

文章编号 2097-1842(2022)05-0973-10

大口径光学望远镜拼接镜面关键技术综述

霍银龙^{1,2}, 杨 飞^{1,2*}, 王富国^{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:随着天文探测的不断发展, 望远镜的口径越来越大, 拼接镜面技术为大口径望远镜主镜的设计提供了一种比单镜面形式更简单可行的替代方案, 现已成为大口径望远镜主镜设计的重要途径。本文以詹姆斯·韦伯空间望远镜 (JWST) 和三十米望远镜 (TMT) 等典型拼接式望远镜的主镜设计为参考, 总结了当前拼接镜面技术的发展现状; 并阐述了在大规模子镜背景下, 不同子镜拼接方案的性能差异, 以及镜面支撑技术和共相检测技术的未来发展趋势, 希望可以为我国下一代极大口径光学望远镜的自主研制提供参考。

关键词: 拼接镜面; 大口径光学望远镜; 子镜支撑; 共焦共相

中图分类号: TH751 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0109

Overview of key technologies for segmented mirrors of large-aperture optical telescopes

HUO Yin-long^{1,2}, YANG Fei^{1,2*}, WANG Fu-guo^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

* *Corresponding author, E-mail: yangflying@163.com*

Abstract: With the continuous development of astronomical exploration, the aperture of telescopes is getting larger and larger. Segmented mirror technology offers a viable and much simpler alternative to a large single monolithic primary mirrors, and has become an important way of designing the primary mirror of large-aperture telescopes. This paper summarizes the current development status of various technologies with reference to the primary mirror design of typical segmented telescopes such as the JWST and TMT, and elaborates on the performance differences and mirror supports of different segmented primary mirror schemes under the background of large-scale sub-mirrors. Potential future development trends of this technology and co-phases

收稿日期: 2022-05-31; 修订日期: 2022-06-22

基金项目: 吉林省科技发展计划国际科技合作项目 (No. 20210402065GH); 中国科学院青年创新促进会优秀会员 (No. Y202053); 中国科学院国际伙伴计划 (No. 181722KYSB20200001); 国家自然科学基金 (No. 11973040)

Supported by the Jilin Science and Technology Development Program (No. 20210402065GH); Excellent Member of Youth Innovation Promotion Association CAS (No. Y202053); International Partnership Program of the Chinese Academy of Sciences (No. 181722KYSB20200001); National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No. 11973040)

ing detection technology are provided. This research acts as a reference for the independent development of the next generation of very large aperture optical infrared telescopes in China.

Key words: segmented mirror; large-aperture optical telescopes; sub-mirror support; co-focus and co-phasing

1 引言

望远镜在满足天文观测、空间环境监测、先进光束控制技术试验平台以及重大航天活动等领域具有重要的应用价值^[1],天文望远镜的主镜尺寸会影响望远镜在理想条件下的成像分辨率和对比度,同时望远镜所能观测到的最微弱天体的亮度也受其主镜有效面积的限制。因此,为改进望远镜的观测性能,其主镜直径不断增大^[2-3]。但受镜坯制造、生产运输等环节的限制,目前国际上最大口径的单镜面光学望远镜为 8 m 级的,更大口径的光学望远镜主镜通常采用拼接镜面技术制备^[2-5]。

拼接镜面技术为未来极大、甚大口径光学望远镜的主镜制备提供了一种重要的选择,它解决了光学望远镜口径无法突破 8 m 级限制的技术壁垒,并已广泛应用于大型光学望远镜主镜的设计中,如国外的凯克望远镜(Keck I、II)、霍比-埃伯利望远镜(Hobby-Eberly Telescope, HET)、加那利大型望远镜(Gran Telescopio Canarias, GTC)、南非大望远镜(Southern African Large Telescope, SALT)、三十米望远镜(Thirty Meter Telescope, TMT)、欧洲极大望远镜(European Extremely Large Telescope, E-ELT)和詹姆斯·韦伯空间望远镜(James Webb Space Telescope, JWST)等,国内采用拼接镜面技术建造的大口径光学望远镜的典型代表是大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(Large Sky Area Multi-object Fiber Spectroscopic Telescope, LAMOST),它的建成为我国研制超大口径拼接望远镜打下了坚实的基础,并在此基础上,提出了 12 m 通用大型光学红外望远镜(Large Optical-infrared Telescope, LOT)的研制项目。这些望远镜以其更宽更深的观测能力,将为我们解决宇宙中更多悬而未决的科学问题^[6],现有拼接式望远镜的科学目标主要集中在银河系结构与形成、太阳系普查、暗物质暗能量的研究、近地天体观测与跟踪、黑洞观测等几个科学前沿领域。天文学家利用 Keck 望远镜取得了多项突破性成就,不仅验证了宇宙加速膨胀,还观测到银河系中心

黑洞,这两项观测成果分别荣获了 2011 年和 2020 年的诺贝尔奖^[7];HET 协助天文学家首次发现了恒星吞噬行星的证据;JWST 是目前口径最大的空间光学望远镜,它具备强大的红外分辨率和灵敏度,是哈勃太空望远镜的继任者,相信在不久的将来,JWST 将进一步影响甚至颠覆人类的自然观,引领空间天文学迈入新纪元。

本文综述了拼接式望远镜主镜设计常采用的拼接方案,比较了不同拼接方案间的差异,重点阐述了子镜支撑技术和共相检测技术的发展现状和未来发展趋势,为我国下一代极大口径光学红外望远镜的自主研制提供参考。

2 常见拼接方案介绍

2.1 不同子镜性能介绍

由于拼接方案的不同,拼接子镜的形状和尺寸也各有差异,常见的子镜形式主要有圆形、扇形和六边形等,其中六边形子镜是实际应用最多的一种子镜形式^[4]。3 种不同的主镜拼接结构形式如图 1 所示,其中左上角为单镜面形式,右上角主镜为六边形子镜拼接形式,左下角为圆形子镜拼接形式,右下角为扇形子镜拼接形式。

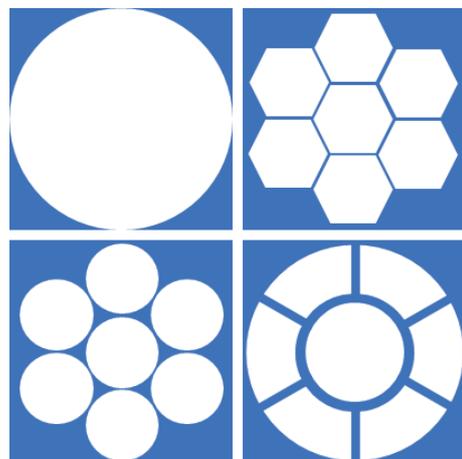


图 1 拼接子镜形状示意图

Fig. 1 Schematic diagram of segmented sub-mirror shape

针对拼接子镜的形状差异,国内外诸多学者已开展了多项研究,其中:宋家宝^[8]比较了扇形和

六边形子镜的性能差异, 在面积和支撑点数相同的条件下, 分析了两种子镜在重力作用下的镜面变形; 雷存栋^[9] 设计了扇形拼接方案并进行了共相试验验证; Kendrick S E^[10] 等人阐述了环形和六边形子镜形状的差异, 并分析了子镜尺寸对拼接效果的影响。当拼接环数、等效口径相同时, 不同子镜形状差异总结如表 1 所示。

李斌分析了拼接误差、子镜曲率加工误差以及拼接间隙对拼接镜成像性能的影响。他们的研究表明拼接镜的成像质量会随拼接误差、间隙因子的增大而变差^[11]。曹海峰^[4] 通过对拼接子镜形状及尺寸的相关研究, 分析结果如图 2 所示, 验证

表 1 不同子镜形状差异

Tab. 1 Comparison of different sub-mirror shapes

子镜形状	拼接间隙	对称性	子镜种类	制造难度
六边形	较小	六重	多	较大
扇形	小	一般	较少	大
圆形	大	好	少	小

了由不同拼接子镜所组成的主镜在望远镜光学系统中, 对较低空间频率信息的调制能力基本一致, 故圆形子镜拼接可代替六边形子镜拼接方案, 且圆形子镜在未来更大规模拼接镜面望远镜中的应用具有一定的优势。

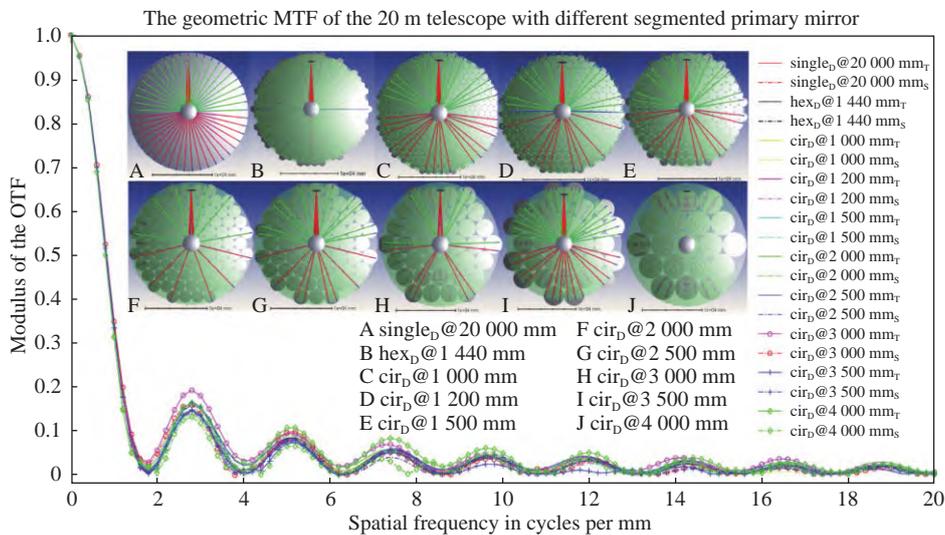


图 2 子镜尺寸对光学系统 MTF 的影响^[4]

Fig. 2 Effect of sprite size on the MTF of optical systems^[4]

2.2 典型主镜拼接方案

JWST 是空间光学望远镜的巅峰之作, 同样也是拼接式望远镜的典型代表。JWST 于 2021 年 12 月成功发射, 其等效口径为 6.5 m, 观测波段为 0.6~28 μm 。图 3 为 JWST 的三维模型和其主镜。



图 3 JWST 的三维模型和主镜^[12]

Fig. 3 3D model of the JWST and its primary mirror^[12]

其主镜是由 18 块对角距离为 1.5 m 的六边形子镜拼接成的凹面镜, 所选用的材料为铍, 每个子镜的质量约为 20 kg^[13]。这 18 块子镜拥有 3 种不同的类型, 每种类型的镜面各有 6 个, 如图 4

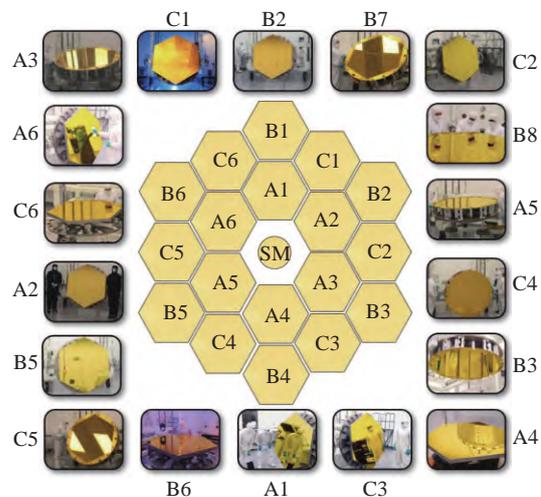


图 4 JWST 拼接主镜方案^[12]

Fig. 4 The segmented primary mirror scheme of the JWST^[12]

所示, A、B 或 C 表示拼接子镜所属的子镜类型。

2.3 总结及发展趋势

拼接镜面技术为建造大口径望远镜提供了可

能,并在空间和地基望远镜主镜设计中得到了广泛应用。表 2 列举了部分大型拼接式望远镜设计的基本情况。

表 2 大型拼接镜面望远镜基本参数

Tab. 2 Basic parameters of large segmented mirror telescopes

时间	选址	名称	主镜		拼接子镜		
			等效口径/m	材料	形状	数量	尺寸/m
1993	American	Keck I	10	Zerodur	Hexagon	36	1.8
1996	American	Keck II	10	Zerodur	Hexagon	36	1.8
1997	American	HET	9.2	Zerodur	Hexagon	91	1.15
2005	South Africa	SALT	9.5	Glass-ceramic	Hexagon	91	1.16
2008	Spain	GTC	10.4	Glass-ceramic	Hexagon	36	1.9
2008	China	LAMOST	4	Zerodur	Hexagon	61	1.1
2019	Japan	Seimei	3.8	Zerodur	Petals	18	1.2
2021	American	JWST	6.5	Be	Hexagon	18	1.5
—	American	GMT	21	E6	Circular	7	8.4
—	American	TMT	30	Zerodur	Hexagon	492	1.44
—	Europe	E-ELT	39.3	Zerodur	Hexagon	798	1.4
—	China	LOT	12	Zerodur	Hexagon	84	1.44

由表 2 中数据可知:

(1) 国外正着力开展 30~100 m 级别的巨型光学望远镜的研制,但国内迄今为止并没有建成 10 m 以上的光学红外望远镜,天文学家不得不借用国外的望远镜来进行观测,对我国天文学的发展产生不利影响。

(2) 六边形子镜是实际应用最多的一种拼接子镜形式,且受研制成本和拼接复杂程度的限制,子镜尺寸大多集中于 1~1.8 m 范围内。

(3) 随着等效口径的增大,在拼接子镜尺寸一定的情况下,所需子镜的数量也急剧增加,例如 E-ELT 和 TMT 在拼接子镜尺寸为 1.4 m 左右的情况下,等效口径增加了 9.3 m,但子镜数量相较 TMT 却增加了 62.2%,子镜数量的倍增无疑给子镜研制环节带来了巨大的挑战,为缩短项目研发周期,拼接子镜的研制必将朝着快速化、批量化趋势发展。

(4) 另一方面,在材料的选用上,现有拼接子镜大多选用 Zerodur 材料,我国 LAMOST 的施密特主镜也采用此种材料,但国内并未真正掌握该材料制备反射镜的工艺,关键技术仍依赖国外,一

定程度上限制了我国大口径天文望远镜的发展进程。众所周知, SiC 材料是目前国际光学界公认的高性能反射镜材料^[14-16],中国科学院长春光学精密机械与物理研究所突破了 SiC 材料在镜坯制备、光学超精密加工和改性镀膜等领域的核心技术,于 2016 年研制出直径 4.03 m 的单体碳化硅反射镜坯,镜坯重量 1.7 t,并于 2018 年 8 月完成加工及镀膜,关键技术自主可控,打破我国在大口径反射镜材料研制上完全依赖进口的窘迫局面^[17]。与传统的金属和玻璃材料相比, SiC 材料具有适中的密度、较高的比刚度和热导率以及良好的光学加工性能,是较为优良的光学材料,开展基于 SiC 材料的反射镜拼接是未来大口径望远镜发展的一个新选择、新突破。

3 子镜支撑技术概述

随着望远镜口径的增大,其主镜面形受自重、风载、热变形等因素的影响也越来越大,对镜面的支撑系统提出了更高的设计要求^[18-19],拼接式望远镜的主镜是由众多子镜拼接而成,对主镜

的支撑则转化为了对多个子镜的支撑^[20]。TMT 是新一代地基巨型光学—红外望远镜的典型代表, 其子镜支撑技术继承和借鉴了 Keck、SALT 的设计, 在支撑领域更具有代表性, 因此, 本章以 TMT 的子镜支撑系统为例, 介绍拼接式望远镜的子镜支撑技术。

3.1 TMT 子镜支撑系统

TMT^[21-22] 的主镜由 492 块对角距离为 1.44 m 厚 4.5 cm 的六边形子镜拼接而成, 该主镜阵列具有六重对称性, 如图 5 所示, 共拥有 82 种不同类型的拼接子镜。

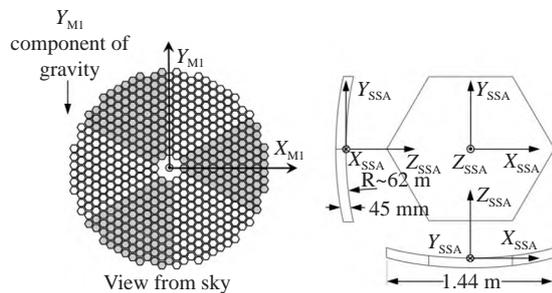


图 5 TMT 主镜和子镜形状^[23]

Fig. 5 Primary mirror and sub-mirror of TMT^[23]

TMT 子镜支撑系统如图 6 所示, 其轴向采用 27 点 Whiffletree 支撑, 径向采用中心膜片支撑。整个系统由 3 个位移促动器来主动调节镜面的平移和倾斜误差, 并由翘曲弹簧结构(Warping Harness)来控制拼接镜面的面形。与 Keck 相比, TMT 的主镜尺寸更大、子镜厚度更薄, 受自重影响程度更大, 不仅需要位移促动器的行程更大, 而且控

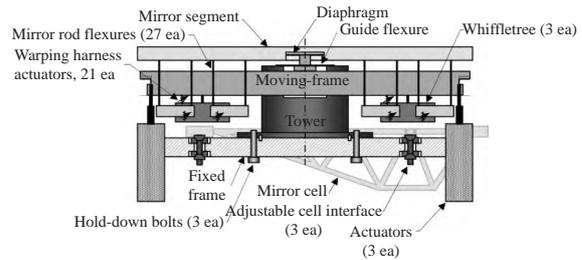


图 6 TMT 支撑系统示意图^[23]

Fig. 6 Schematic diagram of the TMT support system^[23]

制重力变形的难度也更大。因此, TMT 使用了一个作为中间级的刚性移动架, 该结构不仅可以将子镜与促动器施加的变形力分离开, 还可以平衡 Whiffletree 的径向力。

其中, Whiffletree、Sheet Flexures 和移动框架由铝制成。支撑镜子的 27 个柔性杆和 Whiffletrees 的枢轴为不锈钢, 径向支撑的中心膜片由低膨胀率的殷钢制成, 并使用树脂与子镜连接。

此外, TMT 的子镜支撑系统可通过调整 Whiffletree 的枢轴来弥补 82 种子镜类型的微小尺寸差异^[23]。

3.2 子镜支撑技术发展趋势

表 3 列举了部分拼接式望远镜的子镜支撑结构。自 Keck 以来, 拼接子镜几乎都采用 Whiffletree 结构作轴向支撑、中心膜片作径向支撑的形式^[20], 同时也有越来越多的拼接主镜采用了 Warping Harness 技术。Warping Harness 技术可大幅缩短拼接镜面的制造周期, 在未来大口径光学拼接望远镜主镜的设计中具有重要的应用价值。

表 3 大型拼接望远镜支撑结构

Tab. 3 Large segmented mirror telescope support structures

	Keck	HET	SALT	GTC	LAMOST	TMT	E-ELT
支撑点数	36-pt	9-pt	9-pt	36-pt	18-pt	27-pt	27-pt
轴向支撑	Whiffletree						
径向支撑	中心膜片						
Warping Harness	手动	无	无	自动	无	自动	自动
促动方式	直接促动	直接促动	移动架	直接促动	直接促动	移动架	移动架

随着拼接式望远镜口径的不断增大, 子镜数量也不断增多, 对支撑系统提出了更高的设计要求, 为降低设计及制造成本, 缩短项目研发周期, 可采取以下措施:

(1)降低拼接子镜种类, 增强支撑系统的可复

制性。当采用六边形子镜拼接时, 所需子镜种类为拼接子镜总数的 1/6, 而圆形和扇形子镜的优势在于与主镜主光轴距离相等位置处的子镜形状完全一致, 综合考虑镜面支撑、镜坯制备等技术的难易程度, 圆形子镜在未来更大规模拼接镜面望

远镜中的应用更具有优势。

(2) 开展支撑结构的模块化和参数化设计。拼接主镜采用形状相似的子镜单元进行设计, 将主镜支撑分解为对子镜的支撑, 通过并行设计各子镜的支撑模块, 缩短系统研制周期。此外, 根据工程关系和设计需求, 建立子镜支撑结构的参数化模型, 通过修改该模型的可变参数, 实现特定子镜支撑结构的设计, 简化设计流程。例如 TMT 子镜支撑设计时, 可通过调整 Whiffletree 枢轴连接位置上的微小差异来弥补 82 种子镜类型的尺寸差异, 以实现整个支撑系统的参数化、高效设计。

4 共相检测技术

4.1 共相误差简介

拼接镜面若想实现与等效单镜一样的成像能力, 就需要子镜的反射面处于共相状态^[4]。制造误差和拼接误差是影响子镜间共相的主要误差, 制造误差主要包括曲率误差、镜面面形误差等; 拼接误差主要包括子镜平面(OXY)的面内误差和离面误差, 面内误差主要包括沿 X 轴和 Y 轴的平移的偏心误差和绕子镜中心的旋转误差, 离面误差如图 7 所示, 主要指沿 Z 轴的平移误差(Piston 误差)和绕 X、Y 轴旋转的倾斜误差(Tip-Tilt 误差)。

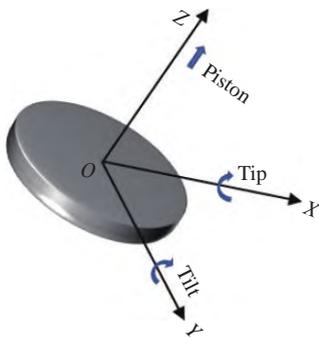


图 7 平移误差以及倾斜误差示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the piston and tip/tilt error

子镜共焦/共相主要是指测量和剔除子镜的 Piston 和 Tip/Tilt 误差^[23-27], 其中 Tip/Tilt 误差的检测与调节已相对成熟, 可通过 Shack-Hartmann (SH) 相机测量并消除, 即实现拼接子镜间的共焦状态^[4,28]。然而 Piston 误差很难检测和消除, 且在检测过程中, 由于光波的周期性, 在使用单色光检测时会存在如图 8 所示的 2π 模糊的问题^[29-31]。接下来, 本文将介绍几种常见的共相误差检测技术。

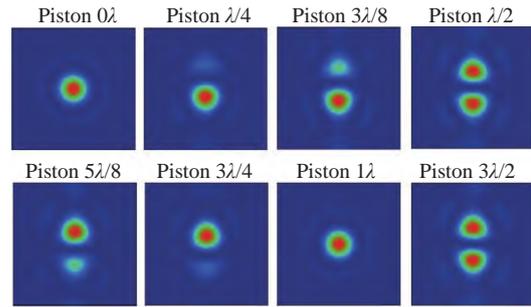


图 8 Piston 误差的 2π 模糊性^[23]

Fig. 8 2π ambiguity of the piston error^[23]

4.2 常见的共相检测方法

现有的共相检测技术主要包括夏克哈特曼传感法 (Shack-Hartmann Phasing Sensor, SHAPS)、色散条纹传感技术 (Dispersed Fringe Sensor, DFS)、相位差 (Phase Diversity, PD) 技术和相位恢复 (Phase Retrieval, PR) 技术、曲率传感技术 (Curvature Sensing, CS) 等。这些检测方法均有各自的优势, 但也存在一些局限性, 例如: 夏克哈特曼传感法虽然探测范围大、精度高, 但需使用精密的光瞳掩模, 掩模与子镜光瞳边界对准困难, 此外, 色散条纹传感器检测精度较低; 相位差法精度高, 但求解算法的运算量大, 难以实现对共相误差的实时检测。曹海峰博士^[4]归纳总结了已有的共相检测技术, 见表 4 所示。

表 4 共相检测技术的性能对比

Tab. 4 Performance comparison of co-phasing detection technologies

技术分类	Piston 检测	Tip/Tilt 检测	光瞳 对准	粗/精 共相	2π 模糊 (λ)	量程	非共光 路误差
像平面	PD	Y	Y	N	精	$\pm\lambda/2$	N
	PR	Y	Y	N	精	$\pm\lambda/2$	N
光瞳面	SHAPS	Y	Y	Y	粗/精	$\pm\lambda/2$	Y
	PY	Y	Y	Y	精	$\pm\lambda/4$	Y
	ZELDA	Y	Y	N	粗/精	$\pm\lambda/2$	Y
中间面	DHS/DFS	Y	N	Y	粗/精	$\pm\lambda/2$	Y
	PISTIL	Y	Y	N	精	3λ	Y
	DIPSI	Y	Y	N	粗/精	$\pm\lambda/2$	N
	CS	Y	Y	N	精	$\pm\lambda/8$	N

分析表 4 可知, 一方面, 已有的共相检测技术往往难以同时达到大量程、高精度、不引入非共光路误差、实时性强的检测要求, 亟需对拼接共

相检测领域开展进一步的研究,探索新的共相方法以满足实际系统的应用需求。另一方面,由于光波的周期性,这些方法在使用单色光检测 Piston 误差时,均存在 2π 模糊的问题。目前,为克服 2π 模糊性困扰,常采用多个单波长或宽波段的复色光进行 Piston 误差检测^[23],李斌^[11]、曹海峰^[4]等人均通过双波长算法来避免了 2π 模糊的影响,此外,山东大学的杨丽丽、杨忠明^[32]等人将涡旋光束相移干涉与双波长算法相结合用于拼接镜的共相误差检测中,实现了 Piston、Tip/Tilt 误差的精确测量。这是首次将涡旋光束应用于共相误差的检测,为拼接镜共相误差测量提供了一种新思路。

4.3 未来发展趋势

传统共相检测方法利用相关分析方法,将检测所得到的图像与已知子镜相对位置的图像进行对比分析,从而得出所需要的调整量^[5]。但在大规模子镜的情况下,主镜系统更难以实现共相调整,在检测时将会产生大量冗杂、复杂的数据,这就给传统的检测分析方法提出了很大的挑战,而机器学习、神经网络、深度学习等算法都具有超强的模式分析和数据挖掘能力,因此可以为共相误差检测提供一个新的研究思路。

随着神经网络、机器学习等相关算法的深入研究,国内外诸多学者尝试将其应用于拼接子镜共相误差的探测当中^[33-35]。例如:中国科学院光电技术研究所的马霞飞^[36]于2019年通过500张图像完成了深度学习的网络训练,实现了两孔系统100 nm宽波段共相。2019年,李德全等人将卷积神经网络引入相位差算法,同时结合多波长思想,将子镜 Piston 误差的检测范围提高至10个波长^[37];曹海峰结合多波长、曲率传感技术以及机器学习技术,提出利用支持向量机进行相邻两拼接子镜间 Piston 误差识别的方法^[38]。

将深度学习引入拼接共相误差的检测中,依据其强大的模式分类和数据分析能力,充分挖掘大规模数据间的特征,提升分类或预测的准确性,并通过构建复杂的网络模型降低拟合偏差,可实现拼接子镜间共相误差的高精度检测。因此,开展基于深度学习、机器学习的共相位误差检测技术的研究,是未来大规模子镜背景下共相检测和调整的一个重要发展方向。

5 结 论

本文主要围绕主镜拼接方案、子镜支撑技术和共相检测技术开展研究,研究结论如下:

(1)在常见的拼接方案中,六边形子镜是应用最多的。各种子镜均具有一定的优势,同时也具备一定的局限性。因此,在确定拼接方案时,应综合考虑各子镜的属性差异、镜坯制备难度、拼接误差容限、观测目标特性等多种因素,最终确定最优方案。

(2)在反射镜制备材料的选用上,拼接式望远镜多采用微晶玻璃作为子镜材料。随着我国 SiC 镜坯的材料制备、光学加工与检测等技术的快速发展,已经具备口径达4 m级的 SiC 光学反射镜研制能力,可为下一代拼接式望远镜的研发提供有力的技术支撑。与传统的金属和玻璃材料相比, SiC 材料具有适中的密度、较高的比刚度和热导率以及良好的光学加工性能,是较为优良的光学材料,开展基于 SiC 材料的反射镜拼接可作为未来大口径望远镜发展的一个新选择、新突破。

(3)在子镜支撑结构设计时,不仅要满足设计指标要求,更要注意模块化和参数化设计,简化支撑结构的设计流程,增强支撑结构的可拓展性,缩短设计研发周期。此外, Warming Harness 技术可校正镜面低阶面形误差,降低子镜设计、制造要求,大幅缩短拼接镜面的制造周期,在未来大口径光学拼接望远镜主镜的设计中具有重要的应用价值。

(4)现有共相检测技术大多无法同时满足高精度、大量程、实时性等检测需求,且随着拼接子镜数量的增加,主镜系统实现共相的难度和复杂度进一步增大,传统的检测分析方法将面临巨大的挑战。将具有强大模式分类和数据分析能力的深度学习引入拼接共相误差的检测,开展基于深度学习的共相误差检测技术的研究,可为未来拼接镜面的共相检测和调整提供一个可借鉴的发展思路。

拼接镜面技术解决了光学望远镜口径无法突破8 m级限制的技术壁垒,为未来极大、甚大口径光学望远镜主镜的制造提供了一种重要选择,

本文的研究希望可以为我国下一代极大口径光学 红外望远镜的自主研制提供参考。

参考文献:

- [1] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 327-336.
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 327-336. (in Chinese)
- [2] KIM D, CHOI H, BRENDDEL T, *et al.*. Advances in optical engineering for future telescopes[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2021, 4(6): 210040.
- [3] 罗群. 相位差波前探测技术及其在拼接镜共相检测中的应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2012.
LUO Q. Studies on the phase diversity wavefront sensor and Co-phasing measurement for segmented mirrors[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [4] 曹海峰. 大型光学红外望远镜拼接镜面主动光学技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.
CAO H F. Research on the technologies of active optics for large aperture segmented optical/infrared telescope[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [5] 范文强, 王志臣, 陈宝刚, 等. 地基大口径拼接镜面主动控制技术综述[J]. 中国光学, 2020, 13(6): 1194-1208.
FAN W Q, WANG ZH CH, CHEN B G, *et al.*. Review of the active control technology of large aperture ground telescopes with segmented mirrors[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1194-1208. (in Chinese)
- [6] 安其昌. 三十米望远镜三镜集成检测关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
AN Q CH. Thirty meter telescope tertiary mirror alignment and metrology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [7] 蔡峥, 张超, 樊凡. 天文望远镜的历史与展望——兼论清华宽视场巡天望远镜(MUST)[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(5): 1-9,37.
CAI ZH, ZHANG CH, FAN F. History and prospect of astronomical telescopes: introducing Tsinghua multiplexed survey telescope (MUST)[J]. *Experimental Technology and Management*, 2021, 38(5): 1-9,37. (in Chinese)
- [8] 宋家宝, 李国平. 大型光学望远镜扇形子镜拼接设计及仿真分析[J]. 天文研究与技术, 2010, 7(4): 355-361.
SONG J B, LI G P. Design and simulation of splicing of sector-shaped segments of a large optical telescope[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2010, 7(4): 355-361. (in Chinese)
- [9] 雷存栋. 大口径合成孔径望远镜拼接误差分析与控制技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2016.
LEI C D. Research on stitching errors analysis and control technology for large synthetic aperture telescope[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [10] KENDRICK S E. Monolithic versus segmented primary mirror concepts for space telescopes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7426: 74260O.
- [11] 李斌. 拼接镜共相检测技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2017.
LI B. The co-phasing detection of segmented mirror[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [12] Mirrors Webb_NASA[EB/OL]. <https://jwst.nasa.gov/content/observatory/ote/mirrors/index.html>.
- [13] EGRON S, SOUMMER R, LAJOIE C P, *et al.*. James Webb Space Telescope optical simulation testbed IV: linear control alignment of the primary segmented mirror[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10398: 1039811.
- [14] 邵亮, 杨飞, 王富国, 等. 1.2 m轻量化SiC主镜支撑系统优化设计[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 229-234.
SHAO L, YANG F, WANG F G, *et al.*. Design and optimization of supporting system for 1.2 m lightweight SiC primary mirror[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 229-234. (in Chinese)
- [15] 赵宇, 苏成志, 赵贵军, 等. $\Phi 500$ mm超轻量化SiC反射镜结构优化设计[J]. 中国光学, 2020, 13(6): 1352-1361.
ZHAO Y, SU CH ZH, ZHAO G J, *et al.*. Structural optimization for the design of an ultra-lightweight SiC mirror with a diameter of 500 mm[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1352-1361. (in Chinese)
- [16] 赵汝成, 包建勋. 大口径轻质SiC反射镜的研究与应用[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 552-558.

- ZHAO R CH, BAO J X. Investigation and application of large scale lightweight SiC mirror[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 552-558. (in Chinese)
- [17] 郭疆. 碳化硅大口径空间反射镜设计与制造研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
GUO J. Research on design and manufacturing of large aperture space mirror of silicon carbide[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [18] 魏祥通. TMT 三镜 Whiffletree 底支撑系统设计与测试方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
WEI X T. Design and test method study of TMT tertiary mirror whiffletree axial support system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, China, 2017. (in Chinese)
- [19] GUO P, ZHANG J, YANG F, *et al.*. Geometric layout optimization of a large aperture thin elliptical mirror's axial and lateral support[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(10): 2861-2869.
- [20] 宋永锋. 12 米红外光学望远镜子镜轴向及侧向支撑技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
SONG Y F. Research on techniques of axial and lateral supporting of 12-meter large optical-infrared telescope (LOT) segments[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [21] YANG F, ZHANG X J, ZHAO H CH, *et al.*. Relay optical function and pre-construction results of a Giant Steerable Science Mirror for a thirty meter telescope[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 13991-14008.
- [22] BAFFES C, MAST T, NELSON J, *et al.*. Primary mirror segmentation studies for the thirty meter telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7018: 70180S.
- [23] WILLIAMS E C, BAFFES C, MAST T, *et al.*. Advancement of the segment support system for the thirty meter telescope primary mirror[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7018: 701810.
- [24] 张龙, 王孝坤, 程强, 等. 拼接式望远镜主镜衍射效应研究[J]. *应用光学*, 2020, 41(3): 447-454.
ZHANG L, WANG X K, CHENG Q, *et al.*. Research on diffraction effect of primary mirror in segmented telescope[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(3): 447-454. (in Chinese)
- [25] 廖周. 大口径分块望远镜主镜的误差分析与共相探测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
LIAO ZH. Error analysis of segmented primary mirror and research on co-phasing measurement[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [26] WANG Y R, JIANG F Y, JU G H, *et al.*. Deep learning wavefront sensing for fine phasing of segmented mirrors[J]. *Optics Express*, 2021, 29(16): 25960-25978.
- [27] QIN SH, CHAN W K. A tip-tilt and piston detection approach for segmented telescopes[J]. *Photonics*, 2020, 8(1): 3.
- [28] 林旭东, 陈涛, 王建立, 等. 拼接镜主动光学共焦实验[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 563-569.
LIN X D, CHEN T, WANG J L, *et al.*. Co-focus experiment of segmented-mirror active optics[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 563-569. (in Chinese)
- [29] ZHAO W R, ZHANG L, ZHAO Y J, *et al.*. High-accuracy piston error measurement with a large capture range based on coherent diffraction[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11056: 110563B.
- [30] SHEN SH D, CUI X Q, ZHANG Y. Simulation and analysis of co-phasing errors of the segmented primary mirror tiled by hexagonal segments in LOT[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2021, 21(10): 245.
- [31] JIANG J L, ZHAO W R. Phasing piston error in segmented telescopes[J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19123-19137.
- [32] YANG L L, YANG D, YANG ZH M, *et al.*. Co-phase state detection for segmented mirrors by dual-wavelength optical vortex phase-shifting interferometry[J]. *Optics Express*, 2022, 30(9): 14088-14102.
- [33] WANG P F, ZHAO H, XIE X P, *et al.*. Multichannel left-subtract-right feature vector piston error detection method based on a convolutional neural network[J]. *Optics Express*, 2021, 29(14): 21320-21335.
- [34] JIN K H, MCCANN M T, FROUSTEY E, *et al.*. Deep convolutional neural network for inverse problems in imaging[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, 26(9): 4509-4522.
- [35] RUSSAKOVSKY O, DENG J, SU H, *et al.*. ImageNet large scale visual recognition challenge[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2015, 115(3): 211-252.
- [36] MA X F, XIE Z L, MA H T, *et al.*. Piston sensing of sparse aperture systems with a single broadband image via deep learning[J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 16058-16070.
- [37] LI D Q, XU SH Y, WANG D, *et al.*. Large-scale piston error detection technology for segmented optical mirrors via convolutional neural networks[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(5): 1170-1173.

- [38] CAO H F, ZHANG J X, YANG F, *et al.* Extending capture range for piston error in segmented primary mirror telescopes based on wavelet support vector machine with improved particle swarm optimization[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 111585-111597.

作者简介:



霍银龙(1997—),男,河北石家庄人,博士研究生,2019年6月于华北理工大学获得学士学位,2019年至今,就读于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,主要从事大口径光学望远镜拼接镜面关键技术方面的研究。

E-mail: huoylmail@163.com



杨飞(1982—),男,湖北天门人,博士,研究员,博士生导师,2003年于哈尔滨工业大学获得工学学士学位,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,2017年于长春理工大学获得工学博士学位,主要从事大口径光学工程技术的光机系统研究。E-mail: yangflying@163.com



王富国(1979—),男,山东单县人,博士,研究员,2003年于山东科技大学获得工学学士学位,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得工学博士学位,主要研究方向为大型望远镜光机系统设计与仿真。

E-mail: wfg109@163.com