

共轴偏光瞳折轴三反射光学系统装调方法

张学敏^{1,2} 韩娟¹ 段嘉友¹ 吴萌源^{1,2} 魏儒义^{1,2*}

(¹中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)
²中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 为了实现共轴偏光瞳折轴三反射光学系统的高精度装调,提高其光学成像质量,研究了大口径非球面反射镜的微应力装配以及光学系统共基准的调校方法。采用光学定心加工实现主、次反射镜光轴基准与相应构件机械轴基准的高同轴度;采用 Zygo 激光干涉仪检测波像差,指导主镜、次镜以及三镜的装配过程,保证各反射镜装配组件完成后的面形精度与裸镜一致,并最终指导完成主次镜光学系统以及三反射光学系统的像质调整。此外,由于整个光学系统是偏轴使用的,推帚方向垂直于电荷耦合器件(CCD)线阵方向,采用折轴镜旋转并修切折轴镜垫圈的方法来消除由于折轴镜倾斜而引入的系统像散。实际装配结果表明:光学系统各个视场处的成像质量均达到系统装配指标,光学系统波像差均方根(RMS)值小于 0.07λ ,传递函数(MTF)大于 0.57。

关键词 遥感;装调;微应力;成像质量;光学定心加工;同轴系统;偏光瞳

中图分类号 TN205 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0416003

Alignment Method of Coaxial Eccentric-Pupil Three-Mirror System

Zhang Xuemin^{1,2} Han Juan¹ Duan Jiayou¹ Wu Mengyuan^{1,2} Wei Ruyi^{1,2}

(¹*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China*)
²*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract In order to realize the high accuracy alignment of co-axial eccentric-pupil three-mirror system, and to improve the image quality, the micro-stress installation of large-aperture aspheric mirror and system benchmarking adjusting techniques are investigated. The optical calibration and mechanical calibration of primary mirror, secondary mirror and third mirror are unified by using optical alignment machining. The assembly of three mirrors, also the aberration adjustment of two-mirror system and three-mirror system are realized by the instruct of wavefront aberration distribution which is gained from Zygo interferometer. The pupil of coaxial three-mirror system is eccentric, and the sweeping direction is vertical with the linear charge coupled device (CCD) direction, the system astigmatism brought by the tilting of folded-axis mirror is removed by rotating the folded-axis mirror and trimming the neighboring circle. Alignment results indicate that the image quality targets of optical system's each field-view are achieved, the root mean square (RMS) of optical system is less than 0.07λ , and the modulation transfer function (MTF) is larger than 0.57.

Key words remote sensing; micro-stress; alignment; image quality; optical alignment machining; co-axial system; eccentric-pupil

OCIS codes 220.1140; 080.1010; 220.1250

1 引言

随着现代航天光学成像传感器地面覆盖面积的增大以及地面分辨率^[1]的提高,对航天光学成像传感器提出了长焦距、大视场和大通光口径等要

求^[2,3]。反射式光学系统不产生色差,孔径可以做得较大,宜于轻量化,在抗热性能方面有较大的优势,而且可以通过非球面来校正像差,使结构简单,像质优良。因此反射式光学系统在空间光学领域得

收稿日期: 2011-11-30; 收到修改稿日期: 2011-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(40805013)资助课题。

作者简介: 张学敏(1986—),女,助理工程师,主要从事光学装调及检测等方面的研究。

E-mail: zhangxuemin0325@gmail.com

* 通信联系人。E-mail: ruyiwei@opt.ac.cn

到了广泛应用。三反消像差系统^[4]相比离轴三反光学系统^[5~7],具有体积小、质量轻、热稳定性好和工艺成熟等优点,可以满足消像差、平像场等要求,适合在航天领域应用^[8]。

装调精度高低对整个光学系统的成像质量起关键的作用,尤其对于大口径的共轴三反光学系统,大口径主镜的面形保持技术、三反射镜光轴共基准是整个装配调整过程的关键所在。

本文基于干涉仪自准检验^[9~11]的方法实现主镜、次镜、三镜的微应力装配及三反光学系统整体像质的调整,分析了影响反射镜面形变化的原因并提出了相应的解决方案,提出采用将光学定心加工与放大检测相结合的方法实现各反射镜光学基准与机械基准的高精度重合。

2 光学系统原理

图 1 为一种共轴三反射光学系统^[8],分别是由主反射镜、次反射镜、折轴反射镜以及第三反射镜组成,主镜、次镜和三镜共轴放置,系统焦距为 5 m,通光口径为 500 mm。通过偏视场的使用可以完全避免二次遮拦,通过减小主次镜焦距进一步减少了次镜对主镜的中心遮拦。

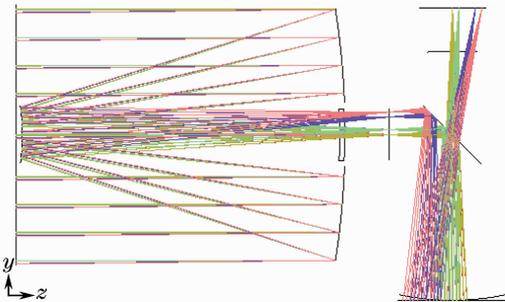


图 1 光学系统原理图

Fig. 1 Diagram of optical system

光学设计达到的波像差均方根(RMS)值小于 0.06λ (λ 是光波波长),传递函数(MTF)大于 0.59。但考虑到实际加工以及装配过程中引入的误差,通过公差分析,得到加工装调误差引起的 RMS 值变化量为 0.02λ ,由于调焦误差等加工装调因素引起的 MTF 损失值为 0.85。因此,光学系统装配完成后的像质要求波像差 RMS 值小于 0.08λ ,MTF 大于 0.45。

3 装调方案

3.1 反射镜的面型保持技术

光学成像遥感器主反射镜的重量随其口径的不断增大而增加,自重、热变形、环境等问题将对主镜镜面的面形精度产生影响。大口径主反射镜作为光

学遥感器的重要部件,它的面形精度直接影响成像质量的好坏^[12~14]。次镜、三镜以及折轴镜作为反射元件,其面形精度^[15]对整个系统的成像质量也很敏感,因此为了使三反射镜系统得到较好的成像质量,必须实现主反射镜、次镜及三镜的微应力装配,针对不同反射镜的设计思路,分析引起各反射镜面形变化的原因。

3.1.1 主反射镜

主镜通光口径为 520 mm,为椭球面反射镜,其面形检验是采用光学补偿法进行的,光路如图 2 所示,主镜裸镜的加工精度控制在 RMS 值小于 0.023λ 。

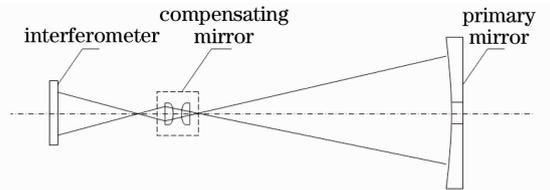


图 2 使用干涉仪检测主镜面形

Fig. 2 Wave aberration testing of primary mirror by using interferometer

主镜为微晶玻璃经减重后加工而成,采用中心轴固定的方式进行支撑。中心固定轴材料为钢,其端面和配合轴的垂直度精度为微米量级,配合轴的部分锥度及椭圆度都有很高的要求。当主轴和主镜孔配合时,由于轴孔配合间隙只有 0.01 mm,对于口径 150 mm 的孔,细微的不注意就会因方向选择不一致而引起固定变形。此外,主镜设计时虽然经过减重,但仍有 23 kg,装校中的自重变形在所难免。如果主轴和孔配合间隙不均匀,当主轴在不同状态工作时,就会由于主镜的自重改变配合间隙值,影响主镜的面形。因此在装配过程中需特别注意主镜、孔和端面的垂直度方向和中心轴端面的垂直度方向在装配时保持一致,防止主镜与中心轴配合间隙不均匀有误差引起的面形变化。

为了得到一致的配合间隙,采用卧式回转工装,检测主反射镜在此工装旋转 2π 时的面形变化,一旦在某一位置出现了主镜面形改变,证明此状态下配合间隙不对,应予以调整。经过多次调整,最终结果为旋转 2π 时间隙均匀,都能消除主镜自重引起的变形。检测主镜间隙装调正确性的装置如图 3 所示。

此外,由于主镜前端是用压圈压紧的,需注意压圈下橡胶垫的形状以及压圈压紧时的施力状况,防止压力过大引起主镜面形变化。主反射镜部件装配完成后,其 RMS 值小于 0.026λ ,和裸镜时的面形基

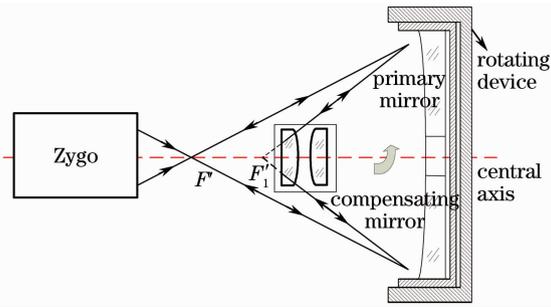


图 3 用干涉仪检测主镜的装配

Fig. 3 Wave aberration testing of primary mirror by using interferometer

本一致。

3.1.2 次镜、三镜

次镜为双曲面反射镜,次镜组件采用镜片与机械框间隙配合方式,辅以注胶固定。次镜裸镜及部件装配完成后的面形检测方案如图 4 所示。次镜组件采用镜框外圆注胶的方式将镜框与次镜固定,因此注胶点大小不一致会引起次镜径向拉力不均匀,导致面形变差。在装配次镜部件时,要精确控制每个注胶孔的注胶量,做到精确量化,实现均匀固定。次镜部件装配完成后其面形和裸镜时基本一致,RMS 值达到 $\lambda/40$ 。

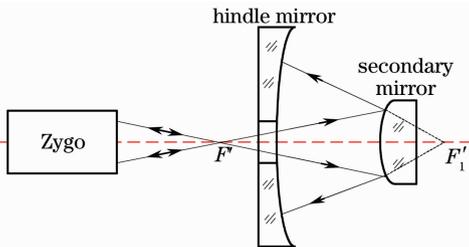


图 4 使用干涉仪检测次镜面形

Fig. 4 Wave aberration testing of secondary mirror by using interferometer

三镜为椭球面反射镜,三镜组件完全采用胶粘固定的方法。胶粘固定时胶斑位置分布、胶斑大小以及胶层厚度均会影响光学件的应力情况。因此胶粘过程中要按照有限元分析的胶粘位置以及胶粘力

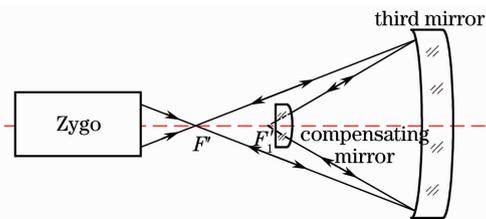


图 5 使用干涉仪检测三镜面形

Fig. 5 Wave aberration testing of third mirror by using interferometer

量进行点胶,而且要注意胶层薄且均匀,从而保证三镜胶粘后的面形与裸镜一致。装配过程中采用无像点法检验三镜裸镜和部件装后的面形,如图 5 所示。三镜装配后的面形和裸镜时基本一致,其 RMS 值保持在 $\lambda/40$ 。

3.2 光学系统共基准装调

成像完善的光学系统,要求在装调过程中实现各反射面主平面间的严格平行以及光轴的严格同轴,从而消除装配过程中产生的与设计无关的新像差,通常称为倾斜和偏心引起的失调像差。光学系统中任一面的初级像差的普遍表达式为^[16]

$$W(x, y, h') = a_s(y^2 + x^2)^2 + a_c h'(y^2 + x^2)y + a_a h'(3y^2 + x^2) + a_d h'^2(y^2 + x^2) + a_t h'^3 y, \quad (1)$$

式中 (x, y) 为理想系统瞳面坐标, h' 为理想像高, a_s, a_c, a_a, a_d, a_t 分别代表球差、彗差、像散、场曲和畸变。当该光学面倾斜和偏心后,其初级波像差变化量分别为

$$\begin{aligned} \delta W_{\text{til}}(x, y, h') = & -(MSa_c + 4msa_s)\beta x(y^2 + x^2) - \\ & 2(MSa_a + msa_c)\beta h'x^2 - \\ & (2MSa_d + msa_c)\beta h'(y^2 + x^2) - \\ & [3MSa_t + 2ms(a_c + a_d)]\beta h'^2 x, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \delta W_{\text{dec}}(x, y, h') = & -(Ma_c + 4ma_s)\Delta x(y^2 + x^2) - \\ & 2(Ma_a + ma_c)\Delta h'x^2 - \\ & (2Ma_d + ma_c)\Delta h'(y^2 + x^2) - \\ & [3Ma_t + 2m(a_c + a_d)]\Delta h'^2 x, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 M 为垂轴放大率, m 为瞳面放大率, β 为倾斜量, S 为物面顶点距光学面顶点的距离, s 为入瞳中心到光学面顶点的距离, Δ 为偏心量。

除不引起新的球差外,倾斜和偏心对彗差、像散、场曲和畸变这几种初级像差都会引入相应的附加量,因此必须实现系统内反射镜光轴的同轴,避免倾斜和偏心引入的失调像差。

3.2.1 主镜、次镜、三镜的光学对心加工

光学系统中各反射镜的空间位置决定了各自光轴的位置,要实现高质量的成像,要求各反射镜光轴之间具有统一性。实现各反射镜光轴位置调整的方法较多,通过隔圈的倾斜传递使得反射镜位置变化,通过微调机构也可实现反射镜位置调整,此外,光学对心加工^[17,18]也可实现反射镜位置调整。隔圈修研难度较高,修研精度很高;微调机构可以实现较高精度的调整,但不适合航天遥感的振动实验要求;

光学定心加工通过镜组的二次加工,可实现光学件光学基准与结构基准的统一,精度很高且稳定性强,加工完成后不需二次调整。

光学件口径越大,其光学定心加工精度越低,因此对于大口径光学反射镜的定心加工,提出了光学定心加工与放大检测的方法相结合,通过误差放大实现高精度调整。经过相应放大系统的设计,主镜的光学定心加工是在监视误差放大 1691 倍时进行的,测量分辨率提高从而大大提高了光学定心加工的精度,加工完成后主镜光轴与其主镜座外圆的同心度达微米量级,与主镜座端面的垂直度可达微米量级;次镜的对心加工是在放大 780 倍监视下进行的,次镜光轴与其次镜座外圆的同心度达微米量级,与次镜座端面的垂直度可达微米量级,主、次镜光学定心加工原理如图 6、7 所示。

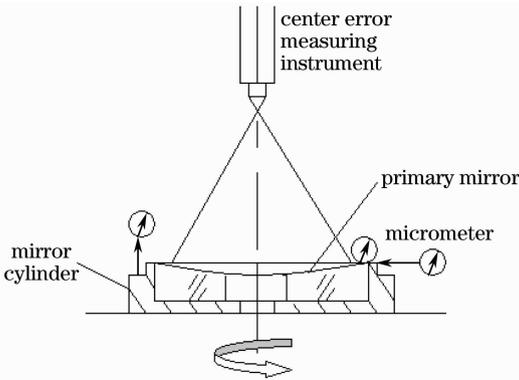


图 6 主镜光学定心加工原理图

Fig. 6 Schematic diagram of primary mirror's optical alignment machining

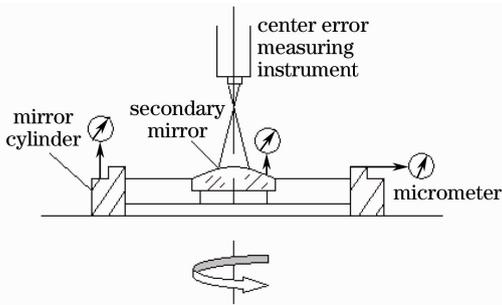


图 7 次镜光学定心加工原理图

Fig. 7 Schematic diagram of secondary mirror's optical alignment machining

此外,为了保证主、次镜组件在定心加工过程中不因加工应力而引起面形变化,在车削过程中要注意减小进刀量,减少切削应力。在主、次镜对心加工完成后需检测主、次镜面形,检测得到的主、次镜面形检测数值如表 1 所示,检验结果证明在定心加工后,主、次镜的面形没有变化。

主次镜组件定心加工完成后,分别装在镜筒的两端内圆内。镜筒为碳纤维材料,配合处为钛钢嵌入式结构,镜筒机械加工精度要求同心度为 0.005 mm,两端面平行差为 0.005 mm。主次镜组件与镜筒配合连接后,其各自反射镜组的结构基准便与镜筒给的机械轴统一,从而可以保证各自光轴与机械轴的统一,根据等价关系,则可实现主次镜光轴的统一。

表 1 主次镜光学定心后面形检查结果

Table 1 Wavefront aberration testing results of primary and secondary mirror after optical alignment machining

	Primary mirror	Secondary mirror
RMS / λ	0.027	0.025

此外,为了保证镜筒足够的强度,以保证对主、次镜组件稳固的支承,特别对镜筒做了强度实验,实验方法如图 8 所示。在镜筒一端放置分化板,调整自准直经纬仪使分化板的自准像与经纬仪十字丝重合。在镜筒一端加载重块,对比前后自准像有无变化,若无变化则可验证碳纤维镜筒强度是否符合主次镜装配精度要求。

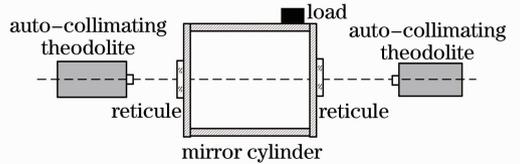


图 8 镜筒强度测试原理图

Fig. 8 Schematic diagram of mirror cylinder's intensity testing

3.2.2 主次镜装调

经过主、次镜分别对心加工后,实现了主、次镜各自光轴与机械轴的高精度重合,确保足够的精度保证装配基准面同反射镜主平面的严格平行,从而使得装配完成的主次镜系统消除倾斜误差,也就是使系统每一光学面波像差的倾斜分量 $\delta W_{\text{til}}(x, y, h')$ 趋于零。但是由于大口径光学系统机械结构装配间隙的要求,使得主次镜组件外圆与镜筒内圆存在配合间隙,使得系统存在一定的偏心量,则系统每一光学面波像差的偏心分量 $\delta W_{\text{dec}}(x, y, h')$ 不可能为零。因此,实现减少偏心量至 0.005 mm 的共基准调整必须基于特定的系统检验方法,通过对系统成像的像差特点,判断失调量调整方向和失调量大小。

为了实现次镜相对主镜的偏心量调整,在次镜和镜筒径向配合处留有 0.1 mm 的配合间隙。通过间隙调整次镜相对主镜的位移,使得系统每一光学面波像差的偏心分量 $\delta W_{\text{dec}}(x, y, h') = 0$ 。

主、次镜偏心量的精密调整方法基于干涉仪自准波像差的检验,此检验方法具有精度高、可量化的优点,其检测原理如图 9 所示。使用 Zygo 干涉仪检验主、次镜组合光学系统的波像差,通过干涉仪采集的干涉图形得到主次镜的干涉波前,经过计算机分析得出系统失调引起的波像差,从而判别系统失调误差的种类及调整方向,选择逐渐收敛方向为最优调整方向,直到波像差达到装配要求。经过多次优化调整,达到主次镜旋转 2π 各位置的泽尼克像差系数均为零,从而消除系统波像差的偏心分量。

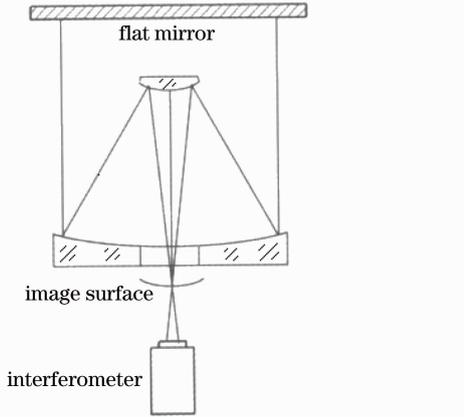


图 9 主、次二镜系统像质检验光路图

Fig. 9 Image quality testing path of two-mirror system

3.2.3 三镜系统的装调

三镜组件经过光学对心加工,且机械零件加工精度完全保证了三镜装配后与主次镜系统同心且与主面平行,所以在保证光学间隔连接后,不需要调整即可保证三镜的位置精度。

但是由于整个光学系统是偏轴使用的,推帚方向垂直于电荷耦合器件(CCD)线阵方向,因此当主次镜和三镜在相机中连为一体后,由于折轴镜倾斜,使得三镜系统存在一定的像散,其像散方向和折轴镜倾斜方向一致。

像散消除也是基于干涉仪自准检验波像差的调整方法的,根据干涉图形及相应的失调方向,通过折轴镜旋转并修切折轴镜垫圈的方法来进行像差优化调整。当像散在 0° 视场为零时,折轴镜主面和相机工作推帚方向垂直,且和光轴成 45° 角。图 10 为系统最终像面处检测视场位置示意图。

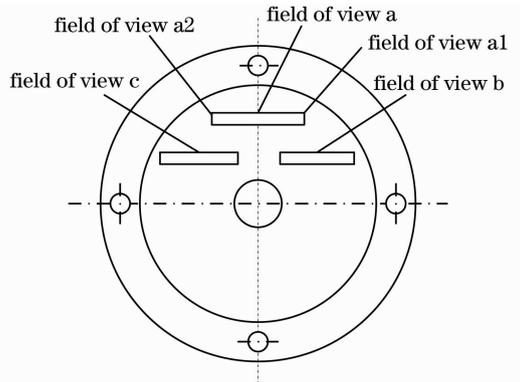


图 10 系统最终像面处检测视场位置示意图

Fig. 10 Testing position of final image surface

经过共轴优化装调,三镜系统各视场的 RMS 值如图 11 及表 2 所示。系统像质结果比指标要求好,光学系统 RMS 值小于 0.07λ , MTF 大于 0.57。在装配过程中严格控制各个装配误差,将系统的彗差、像散、球差等像差降到很低,从而减少了装配误差对设

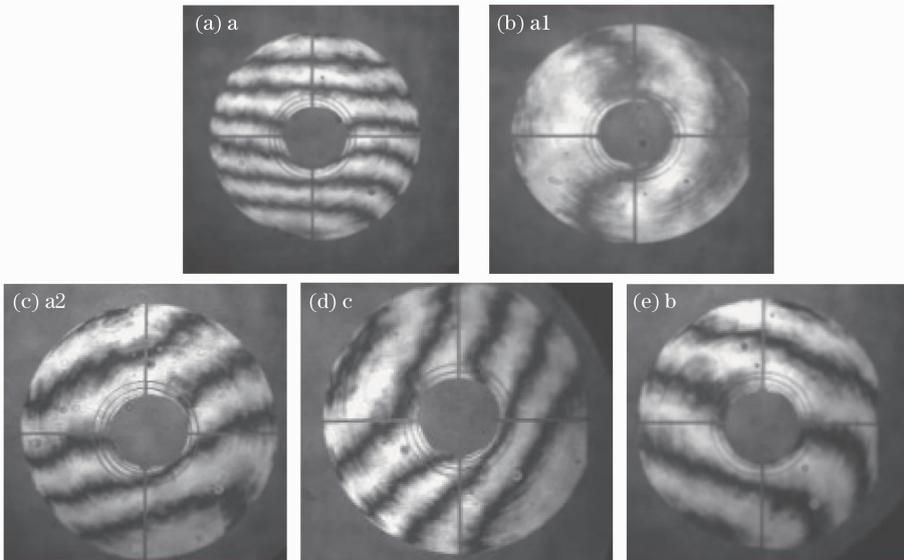


图 11 各个视场点的干涉图

Fig. 11 Interferogram of each field-view

计指标的影响,使得最终的成像指标优于装配、加工误差分析后的设计指标,几乎达到理论的衍射极限。

表 2 三镜系统各视场 RMS

Table 2 RMS of each field-view of three-mirror system

Field-view	c	a1	a	a2	b
RMS / λ	0.060	0.070	0.055	0.064	0.061

4 结 论

介绍了三镜光学系统各反射镜的微应力装配以及光学系统的共基准调整。通过调整,可以保证各反射镜的面形精度、各组件光轴的统一以及整个系统的同轴性,从而消除影响成像质量的彗差以及像散,得到一个优质的光学系统。实验结果证明,应用该方法装调的三镜光学系统的, RMS 值优于 0.07 λ 。

参 考 文 献

- 1 Chen Xiaoli, Fu Danying. Solutions for space optical remote sensor with large aperture and ultrahigh resolution [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003, **24**(4): 19~24
陈晓丽, 傅丹鹰. 大口径甚高分辨率空间光学传感器技术途径探讨[J]. *航天返回与遥感*, 2003, **24**(4): 19~24
- 2 Jin Guang, Zhang Liang, Hu Fusheng. Investigation on space optical system of high F number and high resolution[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(2): 155~159
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
- 3 Liu Lei, Li Jinglin, Lü Qingtao. Research on adjusting device of large aperture reflective optics system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(z1): 134~137
刘磊, 李景林, 吕清涛. 大口径反射光学系统装调装置设计研究[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(z1): 134~137
- 4 Zhong Xing, Jin Guang, Wang Dong. Influence of surface irregularity of on axis TMA mirror on wave-front error[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(8): 1516~1521
钟兴, 金光, 王栋. 共轴 TMA 反射镜面形不规则对波前误差的影响[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(8): 1516~1521
- 5 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei et al.. Optical design of the uncoaxial three mirror system with wide field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2680~2683
郭永祥, 李英才, 梁天梅等. 一种大视场离轴三反射光学系统研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2680~2683
- 6 Liu Xiaomei, Xiang Yang. Design of telecentric off-axis three-mirror system of imaging spectrometer with wide field-of-view [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0622004
刘晓梅, 向阳. 宽视场成像光谱仪前置远心离轴三反光学系统设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0622004
- 7 Liu Xiaomei, Xiang Yang. Research and design of telecentric off-axis three-mirror system with real entrance pupil[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1122002

- 刘晓梅, 向阳. 具有实入瞳的远心离轴三反系统研究与设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1122002
- 8 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen. Coaxial three-mirror-anastigmat system of high-resolution space camera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, **30**(5): 717~723
李旭阳, 李英才, 马臻. 高分辨率空间相机共轴三反光学系统实现形式研究[J]. *应用光学*, 2009, **30**(5): 717~723
- 9 Wu Xuhua, Chen Lei, Xiao Shaorong. Wavefront testing of collimation beam in phase-shifting interferometer[J]. *Infrared and Laser* 2008, **37**(1): 106~110
武旭华, 陈磊, 肖韶荣. 干涉仪准直系统波前质量检测[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(1): 106~110
- 10 Gong Dun, Tian Tiejun, Wang Hong. Computer aided alignment of off-axis three-mirror system by using Zernike coefficients[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(8): 1754~1759
巩盾, 田铁印, 王红. 利用 Zernike 系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(8): 1754~1759
- 11 Gao Min, Bian Zhenglan, Dong Zuoren et al.. Research on performance test of scanning mirror based on dynamic autocollimation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **38**(2): 0208001
高敏, 卞正兰, 董作人等. 扫描镜动态性能的自准直检测技术研究[J]. *中国激光*, 2010, **38**(2): 0208001
- 12 Wang Hong, Tian Tiejun. Effect of axial temperature difference on imaging quality of space remote sensor optical system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(10): 1489~1494
王红, 田铁印. 轴向温差对空间遥感光学系统成像质量的影响[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(10): 1489~1494
- 13 Liu Zhaojun, Zhou Feng, Man Yiyun. Prediction and evaluation technology of optical sensor's image quality[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(10): 222~226
刘兆军, 周峰, 满益云. 光学传感器像质预估与评价技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(10): 222~226
- 14 Fan Yanchao, Chai Fangmao. Support design for primary mirror with large aperture of optical remote sensor [J]. *OME Information*, 2010, **27**(5): 16~20
樊延超, 柴方茂. 大口径光学遥感主反射镜支撑设计[J]. *光机电信息*, 2010, **27**(5): 16~20
- 15 W. B. Wetherell. Image quality criteria for the large space telescope [C]. *Space Optics Proceedings of the Ninth International Congress of the International Commission for Optics*, National Academy of Sciences, Washington, D. C., 1974. 55~103
- 16 Fan Xuewu, Chen Rongli, Ma Zhen. A study on the primary aberration theory of decentered and tilted optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 494~496
樊学武, 陈荣利, 马臻. 偏心 and 倾斜光学系统初级像差理论的研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(4): 494~496
- 17 Ma Zhen, Li Yingcai. Study on optical centering of aspheric mirror by interferometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1455~1458
马臻, 李英才. 非球面干涉定心方法研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7): 1455~1458
- 18 Zhang Xuemin, Wei Ruyi, Hou Xiaohua. Method of dove lens assembling and adjustment based on optical alignment machining [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(4): 141~144
张学敏, 魏儒义, 侯晓华. 基于光学定心加工的道威棱镜装配方法[J]. *光电工程*, 2011, **38**(4): 141~144