

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 whiffle-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 whiffle-tree 结构和促动器的组合支撑形式; 对于单块式望远镜, 采用 whiffle-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-li<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

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 whiffle-tree

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

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 2.4 m 口径的哈勃望远镜发展到 2021 年底发射的 6.5 m 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

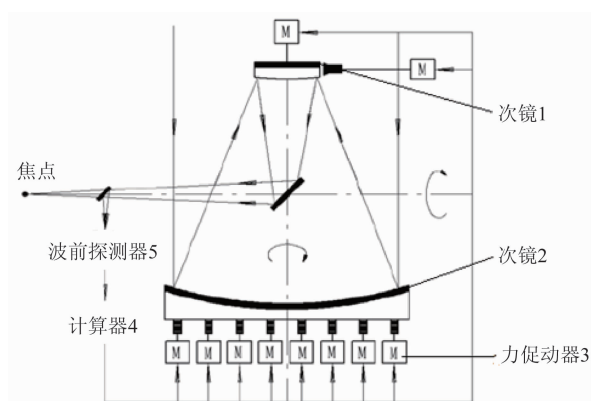


图 1 主动支撑原理图

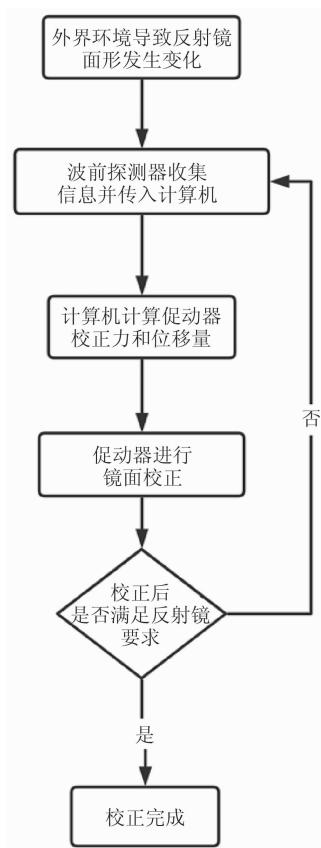


图 2 工作原理流程图

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。

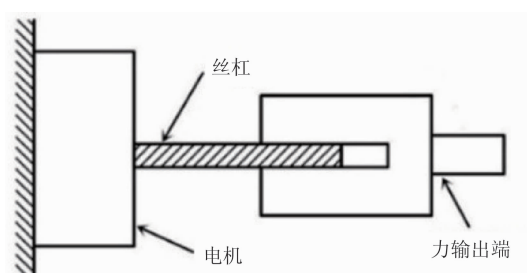


图 3 促动器的原理简图

## 2.2 被动支撑

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

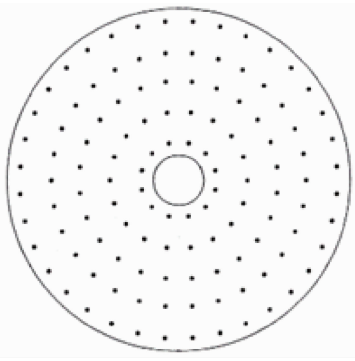


图 4 轴向支撑点布置

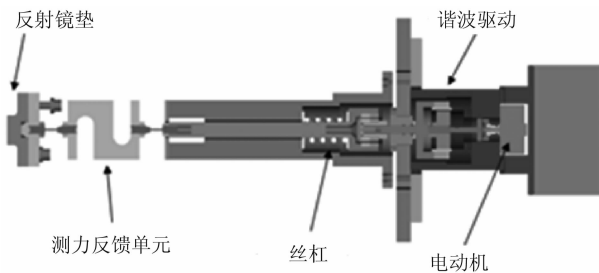


图 5 SOAR 主镜促动器

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>。

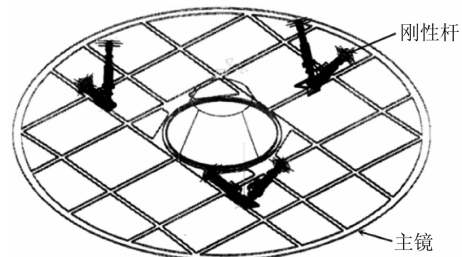


图 6 Stewart 六杆机构定位结构

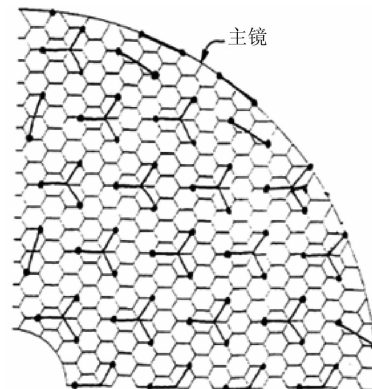


图 7 轴向支撑点布置

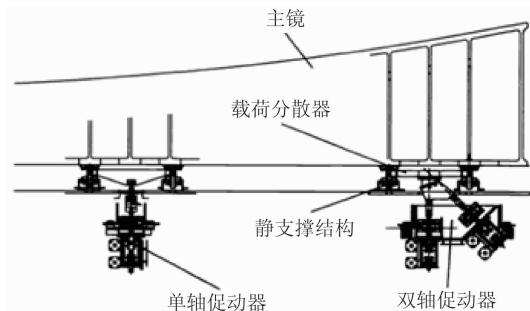


图 8 促动器布置形式



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	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	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 6.5 m 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>。

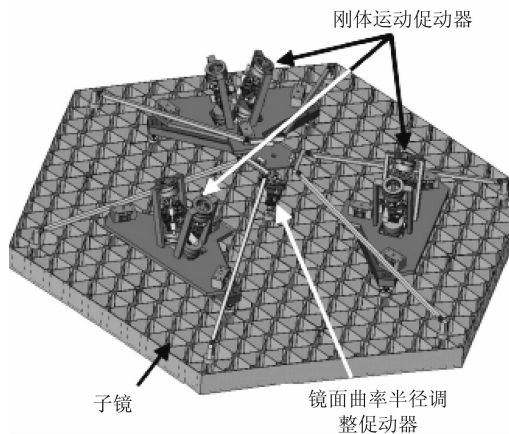


图9 JWST子镜的主动支撑结构

### 3.4 其他反射镜

国内李剑锋等人<sup>[25]</sup>设计的4 m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。

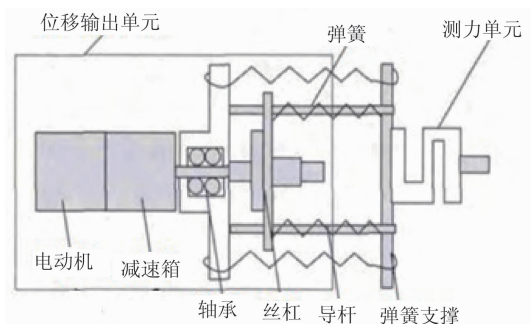


图10 促动器结构

## 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 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 $5\sim 200\ \mu\text{m}$ <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,SPICA从最初的3.5 m口径改为了3.2 m<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<sup>[30]</sup>。

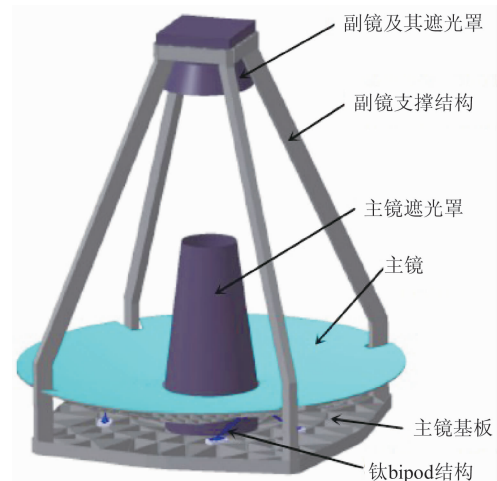


图11 SPICA支撑结构

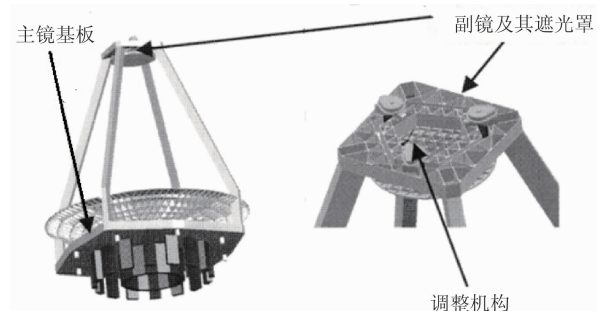


图12 SPICA支撑结构

## 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  $80\sim 670\ \mu\text{m}$  [31-32]。如图 13 所示, 该望远镜包含主镜、副镜、hexapod 结构和钛 bipod 结构等 [33]。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 [33-34]。

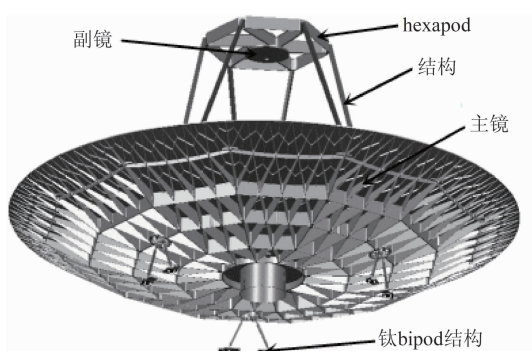


图 13 赫歇尔望远镜的支撑结构



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



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  $1\sim 2\ \text{m}$  的反射镜 [35-38]。

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 [39]。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。



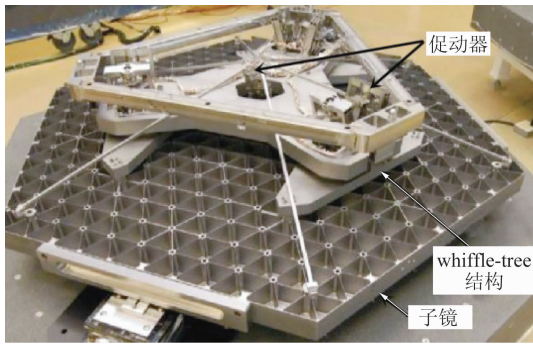


图 18 JWST 子镜支撑结构

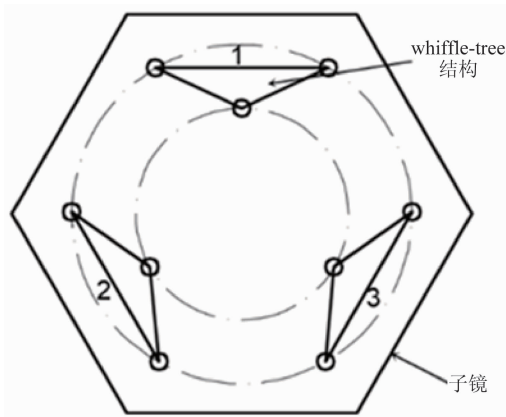


图 19 JWST 子镜被动支撑结构的原理图

#### 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  $R_x$ 、 $R_y$  和  $U_z$ ，侧向 A-frame 结构限制了反射镜的  $U_x$ 、 $U_y$  和  $R_z$ 。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

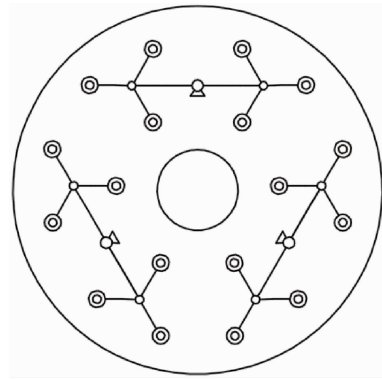


图 20 底部支撑原理图

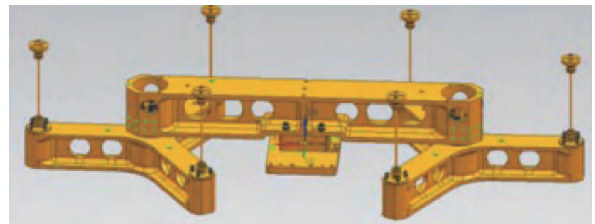


图 21 底部支撑结构图

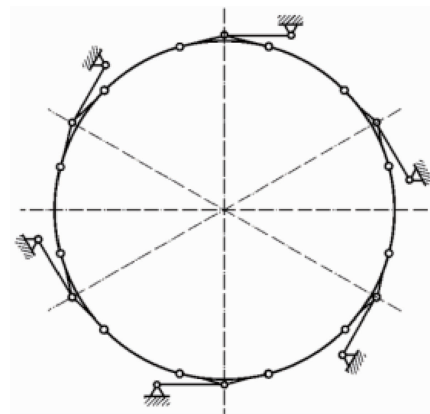


图 22 侧支撑原理图

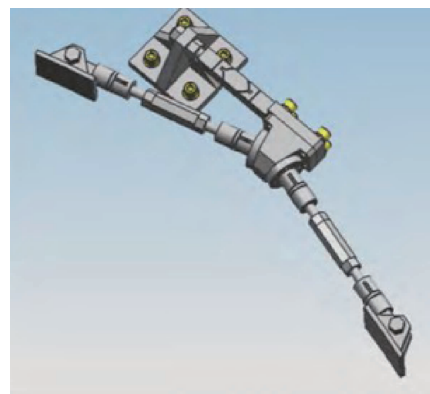


图 23 侧支撑结构图

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。



## 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、whiffle-tree、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 Whiffle-tree 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 SPICA 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, 其中主动支撑会作周期性的调整。如果 JWST 的无热化支撑结构在空间观测中展现出了良好的性能, 那么无热化主动支撑在空间红外望远镜中的应用前景将会更具潜力。

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

- [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 Space-based 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

- 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, Breyse 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, Breyse J, et al. A New Generation of Large SiC Telescopes for Space Applications [C]. *SPIE*, 2004, **5528**: 83–95.
- [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.