**文章编号:** 1672-8785(2022)06-0001-11

# 空间红外望远镜无热化支撑 结构形式综述

李文雄<sup>1,2,3</sup> 申军立<sup>1,3</sup> 吴清文<sup>1,3</sup> 母德强<sup>4</sup> (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; 3.中国科学院空间光学系统在轨制造与集成重点实验室,吉林长春 130033; 4.长春工业大学机电工程学院,吉林长春 130012)

摘 要:空间红外望远镜的成像质量依赖着低温深冷的环境。在这种环境下, 对反射镜的结构及其支撑结构都提出了严格的要求。介绍了当前国内外望远镜的被动支撑结构(如 bipod、hexapod 和 whif fle-tree 结构),然后对国内外望远镜的主动支撑结构形式和促动器的原理进行了分析说明。通过对国内外望远镜主、被动支撑结构的分析,对二者进行了对比,并指出了它们的优缺点以及各自适用的领域。提出了两种实现无热化支撑结构的方法:对于拼接式望远镜,采用 whif fle-tree 结构和促动器的组合支撑形式;对于单块式望远镜,采用 whif fle-tree 结构和 A frame 结构并搭配促动器的支撑形式。

关键词:空间红外望远镜;主动支撑;被动支撑;无热化结构;促动器

中图分类号: TH743 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.06.001

## Overview of Athermalized Supporting Structures for Space Infrared Telescopes

LI Wen-xiong<sup>1,2,3</sup>, SHEN Jun-Ii<sup>1,3</sup>, WU Qing-wen<sup>1,3</sup>, MU De-qiang<sup>4</sup>

(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;
3. CAS Key Laboratory of On-orbit Manufacturing and Integration for Space Optics System, Changchun 130033, China; 4. School of

Opries System, Changehan 150055, China, 4. School of

 $Mechatronic\ Engineering\ ,\ Changchun\ University\ of$ 

Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: The imaging quality of space infrared telescope depends on the cryogenic environment. In this environment, strict requirements are placed on the structure of the mirror and its supporting structure. The current passive supporting structures of telescopes at home and abroad (such as bipod, hexapod and whif-

**收稿日期**: 2022-03-09

作者简介: 李文雄(1998-),男,河北沧州人,硕士研究生,主要从事空间红外相机无热化结构设计方面的研究。 E-mail:1069406860@qq.com

http://journal.sitp.ac.cn/hw

fle-tree structures) are introduced, and then the active supporting structure forms of domestic and foreign telescopes and the principle of actuators are analyzed and explained. Through the analysis of the active and passive supporting structures of domestic and foreign telescopes, the two are compared, and their advantages, disadvantages and applicable fields are pointed out. Two methods for realizing athermalized supporting structure are proposed. For the segmented telescope, the combined supporting form of whiffle-tree structure and actuator is used. For the monolithic telescope, the combined supporting form of whiffle-tree structure, A-frame structure and actuator is used.

Key words: space infrared telescope; active support; passive support; athermalized structure; actuator

## 0 引言

随着科学的发展,深空探测对于人们揭示 宇宙演化有着推动性的作用,比如盖亚和赫歇 尔望远镜都担负着探索银河系的任务<sup>[1]</sup>。对用 于深空探测的红外望远镜来说,如果自身温度 高于深空辐射源的温度,那么信号就会被噪声 覆盖。所以为了实现望远镜的高分辨率和高灵 敏度,需要将整个望远镜和焦平面组件冷却到 低温状态,以消除望远镜自身的红外辐射和太 阳辐射产生的噪音,从而提高望远镜探测器的 信噪比。

三十多年来,从最初的24m口径的哈勃 望远镜发展到2021年底发射的6.5m口径的 詹姆斯•韦布望远镜<sup>[2]</sup>。空间红外望远镜的口 径越来越大,但随着深空探测技术的逐步推 进,空间红外望远镜面临着新的问题:如何设 计镜子自身结构及其支撑结构以满足深空探测 的成像要求。

针对上述支撑结构问题,首要的解决办法 是对支撑结构进行无热化设计。这样不仅可以 避免主动热控产生的背景噪声,而且还能满足 镜子本身的支撑需求。因此,本文通过介绍几 种红外望远镜来对其采用的无热化支撑结构进 行论述和归纳,并对未来空间红外望远镜的无 热化支撑结构形式进行讨论。

## 1 无热化支撑结构的设计要求

首先,由于深空探测望远镜的工作温度要 求,为了实现稳定成像,支撑结构需要采用无 热化设计,即通过镜子的支撑结构补偿因温度 变化而引起的光学系统的变化,使得光学系统 能在比较宽的温度范围内稳定成像。

其次,任何镜子的支撑结构都需要遵循以 下原则<sup>[3]</sup>:(1)镜子有*x、y、z*三个方向的移 动和转动(共6个自由度),支撑结构要完全约 束这六个自由度;(2)镜子在任何状态下的受 力要平衡,满足力及力矩约束方程;(3)镜子 的支撑结构的理想状态——无内应力支撑; (4)镜子支撑结构在加工、检测、使用三种状 态下,要尽可能保持一致。

支撑结构主要分为主动支撑和被动支撑两 种。在对镜子进行无热化结构设计时,首先要 以主、被动支撑结构为基础。所以先详细讨论 主、被动支撑技术。

## 2 主、被动支撑技术

#### 2.1 主动支撑

Wilson R N 等人<sup>[4-7]</sup>在 1987 年研发了反射 镜主动支撑技术。1988 年,它首次应用在欧 洲南方天文台 3 5 m 新技术望远镜(New Technology Telescope,NTT)上,也称作主动光学 技术,即主动校正低频像差的光学技术。带有 主动支撑的光学系统也被称为主动光学系统 (原理见图 1)<sup>[8]</sup>。

反射镜主动光学技术在工程中的具体实施 是将主镜2和次镜1的成像质量和面形误差作 为校正依据,通过波前探测器5实时监控反射 镜的面形。若面形不满足成像要求,波前探测 器5就会收集面形数据并将其发送给计算机4。 计算机4计算控制力,并对控制器发出指令, 控制力促动器3做出力反馈动作。力促动器3 会实时地根据反射镜面形误差进行调整补偿。 上述过程迭代,力促动器校正误差与反射镜镜

INFRARED (MONTHLY)/VOL.43, NO.6, JUN 2022

2



图 2 工作原理流程图

面变形误差相抵消时,即完成反射镜的校正工 作(流程见图 2)。在空间望远镜应用中,哈勃 望远镜的背部采用 24 点促动器,旨在实现在 轨后的面形实时控制,但实际中这一机构并未 使用。

主动支撑的核心元件是促动器<sup>[9-11]</sup>。如图 3 所示,电机输出驱动力,丝杠将电机输入的 转动转换成直线位移。通过力输出端对反射镜 进行调整。



### 2.2 被动支撑

红外

被动支撑技术是指在预先考虑反射镜的使 用环境下,所设计的满足定位要求的反射镜支 撑结构被动地承受来自重力、热、振动等外载 荷的作用。在支撑结构的可控范围内,面形不 会发生严重的改变<sup>[12-13]</sup>。被动支撑一般通过以 下两方面来进行优化和改进:(1)支撑结构形 式(提高镜体的刚度);(2)最佳的支撑点位 置<sup>[14]</sup>。对于支撑点位置,Nelson J E 等人<sup>[15]</sup>已 经给出了各种简单形状的反射镜的最佳支撑点 数及其位置。

## 3 主动支撑在望远镜中的应用

表1列出了国内外大口径空间望远镜的相 关数据。可以看到,采用主动支撑形式的空间 望远镜比较少。因此,下面着重分析和讨论地 面望远镜所用的主动支撑形式,为后续空间红 外望远镜采用主动支撑的无热化结构设计提供 依据。

### 3.1 南方天文物理研究望远镜

南方天文物理研究望远镜(Southern Astrophysical Research Telescope, SOAR)是北卡 罗莱纳大学教堂山分校、密歇根州立大学和美 国国家光学天文台的合作项目,于1976年正 式投入使用。它位于智利托洛洛山美洲际天文 台,其主镜是口径为4.3 m的弯月形单镜<sup>[16]</sup>。 采用的支撑方式是将力促动器作为主镜的支 撑,主镜的位置和面形都由力促动器实现。 SOAR采用轴向120点支撑、径向6点支撑, 轴向布置形式如图4所示<sup>[17]</sup>。

如图 5 所示, SOAR 所用电动机械式促动 器主要由反射镜垫、测力反馈单元、丝杠/预紧

http://journal.sitp.ac.cn/hw



螺母组件、谐波驱动结构以及电动机组成。当 检测到面形误差时,计算机控制电动机和谐波 驱动结构通过耦合的丝杠/预紧螺母组件产生轴 向推力。轴向推力间接作用到反射镜上,完成 校正任务。螺母预先加紧的目的是防止与丝杠/ 螺母组合产生迟滞效应。测力反馈单元不断地 检测力促动器施加力,并实时将其反馈给计算 机作出最佳优化<sup>[18]</sup>。单轴柔性节的作用是提高 轴向刚度并实现对其余自由度的解耦。

### 3.2 多镜面望远镜

多镜面望远镜(Multiple Mirror Telescope, MMT)是在 1979 年美国亚利桑那州的霍普金 斯天文台建成的第一台多镜面望远镜,其等效 口径为 6.5 m。通过 Stewart 六杆机构定位和 力促动器的组合方式来完成支撑,主要实现了 在承受重力、风和热载荷的作用下稳定支撑反 射镜并保持光学元件对准的目标<sup>[19]</sup>。图 6 为 Stewart 六杆机构定位结构的示意图。该机构 由 6 个可调的刚性杆组成。刚性杆带有与主镜 和传感器相连的枢轴附件以及用于测量刚性杆 受力的测力传感器。这六个力的读数用作外部 控制回路的反馈。外部控制回路调整促动器, 使 6 个刚性杆受力始终为零。此支撑方式实现 了主镜定位和面型控制的解耦。但是由于六杆 机构主要是约束反射镜与镜室的相对运动,不 承受任何重力载荷,所以要求促动器同时起支 撑和调整的作用<sup>[20]</sup>。

MMT 底部有 256 个支撑点,通过负载扩 张器在 256 个支撑点(见图 7)中布置了 50 个轴 向促动器、50 个双轴促动器和 4 个侧向促动 器,如图 8 所示。双轴促动器包括两个带有压 力调节器的气动气缸:一个是用于反馈的测力 元件;另一个用于消除横向力和力矩。双轴促 动器在反射镜面的背板附近施加侧向力,产生 的合力矩和镜面偏转被轴向修正力抵消<sup>[20-21]</sup>。



INFRARED (MONTHLY)/VOL.43, NO.6, JUN 2022

表1国内外大口径望远镜汇总								
	望远镜	研制单位	反射镜 尺寸	主镜形式	反射镜 材料	支撑形式	促动器工 作方式	工作地点
1	VLT	欧洲南方 天文台	8, 2 m	弯月镜	轻量化 Zerodur	轴向 150 点支撑 侧向 64 点支撑	液压 +机械	智利帕瑞纳 天文台
2	GEMIN	AURA 联盟	8 m	弯月型 单镜体	ULE	轴向 120 点支撑 侧向 72 点支撑	气动 +液压	夏威夷主岛 智利
3	SOAR	UNC、MSU NOAO	`4.3 m	弯月型 单镜体	ULE	轴向 120 点支撑 侧向 6 点支撑	电动 机械	托洛洛山山顶
4	Subaru	日本国家 天文台	8 m	弯月型 单镜体	零膨胀玻 璃 ULE	_	—	夏威夷毛纳 基山顶
5	ATST	美国	4, 24 m	离轴抛 物面实 心弯月镜	康宁 ULE	轴向 120 点支撑 侧向 24 点支撑	—	夏威夷毛伊岛
6	LSST	美国	8,4 m	蜂窝三 明治型	硼硅 玻璃	104 双轴、52 单轴	气动	智利
7	MMT	SOML	6,5 m	蜂窝三 明治型	硼硅酸 盐玻璃	轴向 256 点支撑	气动	美国亚利桑 那州图森市 霍普金斯山
8	LBT	美国	8 4 m	蜂窝三 明治型 单镜体	硼硅 玻璃	108 双轴、52 单轴	气动	亚利桑那州 格雷厄姆山
9	JWST	ESA	6,5 m	拼接结构	铍	子镜背部7点 主动支撑	_	拉格朗日点
10	Keck I Keck II	UC Berkeley Caltech、 LBNL	10.5 m	拼接结构	Zerodur	_	液压+ 电动机械	莫纳克亚山
11	LAMOST	中国科学院 国家天文台	4 m	拼接结构	—	_	_	中国科学院天文 台兴隆观测站
12	HST	美国	2490 mm	双曲面	ULE 超低 膨胀玻璃	背部 24 点支撑	_	太空
13	AESO	美国	3,67 m	_	_	_	液压	夏威夷毛伊 岛空军基地
14	SORT	美国	4.3 m	_	ULE 硼 硅酸盐玻璃	_	_	星火光学靶场

## 3.3 詹姆斯·韦布空间望远镜

2021年12月发射至拉格朗日点的詹姆 斯•韦布空间望远镜(James Webb Space Telescope, JWST)用于接替哈勃望远镜执行深空探 测任务。它的主镜为6.5m拼接式反射镜,由 18片子镜拼接而成。由于 JWST 支撑结构是 主、被动支撑组合的无热化结构<sup>[22-23]</sup>,下面先 分析其主动支撑结构(见图9)。 JWST 子镜共有 7 个促动器,其中 6 个负 责提供镜面的刚体运动,1 个负责调整镜面的 曲率半径,固定在子镜中心位置上。二者的调 整相互独立,互不干涉,简化了对控制系统的 要求。提供刚体运动的促动器以 bipod 形式布 置在 whiffle-tree 结构上,施加的载荷通过 whiffle-tree 结构分散到子镜上<sup>[24]</sup>。

http://journal.sitp.ac.cn/hw



### 3.4 其他反射镜

国内李剑锋等人<sup>[25]</sup>设计的4m级SiC反射 镜的支撑结构采用的是液压并联力促动器的主 动支撑技术。此种方式减小了反射镜支撑对促 动器的要求。采用这种支撑形式的主要原因是 SiC刚度大,对力促动器的输出力要求高。液 压被动并联力促动器支撑形式的促动器只需负 责输出校正力,而不负责支撑镜体。镜体的支 撑由静态支撑结构来承担。

如图 10 所示,促动器结构主要包括电动 机、减速器、轴承、丝杠/螺母组件、导杆、 测力单元和弹簧等。原理如下:通过电动机带 动丝杠旋转;丝杠/螺母组件将转动转换为直 线位移,然后弹簧将直线位移转变为作用力, 即力促动器的施加力;测力单元实时控制着促 动器,作为闭环控制的反馈环节。



4 被动支撑在望远镜中的应用

4.1 宇宙和天体物理学空间红外望远镜宇宙和天体物理学空间红外望远镜(Space)

INFRARED (MONTHLY)/VOL.43, NO.6, JUN 2022

Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics, SPICA)是个日本红外天文探测项目。 作为典型的卡塞格林式望远镜, SPICA 主要用 于中远红外观测,工作波段集中在5~ 200 um<sup>[26-27]</sup>。望远镜整体采用 SiC 材料。由于 三菱 H-IIB运载火箭整流罩的尺寸限制, SPF CA从最初的35m口径改为了32m<sup>[28]</sup>。图 11 和图 12 为 SPICA 支撑结构的示意图。主镜 基板上的 3 对钛 bipod 结构用于对主镜进行支 撑。在主镜的外围进行了局部的切割,以便给 副镜的 SiC 支撑结构留出空间<sup>[29]</sup>。副镜支撑结 构由4根SiC支柱组成,两端连接着副镜遮光 罩和主镜底部的基板,其中与主镜基板的连接 部分采用了与 SiC 线胀系数相近的殷钢连接 件。副镜通过殷钢 bipod 结构固定在副镜遮光 罩上。副镜的背部结构可以通过由3个横向柔 性片和3个促动器组成的调整机构进行 调整[30]。



### 4.2 赫歇尔 3.5 m 空间天文台

由欧空局建造的赫歇尔望远镜是一种卡塞 格林式望远镜,于 2009 年发射至拉格朗日点, 主要担任红外探测任务。它的工作波段集中在 80~670 μm<sup>[31-32]</sup>。如图 13 所示,该望远镜包 含主镜、副镜、hexapod 结构和钛 bipod 结构 等<sup>[33]</sup>。主镜采用钛 bipod 结构进行支撑。副镜 通过 hexapod 结构(见图 14)进行支撑并保持副 镜与主镜相对位置的稳定性。hexapod 结构由 对副镜进行调整和支撑的遮光罩以及 3 对长 1.58 m的 U型 SiC 支架组成。主副镜通过在 主镜上均布的 3 个接口(见图 15)进行连接。接 口上侧通过图 17 所示结构连接 hexapod 结构, 接口下侧连接钛 bipod 结构(见图 16)。二者与 主镜接口的连接均采用了殷钢件<sup>[33-34]</sup>。



图 13 赫歇尔望远镜的支撑结构



图 14 Hexapod 结构

### 4.3 詹姆斯•韦布空间望远镜

除了卡塞格林式望远镜常用的 bipod 结构 作反射镜支撑之外,whiffle-tree 结构也是目前 国内外比较常用的反射镜支撑结构,广泛应用



红 外

图 15 主镜接口



图 16 接口下端连接结构



图 17 接口上端连接结构

于口径为1~2 m的反射镜<sup>[35-38]</sup>。

由于已经介绍了 JWST 的主动支撑,下面 主要介绍其被动支撑。图 18 所示为 JWST 子 镜支撑结构。子镜背部采用了 whiffle-tree 结构 (见图 19)。该结构基于三点定位原理,通过 三个点完成轴向定位和支撑。JWST 子镜利用 三角平面将 3 点支撑扩展为 9 点支撑,此种 whiffle-tree 结构也可以叫做 Grubb 结构<sup>[39]</sup>。 三角支撑平面将子镜均匀分为三部分,其中每 部分由 3 个点实现支撑作用。此种结构原理简 单、结构紧凑,可靠性高。

http://journal.sitp.ac.cn/hw



8

图 18 JWST 子镜支撑结构



图 19 JWST 子镜被动支撑结构的原理图

### 4.4 其他被动支撑形式

国内邵亮<sup>[40]</sup>、王富国<sup>[41]</sup>等人设计了 1.2 m、2 m级 SiC 主镜的支撑方案,采用了轴向 18 点 Whiffle-tree 结构和侧向 A-frame 结构。 以上两种支撑的组合满足主镜的静定机构原 理,Whiffle-tree 轴向支撑结构限制了反射镜的 *R*<sub>x</sub>、*R*<sub>y</sub>和*U*<sub>z</sub>,侧向 A-frame 结构限制了反射 镜的*U*<sub>x</sub>、*U*<sub>y</sub>和*R*<sub>z</sub>。为了实现底支撑和侧向支 撑的结构热解耦,两个支撑结构都具有一定的 柔性。

图 20 为 Whiffle-tree 支撑原理图。3 个硬 点通过杠杆机构连接的 3 个球铰,球铰连接着 3 个柔性细压杆,组成了 18 点支撑结构。 Whiffle-tree 结构与柔性杆(见图 21)的组合使 支撑结构紧凑且具有一定的抵消热应力的 功能。

图 22 和图 23 分别为 A-frame 支撑结构的 原理图和结构图。该结构采用 6 个方向的切向 杆完成侧向支撑: A-frame 的三角变形和切向杆



图 20 底部支撑原理图



图 21 底部支撑结构图



图 22 侧支撑原理图



图 23 侧支撑结构图 伸缩与反射镜和镜室之间的变形相抵消,由二 者的伸缩变形变为二者之间的微小轴向转动。

INFRARED (MONTHLY)/VOL.43, NO.6, JUN 2022

### 5 主、被动支撑技术对比

被动支撑技术广泛应用于空间和地面望远 镜的镜面支撑,形如 bipod、hexapod、whiffletree、A-frame 等结构,其优点在于结构形式 简单紧凑、原理简单。在满足设计要求的工况 下,支撑比较稳定。不足之处在于,如果反射 镜产生变形,那么被动支撑就无法对反射镜作 出调整以补偿面形误差。

主动支撑技术的核心在于控制促动器对反 射镜进行实时调整,使其始终保持高质量成 像。缺点在于主动光学技术结构相对复杂,需 要传感器、计算机、控制系统、促动器等多方 面配合才能完成调整;一旦某个环节出现故 障,则整个系统就会受到影响。受以上因素的 限制,主动支撑在空间中的应用并不多。一旦 中间环节出现故障,对于空间望远镜来说,维 修困难并且成本高。

### 6 空间红外望远镜无热化结构设计讨论

前面介绍了主、被动支撑技术在望远镜 上的应用实例并对二者进行了对比。通过被 动支撑实现的无热化结构依旧是未来深空探 测红外望远镜应用的主流方式,主要原因在 于主动光学技术自身产生的背景噪声会对望 远镜成像产生影响。JWST 首次采用了主、 被动支撑组合的无热化结构,其主动光学技 术在首次调整对准后,每14 天会进行一次调 整维护。

因此通过前文的叙述,对拼接式反射镜 和单块式反射镜提出了相应的无热化支撑方 法。对于拼接式空间望远镜,采用 Whiffletree 和促动器的组合支撑结构。促动器主要 在固定的周期内进行调整和校准工作。在望 远镜成像时,促动器停止校准工作,避免所 产生的噪声对望远镜成像造成影响。对于单 块式望远镜,采用 Whiffle-tree 和 A-frame 的 组合支撑结构,并在轴向搭配促动器进行支 撑。通过上述介绍,Whiffle-tree 结构实现了 底部的稳定支撑,且在使用柔性结构的情况 下,能实现与侧面支撑的热解耦。在侧面的 支撑中,A-frame 结构的使用对于消除热应 力的变形有着相当好的表现。它主要是将镜 面的位移转换成绕轴向的微小转动。除此之 外,根据实际的应用需求,合理地采用主动 光学技术进行周期性的校准工作。

由于主动光学技术在望远镜无热化结构 中的应用并不多,实际效果还有待商榷,所 以期待着 JWST 无热化结构的表现。

### 7 结束语

在国内外空间望远镜中,采用被动支撑形 式的无热化支撑结构依然是主流。通过主动支 撑形式进行无热化支撑的空间望远镜还处于探 索阶段。主要有两方面的原因:一是支撑结构 和控制系统复杂,失效危险性大;二是自身会 产生辐射噪声,影响对目标的探测。

主动支撑主要应用于地面望远镜,如 SOAR、MMT等。而空间红外望远镜(如 SPF-CA 和赫歇尔望远镜等)则主要采用被动支撑形 式的无热化结构。其中,SPICA、赫歇尔望远 镜的主镜支撑采用了3对 bipod 结构。该结构 能很好地卸载应力和消除热载荷,减小对反射 镜面形的影响。JWST采用被动支撑和主动支 撑相结合的结构形式来实现主镜的无热化支 撑相结合的结构形式来实现主镜的无热化支 撑和结合的结构形式来实现主镜的无热化支 撑和结合的结构形式来实现主镜的无热化支 撑和结合的结构形式来实现主镜的无热化支 撑和结合的结构形式来实现主镜的无热化支 撑和结合的结构形式来实现主镜的无热化支

目前深空探测用空间红外望远镜的无热化 支撑结构设计对于空间探测领域来说具有很重 要的意义,同时也会极大地带动相关领域技术 的发展。

#### 参考文献

- [1] Bougoin M, Burge J H, FaHnle O W, et al. From Herschel to Gaia: 3-meter Class SiC Space Optics [C]. SPIE, 2011, 8126: 81260V.
- [2] Feinberg L D, Oschmann J M, Graauw M D, et al. Applying HST Lessons Learned to JWST

http://journal.sitp.ac.cn/hw

[C]. SPIE, 2008, 7010: 70100N.

- [3] 程景全. 天文望远镜原理和设计 [M]. 北京:中国科学技术出版社, 2003.
- [4] Wilson R N, Franza F, Noethe L. Active Optics
  I: A System for Optimizing the Optical Quality and Reducing the Costs of Large Telescopes [J]. *Journal of Modern Optics*, 1987, 34(4): 485– 509.
- [5] Noethe L, Franza F, Giordano P, et al. Active Optics II: Results of an Experiment with a Thin 1 m Test Mirror [J]. Journal of Modern Optics, 1988, 35(9): 1427–1457.
- [6] Wilson R N, Franza F, Giordano P, et al. Active Optics III: Final Results with the 1 m Test Mirror and NTT 3.58 m Primary in the Workshop [J]. Journal of Modern Optics, 1989, 36 (11): 1415-1425.
- [7] Wilson R N, Franza F, Noethe L, et al. Active Optics IV: Set-up and Performance of the Optics of the ESO New Technology Telescope (NTT) in the Observatory [J]. *Journal of Modern Optics*, 1991, 38(2): 219–243.
- [8] 范磊. 2 m级地基望远镜 SiC 主镜轻量化设计及 支撑技术研究 [D]. 北京:中国科学院大学, 2013.
- [9] Minor R H, Arthur A A, Gabor G, et al. Position Actuators for the Primary Mirror of the W. M. Keck Telescope [C]. SPIE, 1990, 1236: 1009-1017.
- [10] Jiménez A, Morante E, Viera T, et al. Design of a Prototype Position Actuator for the Primary Mirror Segments of the European Extremely Large Telescope [C]. SPIE, 2010, 7733: 773354.
- [11] Lorell K R, Aubrun J N. Design of a Prototype Primary Mirror Segment Positioning Actuator for the Thirty Meter Telescope [C]. SPIE, 2006, 6767: 62672T.
- [12] 王富国,杨飞,张景旭.TMT 三镜被动支撑系 统的概念设计 [J]. 红外与激光工程,2013,42 (5):1269-1274.
- [13] Wang K J, Dong J H, Zhao Y, et al. Research on High Performance Support Technology of Spacebased Large Aperture Mirror [J]. Optik, 2021,

**226**(1): 1–17.

- [14] 吴清文,杨洪波,杨近松,等. 空间相机中主镜 及其支撑方案设计与分析方法 [J]. 光学技术, 2004, **30**(2): 153-156.
- [15] Nelson J E, Lubliner J, Mast T S. Telescope Mirror Supports: Plate Deflections on Point Supports [C]. SPIE, 1982, 0332: 211–228.
- [16] Stein J T, Neufeld C. A Fast Steering Tertiary Mirror for the SOAR Telescope [C]. SPIE, 2004, 5495: 340–347.
- [17] Neufeld C, Bennett V, Sarnik A, et al. Development of an Active Optical System for the SOAR Telescope [C]. SPIE, 2004, 5489: 1052–1060.
- [18] Neufeld Conrad, Zolcinski-Couet Marie C, Keane Michael, et al. The Active Primary Mirror Assembly for the SOAR Telescope [C]. SPIE, 2004, 5489: 870-880.
- [19] Martin H M, Callahan S P, Cuerden B, et al. Active Supports and Force Optimization for the MMT Primary Mirror [C]. SPIE, 1998, 3352: 412-423.
- [20] West S C, Callahan S, Chaffee F H, et al. Toward First Light for the 6.5 m MMT Telescope
   [C]. SPIE, 1997, 2871: 38-48.
- [21] Antebi J, Dusenberry D O, Liepins A A. Conversion of the MMT to a 6.5m Telescope : The Optics Support Structure [C]. SPIE, 1998, 1303: 148–161.
- [22] Wells C, Mallette M, Fischer D, et al. Primary Mirror Segment Assembly Integration and Alignment for the James Webb Space Telescope [C]. SPIE, 2010, 7793: 779309.
- [23] Atkinson C, Texter S, Keski-Kuha R, et al. Status of the JWST Optical Telescope Element [C]. SPIE, 2012, 8442: 84422E.
- [24] Nella J, Atcheson P D, Atkinson C B, et al. James Webb Space Telescope Observatory Architecture and Performance [C]. SPIE, 2004, 5487: 576-587.
- [25] 李剑锋,吴小霞,邵亮.大口径 SiC 主镜主动支 撑研究及促动器设计 [J]. 红外与激光工程, 2016,45(7):179-183.
- [26] Nakagawa T. SPICA: Space Infrared Telescope

Infrared (monthly)/Vol.43, No.6, Jun 2022

for Cosmology and Astrophysics [J]. Advances in Space Research, 2004, **34**(3): 645–650.

- [27] Kaneda H, Nakagawa T, Onaka T, et al. Development of Lightweight SiC Mirrors for the Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics Mission [C]. SPIE, 2007, 6666; 666607.
- [28] Castel D, Sein E, Lopez S, et al. The 3.2 m All SiC Telescope for SPICA [C]. SPIE, 2012, 8450: 84502P.
- [29] Rando N, Brunner O, Doyle D, et al. Assessment Study of the SPICA Telescope Assembly [C]. SPIE, 2009, 7436: 743605.
- [30] Toulemont Y, Breysse J, Pierot D, et al. The 3.5m All SiC Telescope for SPICA [C]. SPIE, 2004, 5487: 1001–1012.
- [31] Fransen S, Doyle D, Catanzaro B, et al. Opto-Mechanical Modeling of the Herschel Space Telescope at ESA/ESTEC [C]. SPIE, 2011, 8336: 833604.
- [32] Doyle D, Pilbratt G, Tauber J. The Herschel and Planck Space Telescopes [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(8): 1403–1411.
- [33] Toulemont Y, Passvogel T, Pilbratt G L, et al. The 3.5 m All SiC Telescope for HERSCHEL
  [C]. SPIE, 2004, 5487, 1119–1128.

[34] Sein E, Toulemont Y, Breysse J, et al. A New Generation of Large SIC Telescopes for Space Applications [C]. SPIE, 2004, 5528: 83–95.

红外

- [35] 陈永聪, 胡永明, 李英才, 等. 背部支撑主反射 镜的面形分析与支撑点优化 [J]. 光子学报, 2007, **36**(9): 1730-1733.
- [36] 傅家,张景旭,王富国,等. Whiffletree 结构在 主镜侧支撑中的应用研究 [J]. 红外技术, 2012,34(4):209-212.
- [37] Lightsey P A, Atkinson C, Clampin M, et al. James Webb Space Telescope : Large Deployable Cryogenic Telescope in Space [J]. Optical Engineering, 2012, 51(1): 011003.
- [38] Geyl R, Cayrel M, Tarreau M. Gran Telescopio Canarias Optics Manufacture: Progress Report No. 3 [C]. SPIE, 2004, 5494: 57–61.
- [39] 范磊,张景旭,邵亮,等.采用液压 Whiffle-tree 的大口径主镜轴向支撑 [J]. **红外与激光工程**, 2013,**42**(8):2126-2131.
- [40] 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.
- [41] 王富国, 乔兵, 张景旭. 2 m SiC 反射镜柔性被 动支撑系统 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(10): 2591-2598.