

光学学报

空间光学系统先进制造技术进展 ——从非球面到自由曲面

张学军^{1,2*}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 以中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的相关研究成果为代表,系统总结了我国近十几年来在光学反射镜材料,非球面光学系统设计、加工与检测,空间相机集成与测试等方面取得的最新进展,结合典型在轨应用实例,展现技术进步带来的优势,同时也展望了光学系统先进制造技术的发展趋势。

关键词 光学设计; 空间相机; 非球面; 自由曲面; 先进制造

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221907

1 前言

近十几年来,我国空间光学系统的性能取得了长足进步,可见光星载对地观测相机的分辨率和幅宽已经达到公开报道的国际最高水平:即将发射的中国空间站望远镜(CSST)的分辨率与哈勃空间望远镜相当,但其视场面积是哈勃空间望远镜的近 300 倍^[1];火星高分辨率相机的分辨率和幅宽也达到了国际先进水平^[2]。这些令人鼓舞的成果,是光学工程技术人员在反射镜材料、光学设计、非球面加工与检测、系统装调与测试等研发过程中一路打破常规、勇于创新、敢于实践的结果。

光学系统先进制造技术的内涵包括光学材料、系统设计、元件加工与检测,以及系统集成测试等方面,它对于高性能光学系统而言是一项使能技术。光学系统本身是一个信息收集系统,衡量其性能的一个重要指标是信息收容量,以对地观测相机为例,人们在追求高分辨率的同时还期待更大的幅宽。然而,空间光学系统受发射成本和使用环境的制约,对载荷的体积、质量、环境适应性有严格的要求。高性能的空间光学系统对制造技术的共性要求如下:

1) 为减小发射装置质量和热控代价,反射镜材料要具有高的比刚度和抗热变形能力;

2) 为解决分辨率与幅宽的矛盾,并保证高的像质,要求系统同时具备大口径、长焦距和大视场,光学设计

必须采用多个反射式同轴或离轴非球面,甚至自由曲面,以便增加自由度来平衡大视场轴外像差;

3) 离轴非球面或自由曲面设计带来好处的同时,也使系统失去了回转对称性,必须采用确定性数控加工手段代替经典光学加工,以获得更高的精度和效率。与此同时,数字化非球面检测和计算机辅助装调测试技术要贯穿于铣磨、研磨、抛光、系统集成的全过程,以指导确定性加工并验证天地一致性。

本文系统总结了我国近十几年来在碳化硅(SiC)反射镜材料、空间光学系统设计及构型演变、确定性数控光学加工技术、复杂光学曲面数字化检测和计算机辅助装调等方面取得的最新进展,结合典型在轨应用实例展现技术进步带来的优势,同时也展望了光学系统先进制造技术的发展趋势。

2 SiC 反射镜材料的发展——从无到有、从小到大

常用的高精度非球面空间反射镜材料主要包括超低膨胀石英玻璃(ULE)、微晶玻璃和 SiC 等。中国科学院光电技术研究所主要从事 ULE 反射镜镜坯制造技术研究,采用进口材料焊接/熔接的方式制备大口径反射镜镜坯,已成功研制出 4 m 口径的地基望远镜主镜。中国科学院上海硅酸盐研究所自 2003 年开始从事 SiC 光学镜坯研制工作,在中国科学院的支持下研制出 1.5 m 量级 SiC 反射镜制造装备,目前该所利

收稿日期: 2022-11-01; 修回日期: 2022-12-01; 录用日期: 2022-12-02; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(62127901, 61975201, 11803037, 61805243, 11903035, 11903036, 62005278, 12003035, 12003034, 62075218, 12103054)

通信作者: *zxj@ciomp.ac.cn

用常压烧结工艺研制的 1.45 m 单体 S-SiC 反射镜镜坯及多块中小尺寸反射镜已在多个航天项目中得到了应用。

空间光学反射镜材料不仅要具有良好的可加工性,以保证高面形精度,还要具备高的尺寸稳定性,以适应使用环境。所选取的材料一般具有以下特性:具有高的比刚度;具有优良的热特性;具有优良的可加工性、稳定性和安全性。

从表 1 可看出,与传统的金属和玻璃材料相比,SiC 陶瓷具有比刚度大、热稳定性好等优良特性。图 1 所示为 SiC 陶瓷材料与常用反射镜材料的综合性能比

较,其中:横坐标表示材料的比刚度,即材料弹性模量与密度之比,比值越大,反射镜镜体的轻量化程度越高;纵坐标表示材料的热稳定性,即材料导热率与热膨胀系数之比,比值越大,说明该材料抵抗热变形的能力越强。空间用轻型反射镜为了降低发射装置质量、保持面形精度,必须具备高的轻量化率和良好的热稳定性。也就是说,处于图 1 右上角位置的材料,可用于空间用反射镜制备。可以看到,SiC 陶瓷材料的比刚度和热稳定性都相对较高,可加工性良好,因此与传统材料相比优势明显。

表 1 常用反射镜材料的基本属性及比刚度

Table 1 Basic properties and specific stiffness of common reflector materials

Material	Density ρ / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Elastic modulus E / GPa	Poisson ratio μ	Linear expansion coefficient α / (10^{-6}K^{-1})	Thermal conductivity λ / ($\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Heat capacity C / ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Ratio stiffness / ($10^6 \text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$)
Fused silica	2.19	72	0.17	0.5	1.40	750	32.9
ULE	2.21	67	0.17	0.03	1.31	766	30.3
Glass-ceramics	2.53	91	0.24	0.05	1.64	821	36.0
Al ¹	2.70	68	0.33	22.5	167	896	25.2
Be	1.85	287	0.04	11.4	216	1925	155.1
Si	2.33	131	0.42	2.6	137	710	56.2
SiC ²	3.06	350	0.21	2.5	185	500	114.4

Notes: ¹—6061-t6 aluminum alloy; ²—reaction-bonded SiC (RB-SiC).

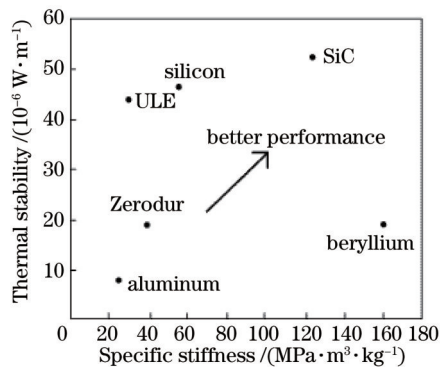


图 1 SiC 陶瓷与其他反射镜材料的性能比较

Fig. 1 Performance comparison between SiC ceramic and other mirror materials

SiC 的优良性能使其在空间望远镜中得到广泛应用,如图 2 所示,欧空局 2009 年研制的 Herschel 望远镜^[3][图 2(a)]工作在远红外波段(55~672 μm),采用 $\phi 3.5 \text{ m}$ 的钎焊 SiC 主镜,面形精度均方根误差(RMS)为 1500 nm,是目前在轨的最大口径 SiC 望远镜。美国 ALADIN 望远镜^[4][图 2(b)]采用了 1.5 m SiC 主镜,欧空局 2013 年研制的 Gaia 望远镜^[5][图 2(c)]采用了 1.45 m \times 0.5 m 的 SiC 主镜,美国 EO-1^[6]也采用了 SiC 材料[图 2(d)]。

国际上常用的 SiC 制备路线受大收缩比制约,难

以突破 1.5 m 口径的限制,机加轻量化技术路线难以实现复杂结构成型,而钎焊变形大,不能用于可见光成像。针对上述瓶颈,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(以下简称“长春光机所”)提出了水溶性室温消失模技术、SiC 陶瓷素坯液体干燥技术,发明了 SiC 素坯黏结剂及连接工艺,解决了背部半封闭超轻量化素坯成型、无宏观裂纹干燥、同质微观结构连接等方面存在的技术难题,完成了 1~4 m 量级系列 SiC 反射镜坯制备^[7],如图 3 所示。

实际应用中 SiC 的优势较为明显,例如哈勃空间望远镜的主镜口径为 2.4 m,采用三明治结构的 ULE 轻量化镜坯,反射镜总质量为 817 kg,面密度为 180.6 kg/m^2 ,如图 4(a)所示^[8]。长春光机所研制的 CSST 主镜的口径为 2.05 m,质量为 268 kg,面密度仅为 85.3 kg/m^2 ,如图 4(b)所示。目前国际上被动光学反射镜面密度的最高水平约为 50 kg/m^2 ,由长春光机所研制的 2.02 m 口径的超轻量化 SiC 反射镜的质量为 110 kg,面密度仅为 34.3 kg/m^2 ,如图 4(c)所示。

3 空间光学系统构型演变——从同轴 RC 到离轴 TMA,再到偏轴自由曲面

对于大口径空间望远镜而言,反射系统由于没有

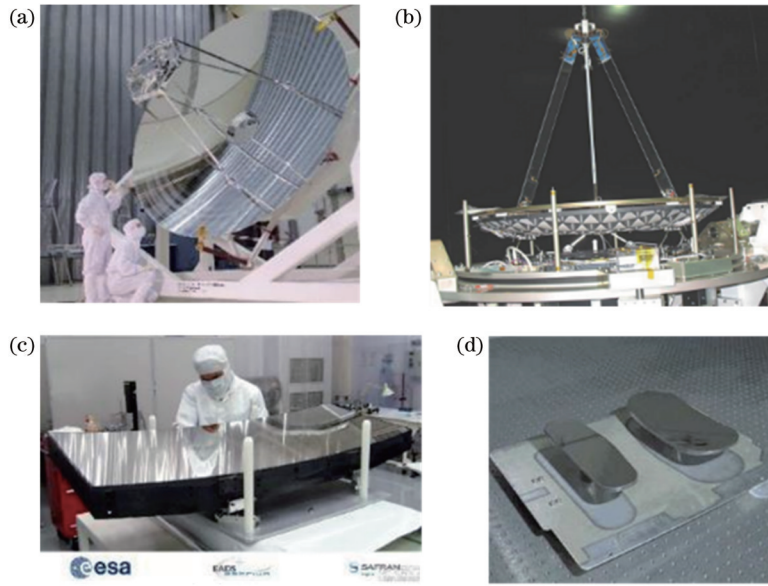


图 2 SiC 反射镜在空间光学系统中的应用。(a) Herschel 望远镜^[3]; (b) ALADIN 望远镜^[4]; (c) Gaia 望远镜^[5]; (d) EO-1^[6]
 Fig. 2 Applications of SiC mirrors in space optical systems. (a) Herschel telescope^[3]; (b) ALADIN telescope^[4]; (c) Gaia telescope^[5]; (d) EO-1^[6]

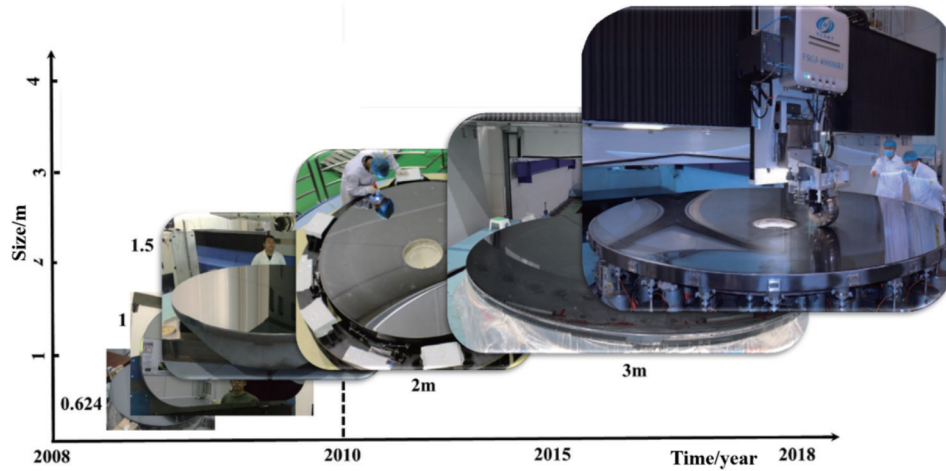


图 3 长春光机所大口径 SiC 反射镜研制历程^[7]
 Fig. 3 Development process of large aperture SiC mirrors in CIOMP^[7]

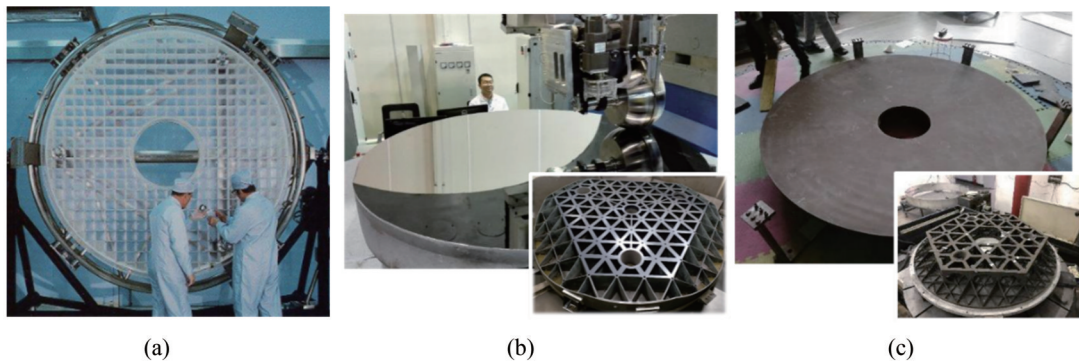


图 4 ULE 轻量化反射镜与 SiC 反射镜应用对比^[8]。(a) 哈勃空间望远镜主镜; (b) CSST 主镜; (c) 超轻量化 SiC 反射镜
 Fig. 4 Application comparison of ULE lightweight mirrors and SiC mirrors^[8]. (a) Hubble space telescope primary mirror; (b) CSST primary mirror; (c) ultra-lightweight SiC mirror

色差,且可应用轻量化技术减轻反射镜质量,因此一直占据统治地位。早期应用较为广泛的是两镜系统,尤其是 Ritchey-Chretien(RC)系统,最著名的例子是哈勃空间望远镜^[9]。RC 系统是对经典卡塞格林光学系统非常成功的改进,在不改变卡塞格林光学系统几何尺寸的前提下,通过少量修正主、次镜的非球面系数,使主镜、次镜均为双曲面,即可同时消除系统的球差和彗差,增大可用视场。RC 系统有两个重要工程参数:筒

长与焦距之比($T_1 = d_1/f$)和后截距与焦距之比,即遮拦比($T_2 = L/f$)。如图 5(b)所示,当系统的遮拦比 T_2 确定后,系统的像散、像面弯曲和畸变随 T_1 减小而增大,同时次镜放大倍率 m_2 增大,意味着主镜的焦比 f_1/D 减小,主镜加工检测难度加大;对于次镜,其焦比 f_2/D_2 同样减小,由于是凸非球面,制造难度进一步加大。

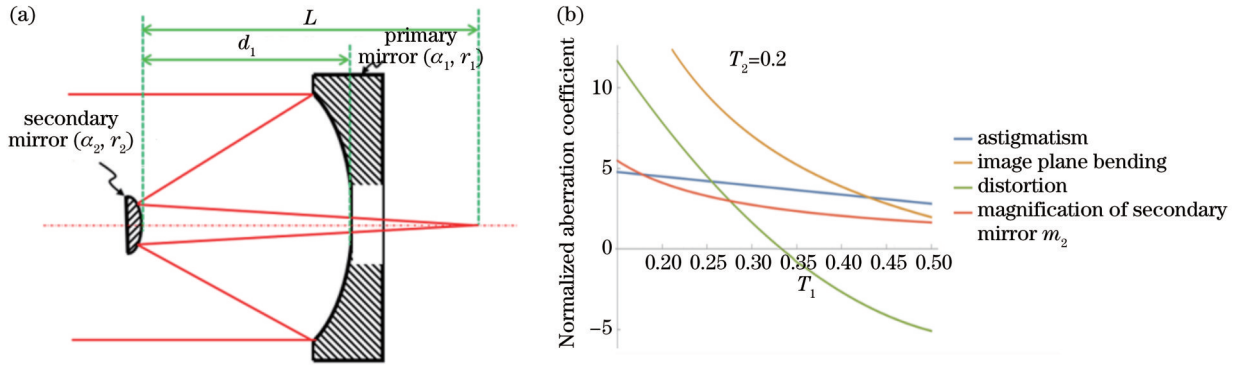


图 5 RC 光学系统结构及筒长与焦距之比和像差系数的关系。(a) RC 光学系统结构;(b) RC 系统筒长与焦距之比和像差系数的变化曲线

Fig. 5 RC optical system structure and the relationship between the ratio of tube length to focal length and aberration coefficient.
(a) RC optical system structure; (b) RC system tube length to focal length ratio and aberration coefficient curve

RC 系统的最大优点是结构紧凑,其筒长一般可压缩至焦距的 1/5~1/10。尽管如此,为进一步校正像散、像面弯曲和畸变等轴外像差,还要增加透射校正镜组,这就带来了色差和杂散光等一系列问题。

为进一步校正像散等轴外像差,增大可用视场,20 世纪 60—70 年代相继出现了一批基于三镜系统的设计,其中最具代表性的是 Korsch^[10]提出的三反消像散(TMA)结构。如图 6 所示,TMA 系统的自由设计参数有 8 个,分别是 3 个反射镜的顶点曲率半径(r_1, r_2, r_3)、3 个反射镜的非球面系数或二次曲面常数($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$)、2 个镜面间隔(d_1, d_2),其中 d_1 为主、次镜的间隔, d_2 为次、三镜的间隔。这 8 个参数中的 3 个非球面系数($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$)一般用来消除系统的 3 个初级像差——球

差、彗差和像散,剩余 5 个参数中的 3 个顶点曲率半径(r_1, r_2, r_3)用来满足平像场条件及系统焦距,因此至少还有 2 个参数(d_1, d_2)被用来安排合理的系统结构布局,如一次像面位置(如果存在)、系统后工作距、出瞳位置、总筒长等。与 RC 系统相比,Korsch TMA 系统不需要透射式校正镜组,从而避免了色差,以增加一个非球面为代价同时消除了球差、彗差和像散,系统接近平像场且具备实出瞳和一次像面,有利于安排主动光瞳校正镜和消杂光光阑,同时大幅减小筒长与焦距之比。随着非球面确定性加工、检测技术的快速发展,非球面系统制造装调的难度大幅降低,因此 Korsch TMA 系统从 2000 年开始在空间望远镜中获得广泛应用,比较有代表性的包括 JWST 望远镜、GeoEye 系列

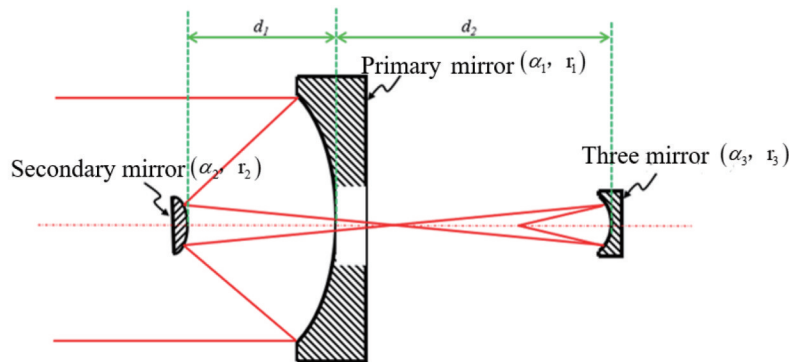


图 6 Korsch TMA 系统的光学布局^[10]

Fig. 6 Optical layout of Korsch TMA system^[10]

空间对地观测相机等,均采用了Korsch TMA结构。我国发射的系列商用对地观测卫星相机也有相当一部分采用了Korsch TMA结构。

RC系统和Korsch TMA系统都属于同轴设计结构,其共同的缺点包括:1)由次镜及其支撑结构造成的中心遮拦和Spider遮拦,导致中频传递函数呈下降趋势,同时点扩散函数的中心亮度降低,旁瓣亮度增

加,星点像呈现明显的衍射花样,影响像质,如图7所示;2)中心遮拦与视场和焦距成正比 $[h=f \times \tan(\theta_{\text{FOV}}/2)]$,其中 h 为像高, f 为焦距, θ_{FOV} 为视场角],因此难以同时实现长焦距与大视场。以线阵推扫相机为例,其可用视场一般为 $2^\circ \times 0.2^\circ$ 左右,对于500 km轨道高度,幅宽一般小于20 km。

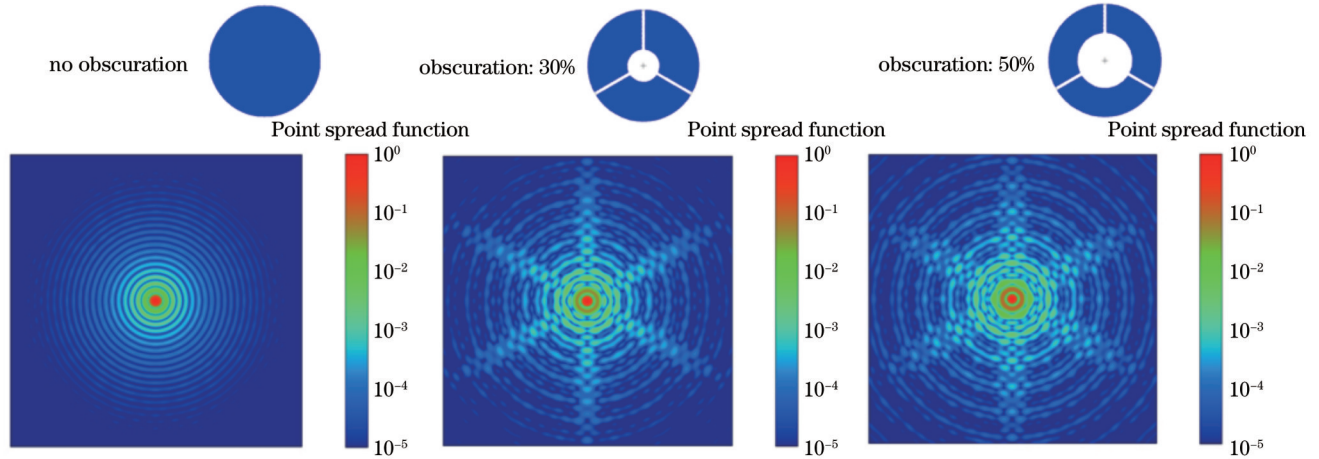


图7 中心遮拦对光学系统点扩散函数的影响

Fig. 7 Effect of central obscuration on point spread function of optical system

为解决长焦距与大视场的矛盾,国内外相继出现了一批基于离轴TMA的设计,其中应用比较成功的有两类,分别是图8(a)所示的光瞳偏置带有一次像面的off-axis TMA和图8(b)所示的视场偏置没有一次像面的off-axis TMA。第一种类型具有实出瞳和中继像面,对公差的要求相对严格,适用于杂光抑制要求高且需要光阑匹配的应用场景;第二种类型的线视场可以做得较大,公差相对宽松,适用于大视场推扫应用场景。图9显示了我国火星探测高分相机的光学结构以

及与国外同类相机的比较,通过离轴三反光学结构设计,视场角达到 2° 。在离轴TMA基础上进一步增大视场则需要校正更高阶的轴外像差,这时引入自由曲面可以有效解决该问题。非旋转对称自由曲面的概念虽然诞生很早,但其在20世纪的发展应用较缓慢。直至2000年后,随着光学设计水平不断提高,光学表面加工、装调和面形检测技术的进步,以及人们对高性能、小体积、低成本光学系统的追求,自由曲面再次受到学界的重视,逐渐成为研究热点。

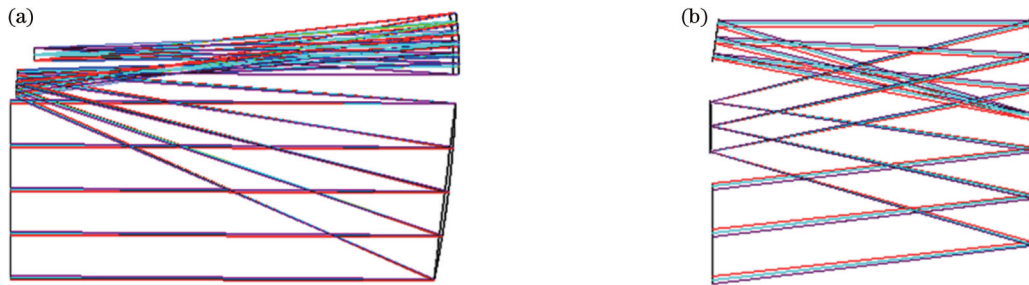


图8 基于离轴TMA的设计结构。(a)有一次像面的off-axis TMA;(b)没有一次像面的off-axis TMA

Fig. 8 Designed structures based on off-axis TMA. (a) Off-axis TMA with first image plane; (b) off-axis TMA without first image plane

成像系统常用的自由曲面是指在二次曲面基础上增加若干高阶奇次和偶次项,这些附加项可以用Zernike多项式、XY多项式、切比雪夫多项式、Forbes多项式或其他形式的多项式表示^[11-15]。使用自由曲面的另一个好处是可以压缩系统尺寸,从图5可以看出,

紧凑的设计结构会带来更大的轴外像差,而自由曲面刚好可以解决这一问题。图10显示了我国空间站巡天望远镜的光学结构,它是中国最大的天基光学有效载荷,与中国空间站在同一轨道上进行天文观测。它的科学目标主要是研究暗物质、暗能量、宇宙剪切效应

Detector	Mars express	Mercury	Deep Impact	MRO	LRO	Chang'e-2	Mars Exploration High Resolution Camera
Launching time	2003	2004	2005	2005	2009	2010	2020
Camera model	HRSC-SRC 	MDIS-NAC 	HRI 	HiRISE 			
Resolution	2.3 m@250 km	5.1 m@200 km	1.4 m@700 km	0.3 m@300 km	0.5 m@50 km	7 m@100 km	0.5 m@265 km
Mass /kg	19.6	2	-	65	16.4	-	43
Power consumption /W	50	10	-	68	10	-	60
Optical system form	Cassegrain refraction reflective telescope		Cassegrain telescope	Coaxial field-offset telescope	Cassegrain telescope RC		Three-mirror off-axis telescope
Focal length /mm	975	550	10500	12000	700	144.3	4640
Spectral coverage /nm	400-900	700-800	320-1050	400-1000	400-750	450-520	450-900
Field angle /($^{\circ}$)	0.543	1.5	0.118	1.142-0.175	2.86	7.98--17.2	2
Mowing width /km	2.3			4.98	25	43	9

图 9 我国火星探测高分相机的光学结构以及与国外同类相机的比较

Fig. 9 Optical structure of high resolution camera for Mars exploration in China and comparison with similar foreign cameras

等,采用离轴 TMA 设计结构,在第三镜上使用基于 Zernike 多项式的自由曲面,使其面视场扩大至 $1.1^{\circ} \times 1.1^{\circ}$,具有高角分辨率、大天区覆盖面积等优势,其面视场是哈勃空间望远镜的近 300 倍。它的巡天观测深度相比哈勃空间望远镜具有极大优势,结合其多样的观测手段,在国际同期天文台中具有很强的竞争力,也将与它们具有很好的互补作用。图 11 所示为我国 GF-6 相机的光学结构,这是一个离轴四反设计结构,其中次镜和三、四镜均使用了 Zernike 自由曲面,其线视场达到了 76° ,16 m 分辨率条件下单景幅宽达到 1000 km,是公开报道的同类相机的最高水平。

需要说明的是,离轴设计加自由曲面不仅避免了中心遮拦,还提供了更高的自由度,因此带来更大的传递函数值和更高的成像质量。然而,反射镜和系统失

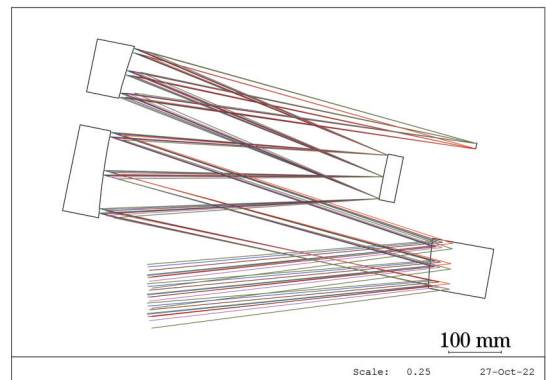


图 11 GF-6 相机的光学结构

Fig. 11 Optical structure of GF-6 camera

去了回转对称性,光学加工、检测和装调难度进一步加大,这对光学系统的制造技术提出了挑战。

另一个值得注意的趋势是,为进一步压缩体积和减轻质量,近年来空间相机的归一化频率逐步提高。图 12 给出了国际上具有代表性的空间相机归一化频率,可以看到 GeoEye 系列相机的归一化频率从 0.31 提高到 0.57, World View 系列相机从 0.41 提高到 0.60。高的归一化频率意味着更紧凑的设计结构和更高的制造精度要求。

如图 13 所示,空间相机实际上是一个欠采样系统,归一化频率的定义为奈奎斯特频率与光学截止频率的比值,即

$$v = \frac{\nu_{\text{Nyquist}}}{\nu_{\text{cutoff}}} = \lambda F / (2p), \quad (1)$$

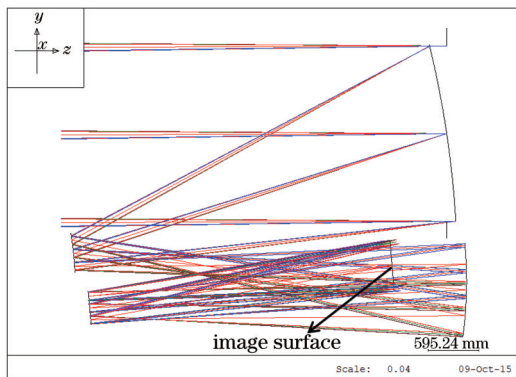


图 10 我国空间站巡天望远镜的光学结构

Fig. 10 Optical structure of Chinese space station telescope



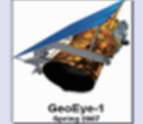




GeoEye	Resolution / μrad	Normalized frequency	World view	Resolution / μrad	Normalized frequency
	1.2	0.31		1.36	0.41
	0.6	0.45		0.9	0.57
	0.5	0.57		0.6	0.47
GeoEye-3, underdeveloped, not available				0.5	0.60

图 12 空间光学系统的归一化频率发展趋势

Fig. 12 Development trend of normalized frequency of space optical system

式中： v 为归一化频率； v_{Nyquist} 为奈奎斯特频率； v_{cutoff} 为光学截止频率； F 为 F 数； λ 为波长； p 为像元尺寸。需要指出的是，国外学者 Fiete^[16]提到的成像质量 Q 因子的定义为 $Q = \lambda F / p$ ，其实际上是归一化频率的2倍，而我国学者更早提出的归一化频率的概念更为直观。归一

化频率越高，系统越接近等采样(0.5~1)，在同等衍射受限口径下的分辨率更高。但随着归一化频率的增大，光学系统的余量逐渐减小，这对光学制造提出了更高要求。就单个镜面而言，要求实现全空间频段误差的精确控制^[17]。

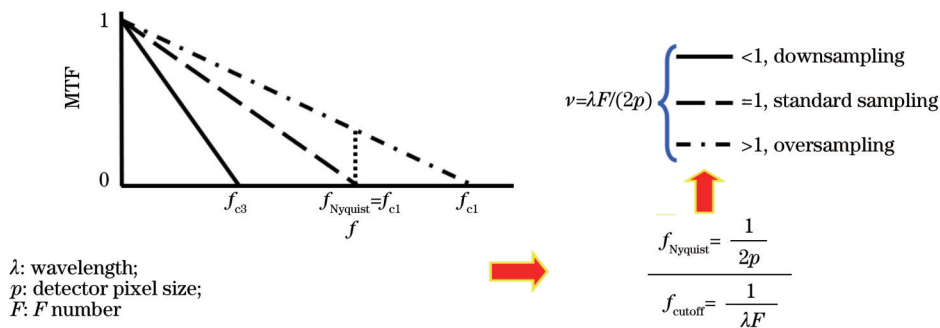


图 13 光学系统采样示意图

Fig. 13 Sampling of optical system

4 确定性数控光学加工技术

随着光学系统结构的演变，光学元件的面形也从简单的二次曲面变化到高次非球面，再到离轴非球面和自由曲面，其结果是系统性能和元件的复杂度越来越高，加工检测和装调的难度越来越大，但这也极大促进了光学系统先进制造技术的快速发展。特别是为了保障哈勃空间望远镜的研制，美国从20世纪70年代提出数控小磨头非球面自动加工技术，相继发展了数控研磨抛光(CCOS)技术、应力盘抛光(SLP)技术、气囊

抛光(BP)技术、磁流变抛光(MRF)技术、离子束修形(IBF)技术等。这些技术以准确定量的材料去除方式代替传统加工中单纯依赖经验的方法，实现了精密光学元件加工的自动化控制，带来了高精度非球面光学元件制造的革命性进步^[18]。

在大口径非球面反射镜研制技术方面，由于具有较为显著的军用背景，世界各国在该技术的研究方面均采取了严格的保密措施，几乎没有公开报道。美国Ball公司和NASA空间中心发布了大口径反射镜制造能力调研报告，给出了欧美各国大口径非球面反射镜

的主要研发单位及其制造能力,如表 2 所示。纵观这些研究机构,不难看出其制造技术有如下特点:

1)均采用多种手段串行或组合加工方式,除了经典的利用计算机控制小磨头抛光(CCOS)技术外,还涉及离子束抛光、磁流变抛光等技术;

2)都是基于数控加工中心的光学加工设备,加工工位及工具单一,无法进行多工具的协同工作,加工效率亟待提升;

3)大口径非球面加工设备没有商用产品,各公司

的制造设备大多采用自主研发方式,如:Tinsley SSG 公司基于从台湾采购的数控加工中心,研制出最大加工口径为 1.6 m 的 CCOS 设备;ITT、REOSC 公司分别研制出 2.5 m 量级的离子束抛光设备;亚利桑那大学自研出最大口径为 8.4 m 的集数控小磨头和应力盘于一体的抛光设备;QED 公司研制出 Q22-2200f 型磁流变抛光机床,其最大加工尺寸为 2.5 m,但该产品对华禁运。

表 2 世界各国大口径非球面反射镜的主要研发单位及其制造能力

Table 2 Main research and development institution and their manufacturing capabilities of large-aperture aspheric mirrors in the world

Vendor	Size capability	Heritage example	Other capability/Comment
Brasbear (L-3)	8.3 m	Polished 8.3 m Subaru ULE. 1.45 m Kepler ULE	MRF polishing capability being added
Goodrich	4 m 5-axis Arbogas	Polished HST 2.4 m ULE. Chandra 1.2 m dia. 0.8 m Zerodur	—
ITT	3 m 5-axis CNC machine. 2.5 m off-axis generation machining	Polished HST 2.4 m ULE back-up mirror	Ion figuring capability
Opteon	>3.5 m	Polished Herschel 3.5 m mirror	—
Rayleigh Optical	2.5 m	—	—
REOSC19 (Sagem)	10 m capacity	Polisher NMSD 1.5 m Zerodur. GTC 1.8 m Zerodur. SOFIA 2.9 m Zerodur. six 8 m (Gemini ULE, VLT Zerodur)	Ion figuring capability up to 2.5 m
SESO	1.4 m	—	2.5 m capacity in-process
Tinsley SSG (L-3)	1.6 m	Polishing 1.5 m JWST segments	—
University of Arizona	8.4 m	NMSD 2.0 m borosilicate. 6.5 m to 8 m ground telescopes	—
Xinetics	2 m	—	Capability for polishing SiC

我国于 20 世纪 90 年代启动的数控非球面加工技术研究为后续大口径空间相机的跨越发展提供了强力支撑,中国科学院光电技术研究所、北京空间机电研究所、中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所(以下简称“南京天光所”)、国防科技大学、长春光机所等单位相继展开了 CCOS 加工非球面的研究。中国科学院光电技术研究所致力于地基望远镜光学系统制造技术的研究^[19],并在国内率先开展了大型反射镜应力盘技术的研究工作,制造的最大口径非球面反射镜达到 4 m 量级(地基 4 m ULE 玻璃反射镜),其制造装备如图 14 所示。北京空间机电研究所主要从事航空航天光学系统制造技术的研究,在大口径反射镜研制方面具有一定的实力。南京天光所致力于地基天文望远镜光学系统制造技术的研究,具有较强的光学玻璃材料反射镜研制能力。国防科技大学主要从事非球面光学加工机理、加工设备等方面的技术研究,在基础理论及设备研制等方面具有较强的实力,在李圣怡教授的带领下于 2000 年左右开展了磁流变抛光技术的研究,先后推出不同型号的 KDMRF 型磁流变抛光机床^[20],

如图 15 所示。

长春光机所在中国科学院“八五”重点课题“超光滑非球面自动加工及在线检测”的支持下,于 1992 年

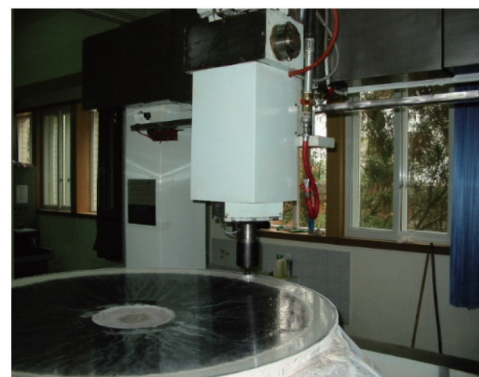


图 14 中国科学院光电技术研究所的大口径非球面反射镜制造装备^[19]

Fig. 14 Large aspheric mirror manufacturing equipment of Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences^[19]

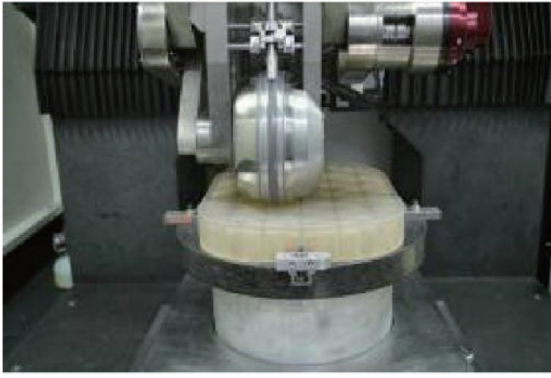


图 15 国防科技大学研制的 KDMRF 机床^[20]

Fig. 15 KDMRF polishing machine developed by National University of Defense Technology^[20]

成功研制 FSGJ-1 非球面数控光学加工中心,使我国 CCOS 技术进入实用化阶段。经过近 30 年的发展,长春光机所在 FSGJ-1 的基础上,先后成功研制出 FSGJ-

2~4 系列光学加工中心,其主结构以单龙门、双龙门为主,FSGJ 系列设备的加工口径从最初的 600 mm 提高到 4000 mm,FSGJ-4 加工中心能够实现对 4 m 以内口径的同轴、离轴非球面甚至自由曲面等复杂光学曲面的加工。

基于 CCOS 原理的小磨盘加工法在加工大口径非球面光学元件的过程中仍然存在不足。边缘效应、复印效应和中高频残差是限制该方法加工精度与加工效率提升的主要因素。为进一步提升光学加工精度和效率,长春光机所在全面突破数控小磨头、应力盘、磁流变、离子束等技术的基础上,提出了全频段误差一致收敛的组合加工工艺,同时攻克了 Null Lens、CGH、摆臂轮廓仪、相位偏折术、子孔径拼接等跨尺度多方法组合的检测技术。历经 10 余年,长春光机所建立了具有自主知识产权的 4 m 量级大口径非球面全链路集成制造系统^[7],如图 16 所示。

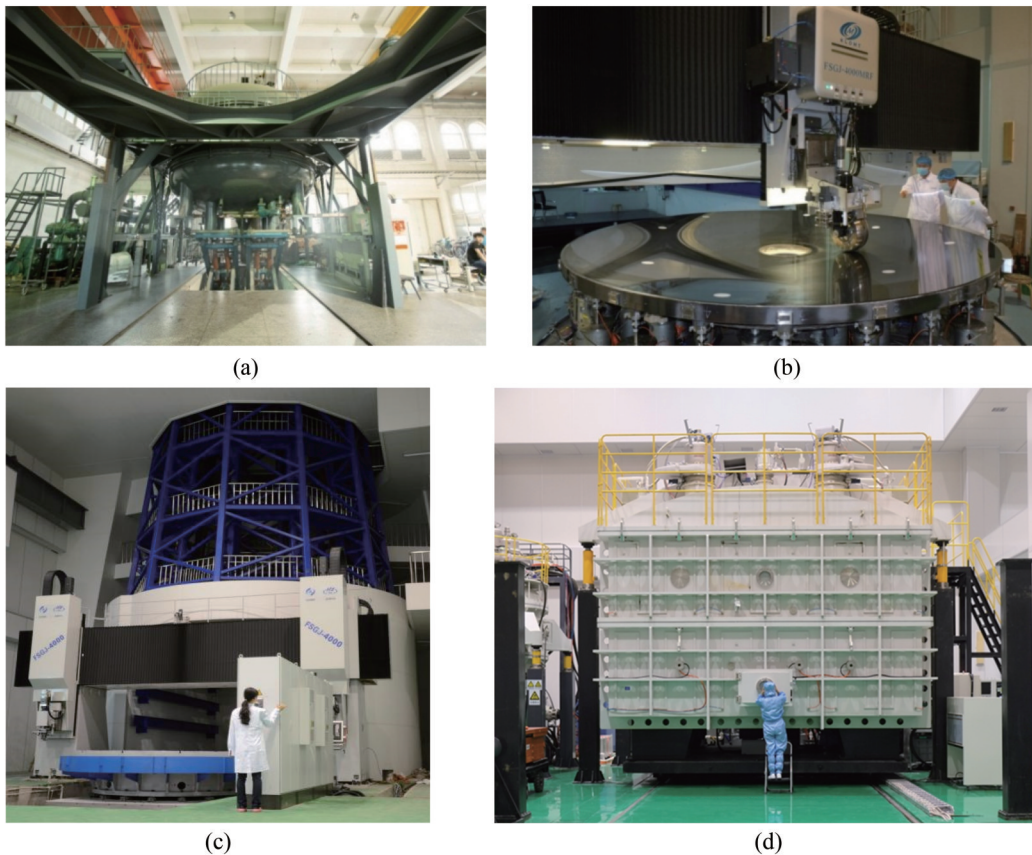


图 16 长春光机所的 4 m 量级大口径复杂曲面全链路集成制造系统^[7]。(a) 镜坯制备系统; (b) 非球面加工系统; (c) 非球面检测系统; (d) 非球面镀膜系统

Fig. 16 CIOMP 4 m large-aperture complex curved surface full-link integrated manufacturing system^[7]. (a) Mirror blank preparation system; (b) aspheric processing system; (c) aspheric measurement system; (d) aspheric coating system

对于 1 m 量级 SiC 反射镜的研制,传统工艺路线基于最接近球面铣磨成形,然后采用 CCOS 进行研磨抛光,需要近 24 周的时间,最终实现 RMS 为 12 nm ($\lambda/50$, $\lambda=632.8$ nm) 的面形精度,如图 17 所示。而采用 CCOS、MRF 结合离子束抛光工艺,仅用时不到 10 周,即实现 RMS 为 7 nm 的面形精度,如图 18 所示。

在 1.5 m 口径离轴抛物面镜加工中^[21],通过采用确定性支撑技术、半刚性三明治磨盘技术、尖刀磨盘边缘效应抑制技术、平滑-修形组合加工技术,最终低频面形精度优于 $\lambda/50$ (RMS),中频面形精度优于 0.64 μ rad (slope RMS),如图 19 所示。1.5 m 口径离轴抛物镜各工序加工时间如图 20 所示。

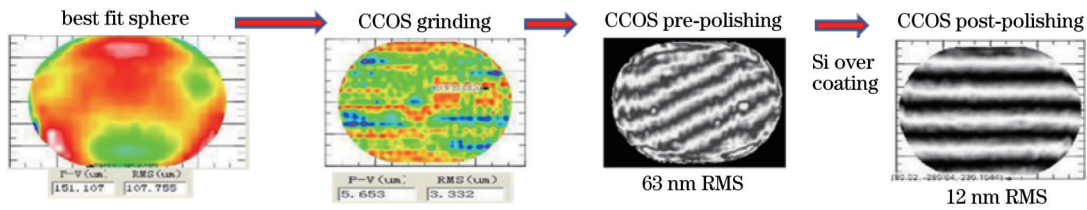


图 17 传统基于小磨头抛光的技术工艺路线

Fig. 17 Traditional technical process route based on small tool polishing

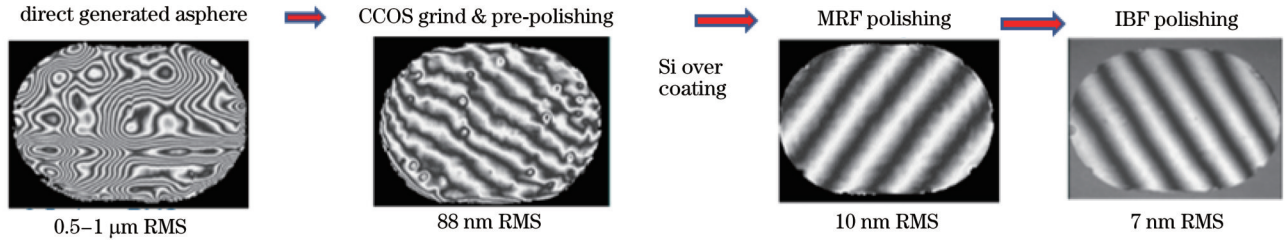


图 18 基于 CCOS+MRF+IBF 的组合工艺路线

Fig. 18 Combined process route based on CCOS + MRF + IBF

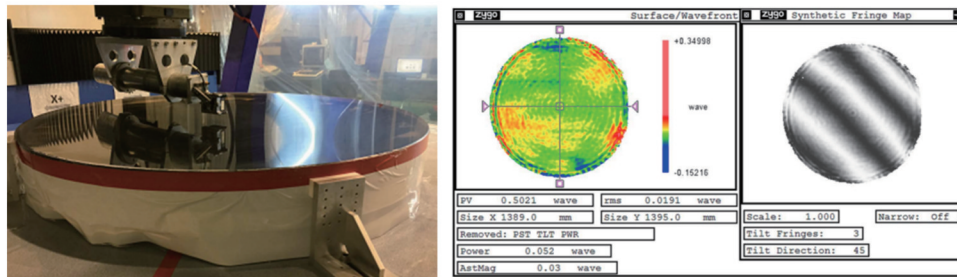


图 19 1.5 m 口径离轴抛物镜加工结果^[21]

Fig. 19 Processing results of 1.5 m off-axis parabolic mirror^[21]

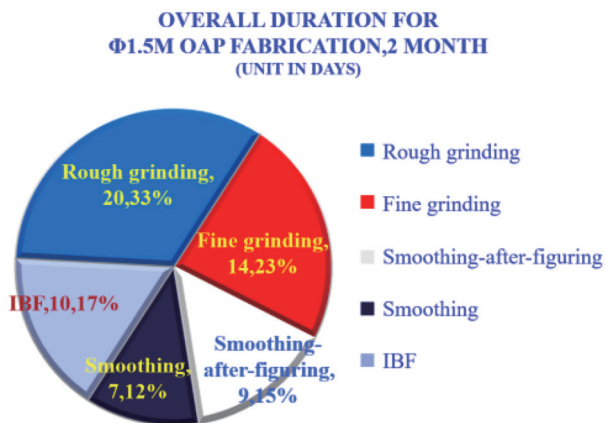


图 20 1.5 m 口径离轴抛物镜各工序加工时间^[21]

Fig. 20 Processing time of each process of 1.5 m off-axis parabolic mirror^[21]

5 非球面数字化检测和计算机辅助装调

非球面的检测方法分为零位检测和非零位检测两

种。零位检测方法利用补偿器将干涉仪发出的球面波转化为对应待测面的非球面波,因此当不存在面形偏差时,干涉条纹为零条纹。常见的零位补偿器包括传统的折(反)射式补偿器、基于计算全息(CGHI)的衍射式补偿器。此外,对于标准二次曲面还可以采用无像差点进行零位检测。非零位检测方法通常采用一些手段将干涉图的条纹密度降低至干涉仪能够探测的动态范围内,并通过算法进行处理,以消除不完全补偿法线像差引入的系统误差。通常来讲,非零位检测方法的精度受非共路误差影响难以提高,而零位检测方法的精度代表当前最高水平^[22]。

著名的哈勃空间望远镜的主镜采用的就是基于反射式补偿器的零位检测手段,然而补偿器的错误,导致主镜的曲率半径偏差了 1.3 mm,使得哈勃空间望远镜的成像远没有达到预期效果^[23]。直至 1993 年,宇航员将校正光学空间望远镜轴向替换系统(COSTAR)安装到哈勃空间望远镜以后才消除了球差,使得哈勃空间望远镜能够完全发挥其设计功能。改正球差前后的成像结果对比如图 21 所示^[24]。

The Central Region of the Active Galaxy NGC 1068 Hubble Space Telescope Faint Object Camera

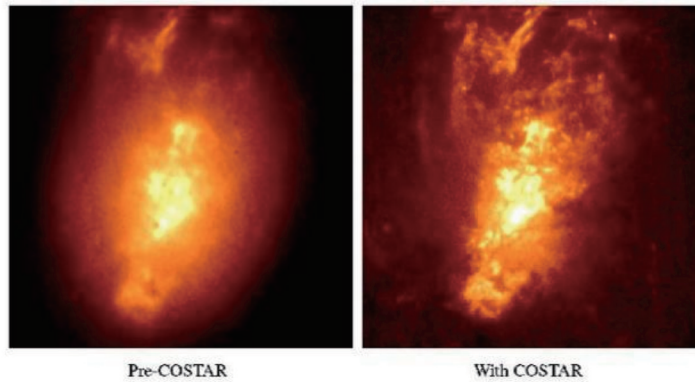


图 21 哈勃空间望远镜安装 COSTAR 前后的成像结果对比^[24]

Fig. 21 Comparison of imaging results before and after COSTAR installation of Hubble space telescope^[24]

上述经验表明,哈勃空间望远镜的主镜只采用单一手段进行检测,导致制造错误没能及时发现,充分说明在检测中需要引入至少两种手段进行复核,才能确保高精度反射镜制造结果的正确性。

针对一个口径为 310 mm 的凸双曲面(顶点曲率半径 R 为 4087 mm,二次曲面常数 K 为 -3.662),长

春光机所采用零位折射式补偿器和子孔径拼接两种手段进行检测复核,并完成了两种检测手段的对比。图 22 所示为采用子孔径拼接手段进行检测的子孔径规划及检测结果,图 23 所示为拼接后的全口径检测结果、折射式补偿器检测结果以及两种结果的残差分布^[25]。

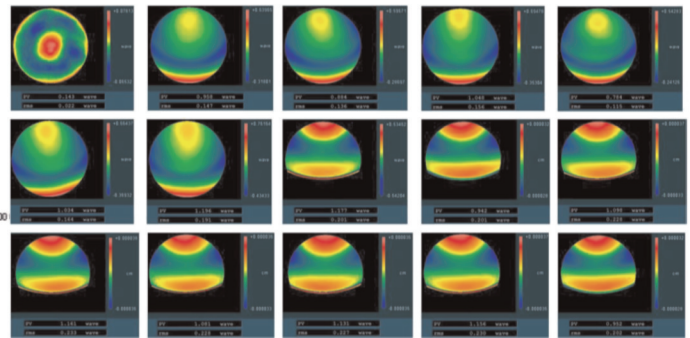
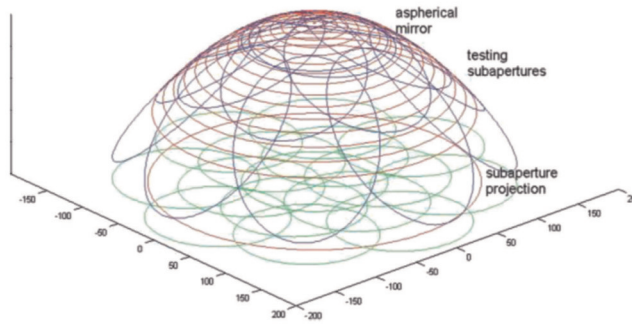


图 22 采用子孔径拼接手段进行检测的子孔径规划及检测结果^[25]

Fig. 22 Sub-aperture planning and measurement results using sub-aperture stitching method^[25]

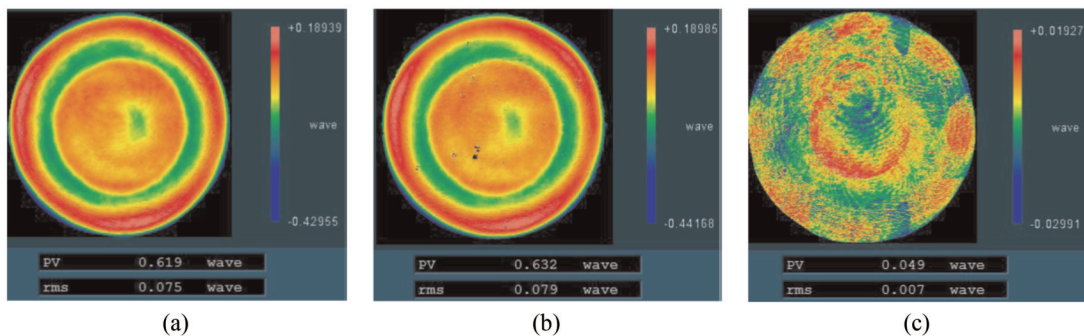


图 23 两种检测手段对比的残差分布^[25]。(a)拼接后全口径检测结果;(b)折射式补偿器检测结果;(c)两种检测结果的残差

Fig. 23 Residual distribution of the comparison between two methods^[25]. (a) Full aperture measurement results after splicing; (b) refractive compensator measurement results; (c) residuals of the two measurement results

针对某离轴非球面凹镜,长春光机所采用计算全息法和折射式补偿器两种零位补偿检测手段进行复

核,图 24 所示为折射式补偿器和计算全息法的检测结果,可以看出,二者具有较好的一致性^[26]。

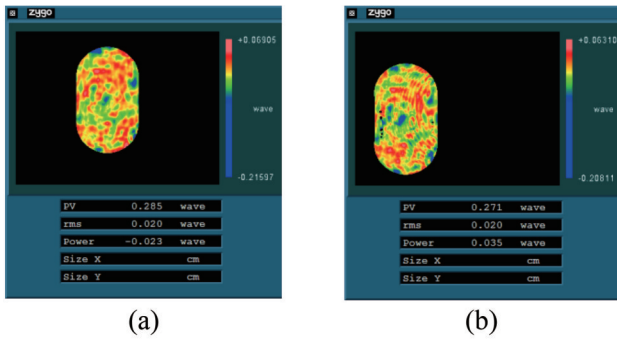


图 24 采用折射式补偿器的检测结果^[26]。(a)折射式补偿器的检测结果;(b)计算全息法的检测结果

Fig. 24 Measurement results of refractive compensator^[26]. (a) Measurement results of refractive compensator; (b) measurement results of computer-generated holography

离轴 TMA 和自由曲面系统的自由度高,装调难度大。长春光机所提出了基于计算全息法的共基准装

调技术,实现了离轴 TMA 系统主、三镜的共基准装调,其方案如图 25 所示,共基准装调现场照片和干涉图如图 26 所示^[27]。

农业农村部首星——高分六号卫星相机创新地采用了第二镜和第四镜共体自由曲面的设计方案,这给干涉检验带来了极大的技术挑战。长春光机所提出在一块计算全息板上同时实现二镜和四镜两块自由曲面的面形高精度检测方法^[28],其干涉检验方案和衍射区域分布如图 27 所示,二镜和四镜的面形检测结果如图 28 所示。

针对巡天光学设施 2 m 口径主镜的重力影响问题,长春光机所提出了天地一致性验证方案,结果表明,其面形精度优于 9.5 nm(RMS),与有限元软件的仿真结果一致,如图 29 所示。

以上从材料、设计、加工、检测、装调等角度系统性地对现有空间光学系统中非球面、自由曲面的应用作了概述。随着我国空间对地遥感和深空探测需

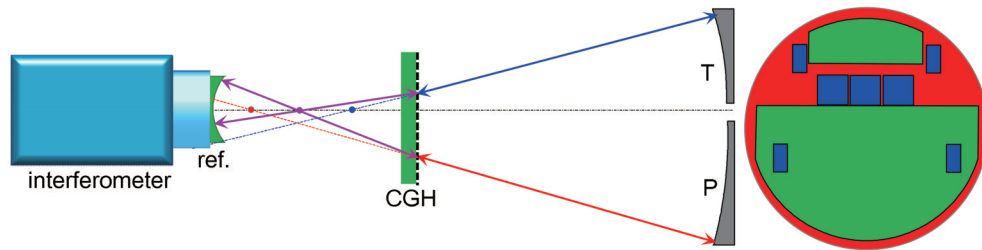


图 25 采用计算全息法实现离轴三反系统主、三镜的共基准装调方案^[27]

Fig. 25 Common reference alignment scheme for primary and tertiary mirrors of off-axis three-mirror system by CGH^[27]

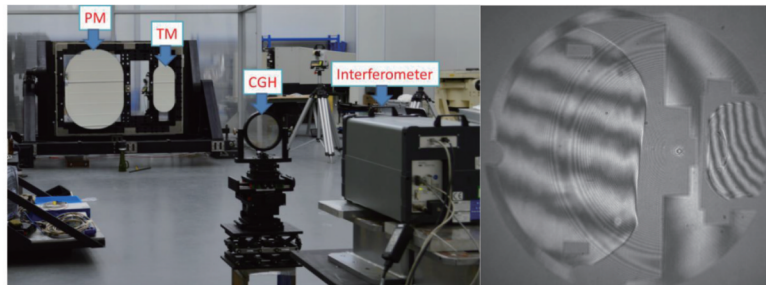


图 26 主、三镜共基准装调现场照片及干涉图^[27]

Fig. 26 Scene photo and interferograms of primary and tertiary mirrors common reference assembly^[27]

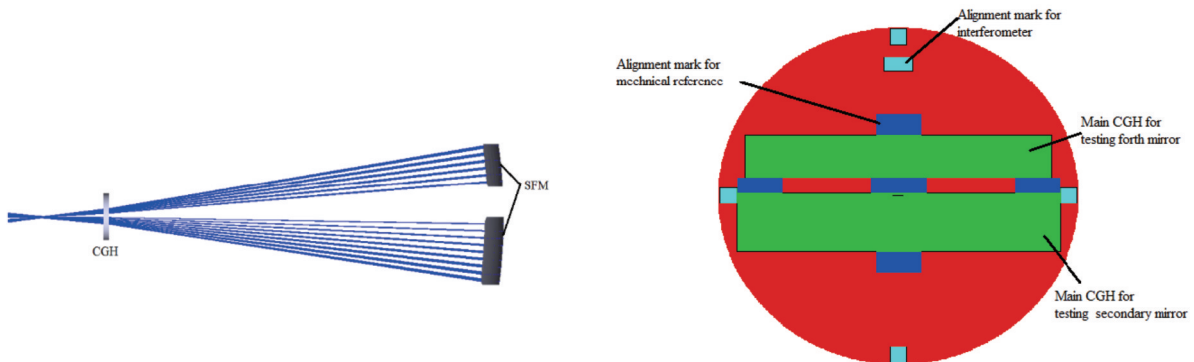


图 27 干涉检验原理和衍射区域分布图^[28]

Fig. 27 Principle of interference test and distribution of diffraction area^[28]

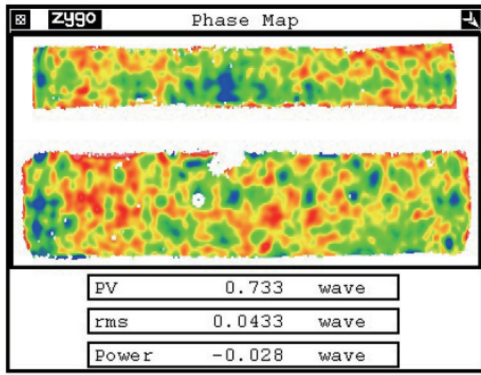


图 28 二镜和四镜的面形检测结果^[28]

Fig. 28 Surface measurement results of the second and fourth mirrors^[28]

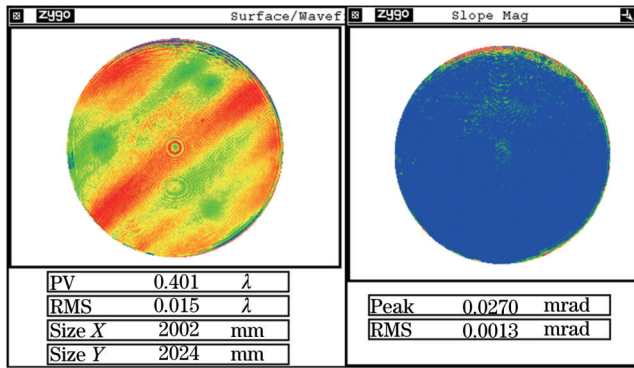


图 29 光学设施主镜面形天地一致性验证结果

Fig. 29 Consistency verification results of optical facility primary mirror

求的不断提高,以及自由曲面的设计、加工、检测、装调等领域关键核心技术的进一步突破,自由曲面光

学元件的应用领域将进一步扩大,这必将对我国空间光学系统综合性能的跨越式发展起到强有力的支撑作用。

6 展 望

基于多轴数控加工中心的先进光学制造技术取得了显著的研究成果和广泛的工程应用。然而,对于超大口径拼接式望远镜,光学制造则面临着质量和数量两个方面的挑战。以欧洲正在建设的 E-ELT 主镜为例,其口径达到 40 m,由 798 块 1.4 m 口径的非球面反射镜拼接而成,在质量上要求高复杂度下实现曲面光学元件的高精度制造,在数量上则要求大规模同类型非球面或自由曲面光学元件高效率一致性制造。在应对以上挑战时,工业机器人相较于经典多轴数控机床,以其灵活的自由度、较大的加工空间、较小的占地面积、可多台多工具协作、较强的可复制性及低成本等优点,具有巨大的潜力和很好的应用前景。机械臂光学加工设备作为未来智能制造的执行载体,推动了光学制造向光学智能制造发展,有潜力突破现有以人的经验为主导的光学制造能力极限,从根本上化解先进光学制造技术中精度与效率的矛盾。长春光机所光学系统先进制造团队研究了针对非球面及自由曲面的机械臂数控小磨头加工装备与技术,并进行了大规模应用推广。该团队在国际上首次提出将磁流变确定性抛光技术与工业机械臂结合,用低精度机械臂完成了高精度确定性光学加工^[29],如图 30 所示。

未来,面向自由曲面光学元件,光学智能制造通过工艺、算法、机器人设备等光学制造要素与大数据、云计算、机器学习等方法有机结合,形成“信息感知、智能

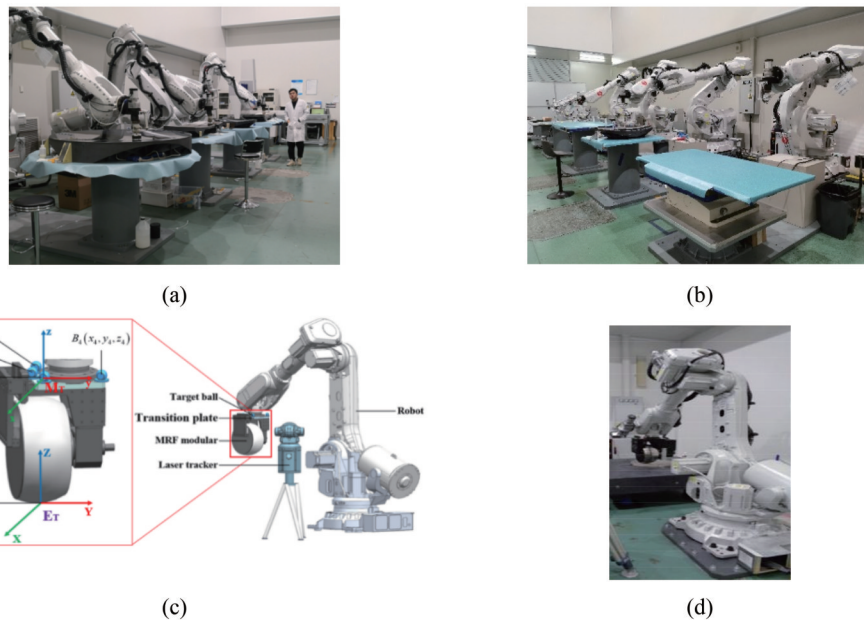


图 30 长春光机所机械臂光学加工设备^[29]。(a)(b)机械臂数控小磨头设备;(c)(d)机械臂磁流变抛光设备

Fig. 30 Mechanical arm optical processing equipment of CIOMP^[29]. (a)(b) Mechanical arm CCOS equipment; (c)(d) mechanical arm MRF polishing equipment

决策、控制输出、协同制造”智能制造体系,为我国光学制造业革命性变化提供新理论和途径,引领光学制造行业向标准化无人车间发展,打造自由曲面光学元件自动化、数字化、智能化绿色柔性制造新形态,实现我国“光学制造”向“光学质造”和“光学智造”的跨越式发展。

致谢 衷心感谢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院重点实验室的全体同仁,是他们十几年如一日的潜心研究和不懈努力,才使本文中的成果得以展现。

参 考 文 献

- [1] Hu Z. The wide-field multiband imaging and slitless spectroscopy survey to be carried out by the Survey Space Telescope of China Manned Space Program[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(11): 1290-1298.
- [2] 孟庆宇, 付中梁, 董吉洪, 等. 火星探测高分辨率可见光相机光学系统设计[J]. 深空探测学报, 2018, 5(5): 458-464.
Meng Q Y, Fu Z L, Dong J H, et al. The optical system design of the high-resolution visible spectral camera for China Mars exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(5): 458-464.
- [3] Pilbratt G L. Herschel mission overview and key programmes [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7010: 701002.
- [4] Endemann M. The ADM-Aeolus mission[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10567: 1056701.
- [5] Rodolfo J, Ruch E, Tarreau M, et al. SIC mirrors polishing[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10563: 105631Z.
- [6] Middleton E M, Ungar S G, Mandl D J, et al. The Earth Observing One (EO-1) satellite mission: over a decade in space [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013, 6(2): 243-256.
- [7] Zhang X J, Hu H X, Wang X K, et al. Challenges and strategies in high-accuracy manufacturing of the world's largest SiC aspheric mirror[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11: 310.
- [8] Montagnino L A. Test and evaluation of the Hubble space telescope 2.4-meter primary mirror[J]. Proceedings of SPIE, 1986, 0571: 182-190.
- [9] Hansen P A, Hughes D W, Triolo J J, et al. Hubble Space Telescope second servicing mission contamination control program[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2864: 27-35.
- [10] Korsch D. Reflective optics[M]. New York: Academic Press, 1991.
- [11] Jester P, Menke C, Urban K. Wavelet methods for the representation, analysis and simulation of optical surfaces[J]. IMA Journal of Applied Mathematics, 2011, 77(4): 495-515.
- [12] Cakmakci O, Kaya I, Fasshauer G E, et al. Application of radial basis functions to represent optical freeform surfaces[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7652: 76520A.
- [13] Ares M, Royo S. Comparison of cubic B-spline and Zernike-fitting techniques in complex wavefront reconstruction[J]. Applied Optics, 2006, 45(27): 6954-6964.
- [14] Badar I, Hellmann C, Wyrowski F. Wavefront phase representation by Zernike and spline models: a comparison[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2021, 38(8): 1178-1186.
- [15] Ikeda K, Gay S. OpticStudio TrueFreeform (TM) optimization for complex illumination systems[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11302: 113020D.
- [16] Fiete R D. Modeling the imaging chain of digital cameras[M]. Bellingham: SPIE, 2010.
- [17] 曾雪峰. 光学表面频段误差对成像质量的影响研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
Zeng X F. Impact on image performance of surface spatial frequency[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [18] Stahl H P. Overview and accomplishments of Advanced Mirror Technology Development Phase 2 (AMTD-2) project[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9602: 960208.
- [19] Zhao H S, Li X J, Fan B, et al. Experimental dynamic deformation analysis of active stressed lap[J]. Applied Optics, 2016, 55(6): 1190-1197.
- [20] 彭小强. 确定性磁流变抛光的关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
Peng X Q. Study on the key techniques of deterministic magnetorheological finishing[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004.
- [21] Hu H X, Qi E H, Luo X, et al. Rapid fabrication strategy for $\Phi 1.5$ m off-axis parabolic parts using computer-controlled optical surfacing[J]. Applied Optics, 2018, 57(34): F37-F43.
- [22] Zhou P, Burge J, Zhao C Y. Imaging issues for interferometric measurement of aspheric surfaces using CGH null correctors[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7790: 77900L.
- [23] Fischer R E, Tadic-Galeb B. Optical system design[M]. New York: McGraw-Hill, 2000: 525-529.
- [24] ESA[EB/OL]. [2022-05-06]. <https://esahubble.org>.
- [25] Yan L S, Wang X K, Zheng L G, et al. Non-null testing for standard quadric surfaces with subaperture stitching technique[J]. Optics Communications, 2015, 340: 159-164.
- [26] 黎发志, 罗霄, 赵晶丽, 等. 离轴非球面的计算全息图高精度检测技术[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 709-716.
Li F Z, Luo X, Zhao J L, et al. Test of off-axis aspheric surfaces with CGH[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(4): 709-716.
- [27] 李明. 基于CGH的非球面混合补偿检测及离轴光学系统装调的关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
Li M. Research on key technology of hybrid null testing of aspheric mirror and off-axis optical system alignment based on CGH[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [28] Zhang X J, Xue D L, Li M, et al. Designing, fabricating, and testing freeform surfaces for space optics[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8838: 88380N.
- [29] Cheng R M, Li L X, et al. High-precision magnetorheological finishing based on robot by measuring and compensating trajectory error[J]. Optics Express, 2022, 30(25): 44741-44768.

Progress on Space Optics Manufacturing: From Aspheres to Freeforms

Zhang Xuejun^{1,2*}

¹*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract

Significance Over the last decade, the performance of space optical systems has been significantly improved through the efforts of optical researchers in China and abroad. Two critical specifications of an Earth Observing (EO) system are resolution and swath. By this measure, China's recently launched commercial EO systems have reached a world-class level. These inspiring achievements are the results of courageous innovations and substantial practices in reflective optical materials, optical design, aspheric fabricating and testing, and system assembly.

Advanced manufacturing technologies of optical systems include mirror blank preparation, optical design, fabrication, coating, testing, and system assembly, which is an enabling technology for high-performance optical systems. The imaging optical system is an information collecting system rather than a simple energy collecting system. An important indicator to assess its performance is the information collecting capacity. For example, the requirements for the EO payloads are higher resolution and wider imaging swath. However, constrained by launch costs and working environments, the volume and mass of space optical systems are strictly restricted. Therefore, some common requirements for its manufacturing technology are summarized as follows. First, the mirror materials should have high specific stiffness and thermal deformation resistance to reduce the cost of launch mass and thermal control. Second, the systems with large aperture, long focal length, and large field of view (FoV) simultaneously are needed to solve the contradiction of high resolution and wide swath, and this results in multiple-mirror on-axis or off-axis design. Aspheric surfaces or even freeform surfaces are employed to increase the design freedom and balance the large off-axis field aberrations. Nevertheless, the off-axis aspheric or freeform design causes asymmetric mirror shape and system layout. Consequently, unlike the conventional slow lapping process, the deterministic computer-controlled optical surfacing (CCOS) technique is necessary to achieve higher accuracy and efficiency. Meanwhile, aspheric surface digital testing and system computer-aided alignment techniques are utilized through the whole process of milling, grinding, polishing, and system assembly to guide deterministic processing and verify the payload's performance consistency in space and on earth.

In this paper, the latest progress of space optical systems over the last decade in China are introduced with the combination of several on-orbit examples. The technological advantages include silicon carbide (SiC) material, space optical system design and configuration evolution, digital measurement of complex optical surfaces, and computer-aided assembly and adjustment technology. In addition, the future trend of advanced optical system manufacturing technology is discussed.

Progress The space qualified mirror materials should be easy to manufacture and of high dimensional stability to adapt to the working environments. Compared with optical glass and some metal materials, SiC ceramics exhibit excellent performance in specific stiffness and thermal stability (Table 1). For large-aperture space telescopes, reflective systems have been widely applied for their mirror light-weighting nature and chromatic aberration-free feature. Two-mirror systems are adopted traditionally in the early applications such as Ritchey-Chretien (RC) system (Fig. 5). Several designs based on three-mirror layouts have emerged in the 60s and 70s of 20th century to further correct astigmatism and increase the available FoV, and the most successful example is the three-mirror anastigmat (TMA) proposed by Korsch (Fig. 6). To further increase the field of view and correct the higher-order off-axis aberrations, this paper introduces freeform surfaces based on the conventional TMAs. The optical payload in GF-6 satellite is an off-axis four-mirror design, in which the second-and-fourth mirror employs the Zernike freeform surfaces (Fig. 11). The rapid development of advanced manufacturing technology has been greatly promoted with the evolution of complex optical system configurations. The CCOS, magnetorheological finishing (MRF) and ion beam figuring (IBF), and other advanced manufacturing technologies have been developed and applied to manufacturing aspherical optical systems (Fig. 16) with extremely high shape accuracy (Fig. 19). In addition, the aspheric surface testing methods have been developed and utilized in a combined way to measure the surface shape (Figs. 22 and 23). Finally, based on the co-reference alignment technology using computer-generated hologram (CGH), some testing results of the aligned system are shown (Figs. 25-26).

Conclusions and Prospects The advanced optical manufacturing technology based on multi-axis computer numerical

control machining center has yielded remarkable results and has been extensively applied in numerous projects. However, for very large aperture monolithic or segmented mirror telescopes, optical manufacturing faces challenges in high quality and volume productions. On one hand, 8 m class aspheric or freeform mirrors need to be manufactured to the accuracy of sub-10 nm RMS. On the other hand, hundreds of 1 m class aspherical segmented mirrors need to be polished with high efficiency and consistency. In the future, an optical intelligent manufacturing system will be constructed with the combination of intelligent decision support, process sensing, collaborative manufacturing based on big data, cloud computing, and machine learning. The unmanned workshops together with intelligent green flexible manufacturing technology are highly expected in the following decade.

Key words optical design; space camera; asphere; freeform; advanced manufacturing