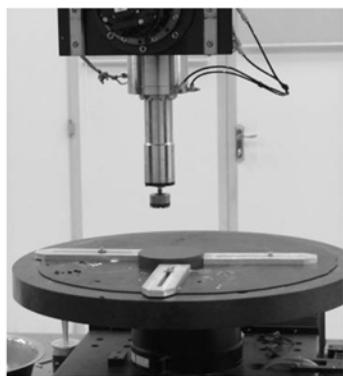


图 6 自由曲面凸反射镜数控加工

Fig. 6 Digital-controlled polishing of convex freeform mirror

参考文献:

- [1] 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.
HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2164-2172. (in Chinese)
- [2] 邓健, 张伟, 龙夫年. 大口径拼接式合成孔径光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(1): 29-34.
DENG J, ZHANG W, LONG F N. Optical design of large aperture segmented mirror system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 29-34. (in Chinese)
- [3] 金光, 张亮, 胡福生. 大 F 数高分辨率空间望远镜光学系统[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 155-159.
JIN G, ZHANG L, HU F S. Investing on space optical system of high F number and high resolution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 155-159. (in Chinese)
- [4] 梁士通, 杨建峰, 薛彬. 四反射镜光学系统像差分析与设计[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3300-3305.
LIANG SH T, YANG J F, XUE B. Aberration analysis and design of four-mirror reflective optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3300-3305. (in Chinese)
- [5] 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.
YANG B, WANG Y T. Computer aided design of freeform reflector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(6): 721-724. (in Chinese)
- [6] 程德文, 王涌天, 常军, 等. 轻型大视场自由曲面棱镜头盔显示器的设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 309-311.
CHENG D W, WANG Y T, CHANG J, et al. Design of a lightweight and wide field-of-view HMD system with free-form-surface prism [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 309-311. (in Chinese)

5 结 论

本文描述了自由曲面光学数理模型,研究了基于自由曲面的新型离轴三反光学系统的设计。针对焦距为 4 500 mm, 成像视场角为 11° , 系统总长与焦距的比值为 $1/3$ 的光学系统需求, 完成了次镜为自由曲面的离轴三反光学系统设计。对于相对孔径 $D/f=1/9.5$ 的设计方案, 光学系统全视场平均波像差优于 0.030λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$), 系统全视场平均传递函数优于 0.434 (71.4 lp/mm), 接近衍射极限, 系统波像差和传递函数等技术指标明显优于传统离轴三反光学系统。设计过程中兼顾了技术可实现性及技术发展的先进性, 优化设计后自由曲面次镜与理论球面偏差仅为 1.1λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$), 采用定制的标准球面镜结合基于数字样板的非零位检测方法即可完成面形实时高精度检测, 避免了大口径凸自由曲面检测的难题, 能够有效指导自由曲面次镜的加工过程。结果表明, 本文研究的基于自由曲面的新型空间光学系统具有体积小、工程可实现性强、性能优越等一系列优点, 有效提升了遥感器的成像质量。随着空间对地观测系统的不断发展, 基于自由曲面的新型光学系统将成为新一代航天遥感光学系统研究领域的重要发展方向。

- [7] 薛栋林,张忠玉,郑立功,等. 大口径碳化硅材料凸非球面反射镜的检验[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12):2491-2496.
XUE D L, ZHANG ZH Y, ZHENG L G, *et al.*. Testing methods for large aperture convex SiC asphere mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12):2491-2496. (in Chinese)
- [8] 闫锋. 应用波前编码技术的离轴三反系统研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2009.
- YAN F. *The research on off-axis TMA system applying wavefront coding technology* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)
- [9] 张峰. 高精度离轴凸非球面反射镜的加工和检测[J]. 光学精密工程, 2010, 18(12):2557-2563.
ZHANG F. Fabrication and testing of precise off-axis convex asphere mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12):2557-2563. (in Chinese)

作者简介:



薛栋林(1979—),男,江苏靖江人,博士,副研究员,主要从事光学加工、检测和空间光学系统设计等方面的研究。
E-mail: xuedl@ciomp.ac.cn



张峰(1969—),男,吉林省吉林市人,博士,研究员,博士生导师,主要从事非球面先进制造技术、磁流变抛光技术等方面的研究。E-mail: zhangfj@yahoo.com.cn



郑立功(1969—),男,吉林长春人,博士,研究员,主要从事先进光学制造技术的研究。E-mail: zhenglj@ciomp.ac.cn

●下期预告

高灵敏度腔增强吸收式乙炔气体检测系统

陈霄,隋青美,苗飞,贾磊,曹玉强
(山东大学控制科学与工程学院,山东济南250061)

基于超窄线宽激光特性和光源波长扫描技术,构建了高灵敏度腔增强吸收式乙炔气体检测系统。该系统采用超窄线宽可调谐半导体激光器作为光源,使用两块高反射率平凹透镜组成的光学谐振腔作吸收池,通过扫描腔长实现入射激光频率与谐振腔模式相匹配,利用激光失谐技术实现入射激光的快速断开,对微量乙炔气体浓度进行衰荡测量。利用腔增强吸收技术测得了激光衰荡时间和 $6\ 518.824\ \text{cm}^{-1}$ 附近的乙炔弱吸收光谱并进行了分析。实验结果表明,乙炔气体浓度测量线性相关系数优于 0.999,最大相对误差小于 2.5%,极限检测灵敏度为 2×10^{-6} ; 逐次充入一定体积乙炔气体,动态响应时间均小于 10 s。该检测系统精确度高、灵敏度高,具有较好的动态响应特性,可用于电力变压器故障气体实时在线监测。