

# 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\*

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春 130033; <sup>2</sup>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

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<sup>[1]</sup>;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<sup>[2]</sup>。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 **DOI:** 10.3788/AOS221907

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4m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1.5m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)

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 第 43 卷 第 8 期/2023 年 4 月/光学学报

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。

Table 1         Basic properties and specific stiffness of common reflector materials							
Material	Density $\rho /$ (g•cm <sup>-3</sup> )	Elastic modulus <i>E /</i> GPa	Poisson ratio µ	Linear expansion coefficient $\alpha$ / $(10^{-6} \text{ K}^{-1})$	Thermal conductivity $\lambda / (W \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	Heat capacity $C / (\mathbf{J} \cdot \mathbf{kg}^{-1} \cdot \mathbf{K}^{-1})$	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
$\mathrm{Al}^1$	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

		表1	常月	反射	1镜材料	制的基本	属性	发比刚	度	
1. 1	Deale		antiaa	and .	an a aifi a					

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<sup>[3]</sup>[图 2(a)]工作在远红外波段(55~672  $\mu$ m),采用  $\phi$ 3.5 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<sup>[4]</sup>[图 2(b)]采用了 1.5 m SiC 主镜, 欧空局 2013 年研制的 Gaia 望远镜<sup>[5]</sup>[图 2(c)]采用了 1.45 m×0.5 m的 SiC 主镜,美国 EO-1<sup>[6]</sup>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1.5m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1~4m量级系列SiC反 射镜坯制备<sup>[7]</sup>,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<sup>2</sup>,如图4(a)所示<sup>[8]</sup>。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<sup>2</sup>,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<sup>2</sup>,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<sup>2</sup>,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<sup>[3]</sup>; (b) ALADIN 望远镜<sup>[4]</sup>; (c) Gaia 望远镜<sup>[5]</sup>; (d) EO-1<sup>[6]</sup> Fig. 2 Applications of SiC mirrors in space optical systems. (a) Herschel telescope<sup>[3]</sup>; (b) ALADIN telescope<sup>[4]</sup>; (c) Gaia telescope<sup>[5]</sup>; (d) EO-1<sup>[6]</sup>



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



图 4 ULE 轻量化反射镜与 SiC 反射镜应用对比<sup>[8]</sup>。(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<sup>[8]</sup>. (a) Hubble space telescope primary mirror; (b) CSST primary mirror; (c) ultra-lightweight SiC mirror

### 第 43 卷 第 8 期/2023 年 4 月/光学学报

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<sup>[9]</sup>。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  $f_1/D减小,主镜加工检测难度加大;对于次镜,其焦比$  $<math>f_2/D_2$ 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<sup>[10]</sup>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<sub>1</sub>、r<sub>2</sub>、r<sub>3</sub>)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<sub>1</sub>、d<sub>2</sub>)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<sup>[10]</sup> Fig. 6 Optical layout of Korsch TMA system<sup>[10]</sup>

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( $\theta_{FOV}/2$ ),其中h为像高,f为焦距, $\theta_{FOV}$ 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<sup>[11-15]</sup>。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

### 第 43 卷 第 8 期/2023 年 4 月/光学学报

特邊	<b>ጷ</b> 综述	第 43 卷 第 8 期/2023 年 4 月/光学学报						
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 /mm	400-900	700-800	320-1050	400-1000	400-750	450-520	450-900	
Field angle /(°)	0.543	1.5	0.118	1.142-0.175	2.86	7.9817.2	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 Zemike多项式的自由曲面,使其面视场扩大至1.1°× 1.1°,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Zemike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









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

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

第 43 卷 第 8 期/2023 年 4 月/光学学报



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; $\lambda$ 为波长;p为像元尺寸。需要 指出的是,国外学者Fiete<sup>[16]</sup>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<sup>[17]</sup>。



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<sup>[18]</sup>。

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

### 第 43 卷 第 8 期/2023 年 4 月/光学学报

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 diax 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<sup>[19]</sup>,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4m量级(地基4mULE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<sup>[20]</sup>,

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<sup>[19]</sup>

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

### 第 43 卷 第 8 期/2023 年 4 月/光学学报



图 15 国防科技大学研制的 KDMRF 机床<sup>[20]</sup> Fig. 15 KDMRF polishing machine developed by National University of Defense Technology<sup>[20]</sup>

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600mm提高 到4000mm,FSGJ-4加工中心能够实现对4m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<sup>[7]</sup>,如图 16 所示。





图 16 长春光机所的4m量级大口径复杂曲面全链路集成制造系统<sup>[7]</sup>。(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<sup>[7]</sup>. (a) Mirror blank preparation system; (b) aspheric processing system; (c) aspheric measurement system; (d) aspheric coating system

对于1m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12nm( $\lambda$ / 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1.5m口径离轴抛物面镜加工中<sup>[21]</sup>,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 µrad(slope RMS),如图19所示。1.5m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 1.5m口径离轴抛物镜加工结果<sup>[21]</sup> Fig. 19 Processing results of 1.5 m off-axis parabolic mirror<sup>[21]</sup>

#### OVERALL DURATION FOR Φ1.5M OAP FABRICATION,2 MONTH (UNIT IN DAYS)



图 20 1.5m口径离轴抛物镜各工序加工时间<sup>[21]</sup> Fig. 20 Processing time of each process of 1.5 m off-axis parabolic mirror<sup>[21]</sup>

# 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(CGH)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<sup>[22]</sup>。

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<sup>[23]</sup>。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<sup>[24]</sup>。

# 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<sup>[24]</sup> Fig. 21 Comparison of imaging results before and after COSTAR installation of Hubble space telescope<sup>[24]</sup>

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<sup>[25]</sup>。



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<sup>[25]</sup> Fig. 22 Sub-aperture planning and measurement results using sub-aperture stitching method<sup>[25]</sup>



图 23 两种检测手段对比的残差分布<sup>[25]</sup>。(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<sup>[25]</sup>. (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<sup>[26]</sup>。

### 第 43 卷 第 8 期/2023 年 4 月/光学学报

### 特邀综述



- 图 24 采用折射式补偿器的检测结果<sup>[26]</sup>。(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<sup>[26]</sup>.
  - (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<sup>[27]</sup>。

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 镜的面形高精度检测方法<sup>[28]</sup>,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2m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9.5nm(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<sup>[27]</sup>



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<sup>[27]</sup>



图 27 干涉检验原理和衍射区域分布图<sup>[28]</sup> Fig. 27 Principle of interference test and distribution of diffraction area<sup>[28]</sup>



图 28 二镜和四镜的面形检测结果[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 第 43 卷 第 8 期/2023 年 4 月/光学学报

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40m,由798块1.4m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<sup>[29]</sup>,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<sup>[29]</sup>。(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<sup>[29]</sup>. (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新途径,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** 哀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

- 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-

### 第 43 卷 第 8 期/2023 年 4 月/光学学报

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] 曾雪锋.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 Φ1.5 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<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033,

Jilin, China;

<sup>2</sup>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 computergenerated 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