

天基大口径反射镜支撑技术的发展

张博文,王小勇,赵 野,杨佳文

(北京空间机电研究所,北京 100094)

摘要: 为了满足人类对地观测和宇宙探索的更高性能要求,空间望远镜反射镜口径已经从米级向十米量级迈进,呈现不断增大的趋势。大口径反射镜支撑与反射镜面形精度和稳定性直接相关,是决定空间望远镜实际观测能力乃至任务成败的关键技术之一。首先对大口径反射镜的三种主要支撑形式进行了介绍并做出适用性比较。在此基础上,从影响反射镜支撑设计的各个因素出发,讨论了反射镜支撑的设计原则。然后结合设计原则的讨论和国内外研究进展对支撑点数量和位置优化、无热化设计、无应力装配设计等大口径反射镜支撑关键技术及发展方向进行了探讨,期望对我国大型空间望远镜的研制提供借鉴,在新一轮空间探索热潮中实现跨越发展。

关键词: 空间望远镜; 反射镜; 大口径; 反射镜支撑

中图分类号: TH751.1;V474.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1113001

Progress of support technique of space-based large aperture mirror

Zhang Bowen, Wang Xiaoyong, Zhao Ye, Yang Jiawen

(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: To meet the higher demands of the earth and space observation, the aperture of space telescope mirror has took step to 10 m order of magnitude from 1 m with an ever-increasing trend. As a key technology for the space telescope, the large aperture mirror support is related directly to the surface shape accuracy and stability of the mirror, and crucial to the actual observation ability and even the success of the telescope mission. Three main forms of mirror support were discussed and their applicability were compared. The influential factors on the mirror mount design were summarized and based on this summary some key points and principles for support design were discussed. Combined with analysis on support technique research progress at home and abroad, the key techniques such as optimization on the number and location of support points, athermal design and un-stressed assembly and the trend of development were scrutinized. It is expected to provide reference for large space telescope of our country and thus promote leapfrog development in the new round of space exploration.

Key words: space telescope; mirror; large aperture; mirror support

收稿日期:2018-06-10; 修订日期:2018-07-20

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0500802)

作者简介:张博文(1987-),男,工程师,硕士,主要从事空间遥感器光机结构设计方面的研究。Email: zhangbw508@163.com

0 引言

20 世纪航天技术的产生与发展为人类开辟了认识和改造自然的新领域,推动了科学技术的进步,拓展了科技创新的层次。应用太空开展空间遥感,具有“不畏浮云遮望眼”的优势,使人类实现了“欲穷千里目,更上一层楼”的期望,无论是针对我们生存的地球进行观测、掌握人类活动信息,还是针对无尽的宇宙进行天文观测和探索,人类的认知能力在实时性、覆盖度和精细度等多个方面都取得了飞跃的发展。随着空间遥感应用的深入和拓展,空间望远镜的口径也不断增大。在对地观测方面,如 GeoEye-1/2 口径均已超过 1 m,美国最先进的光学侦察卫星的主镜口径更达到了 3 m 量级;在天文观测方面,空间望远镜的口径从哈勃望远镜的 2.4 m, Herschel 望远镜、SPICA 望远镜的 3.5 m, JWST 的 6.5 m, 到 ATLAST 项目(有 8、9.2、16 m 等多种方案)^[1-3],呈现出不断增长、紧逼最大发射能力的态势。

如此大口径主反射镜能否安全入轨并保证在轨性能稳定,是关系到整个空间望远镜任务预期目标能否完全达成的关键之一。支撑结构作为连接反射镜与空间望远镜主结构的纽带,是对反射镜面形精度和稳定性影响最突出的环节之一。文中首先介绍了大口径反射镜的几种主要支撑形式,然后对反射镜支撑设计涉及的关键技术及其发展进行论述,最后对大口径空间反射镜支撑结构的设计思想进行讨论,概括支撑设计的影响因素及指导原则。

1 大口径反射镜的主要支撑形式

大口径反射镜多采用背部支撑形式,在光轴竖直状态下进行检测、装调和发射。主要的背部支撑形式有三点支撑、六杆支撑、Whiffle Tree 支撑等,其中后两者可以说是从三点支撑上衍生发展出来的。三点支撑直接基于三点定面原理,三个定位点可以是实际点,也可以是虚拟点。对于半径 R 的等厚无孔圆形平板镜,理论分析表明三个点的最佳位置均分布在半径为 $0.645 R$ 的圆周上。对长条形反射镜,支撑点位置受长宽比等形状参数影响。朱俊青、沙巍等建立了针对长度为 200~1 600 mm、长宽比在 0.4~1 的长条形实体反射镜背部三点支撑集成参数化模型,得到了最优支撑位置^[4]。在更多应用中,除三个

主点定位以外,通常会有多个辅点,应用柔性元件将主镜与背板相连,如闫勇等针对某型卡塞格林系统 650 mm 口径主镜提出的三点为主、多点为辅的支撑方案^[5],徐宏、关英俊针对 1 m 口径空间相机反射镜设计的三点支撑方案^[6]。著名的 Hubble 望远镜的主镜采用了背部三点与切向三点的支撑形式。三个背部支撑点分布在图 1 所示的位置。每处支撑结构中有一个球铰和一根挠性连杆实现运动学支撑。三处圆周均布的背部支撑与三处切向支撑共同提供镀膜、运输、装调与发射期间的支撑刚性^[7]。

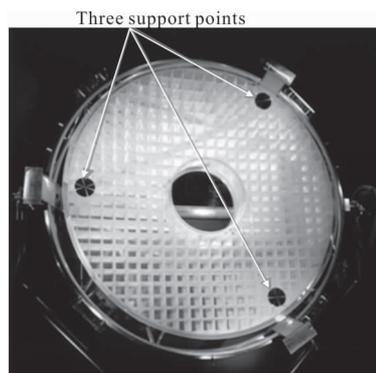
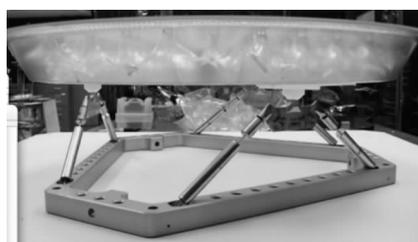


图 1 HST 主镜背部三个支撑点示意图

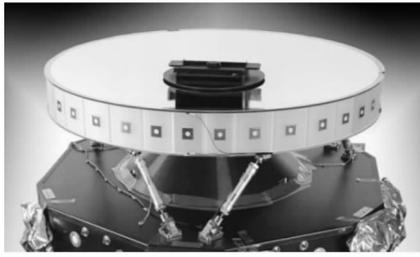
Fig.1 3 supporting points on the rear of HST primary mirror

六杆支撑由六个长度可设计的支杆两两一组构成三组 Bipod 即两脚架结构,固定到反射镜的背部或侧面。Bipod 有正立使用和倒立使用两种情况,图 2(a)所示为正立使用,反射镜背部有三个支撑点;图 2(b)所示为倒立使用,反射镜背部有六个支撑点。每一个 Bipod 支撑结构的瞬时支点为其虚的枢轴位置,整个六杆支撑系统类似于 Hexapod 并联机构,通过雅可比矩阵分析能够得到反射镜位置对每根杆长度变化的敏感度,是关于支撑杆方位角的函数。在每根 Bipod 支架的两端常常设计细颈状结构的柔性环节,使其具有高的轴向刚度和低的横向刚度。研究



(a) ITT 皱纹镜坯

(a) ITT corrugated glass mirror



(b) Worldview-4 主镜

(b) Primary mirror of Worldview-4

图 2 Bipod 支撑实例

Fig.2 Examples of Bipod support

表明, Bipod 柔性支撑结构在保证反射镜良好热稳定性的同时, 可以有效降低外界动态载荷对反射镜的影响; 不仅具有良好的动态特性, 且能在力热耦合载荷下保持较好的面形精度^[8]。另外, 优化支撑脚延长线交点位置与粘接位置也能够有效地提高面形精度^[9]。

六杆支撑是目前空间望远镜主镜应用最多的支撑形式。Herschel、SPICA、SNAP、ALADIN、World View-4 等空间望远镜的主反射镜都采用了 Bipod 支撑设计。NASA 于 2013 年发射的太阳过渡层成像光谱仪 (ISIR) 搭载高分辨紫外相机, 其上的九块反射镜都采用了 Bipod 支撑设计, 如图 3 所示, 其中包含圆形、矩形和多边形反射镜, 实现各反射镜在 8~15 mm 不同子孔径下优于 1 nm 的面形精度^[10]。需要指出的是, 在大口径空间望远镜的应用中, 通常会在六杆支撑以外设置辅助支撑并在入轨后解锁, 以满足发射力学环境的要求。

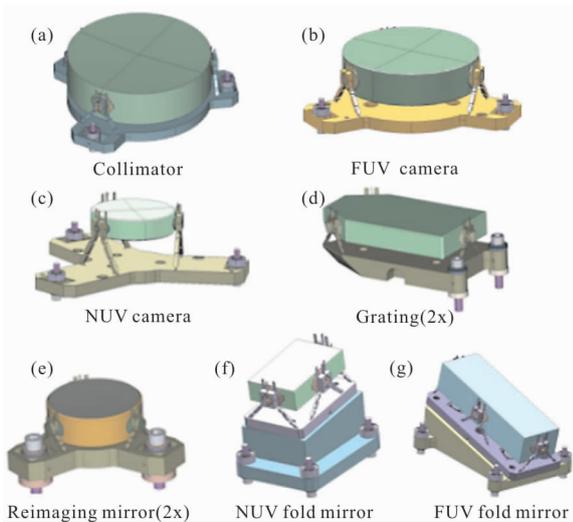


图 3 ISIR 反射镜支撑结构

Fig.3 IRIS mirror mounts

Whiffle Tree 支撑由 Thomas Grubb 于 1845 年发明, 是基于运动学轴向三点定位原理发展而来的支撑系统^[11]。三个定位支撑点通过球头/关节铰链、横梁/三角板将支撑点扩展为 2 或 3 的倍数, 如图 4 所示的几种不同支撑点数量的 Whiffle Tree 构型。这些支撑点与反射镜背部连接, 共同分担反射镜的重力和其他载荷, 获得满足面形精度的支撑点布局。由于空间应用中球头/关节铰链连接存在间隙控制、防冷焊、摩擦力不确定等问题, 通常用柔性元件代替。1945 年, Hindle 叙述了一种以其名字命名的安装技术, 并详细介绍了 9 点、18 点的多点机械悬浮安装布局, 其原理上与 Thomas Grubb 提出的 Whiffle Tree 结构是相通的。

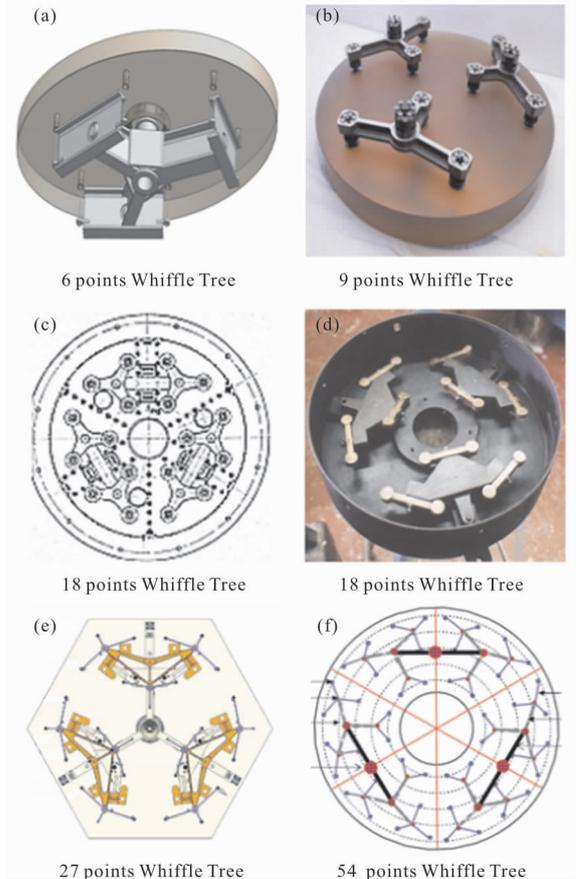


图 4 不同支撑点数量的 Whiffle Tree 构型

Fig.4 Many Whiffle Tree configurations of different number of support points

过去空间望远镜的反射镜口径相对较小、轻量化程度低, 对 Whiffle Tree 多点浮动静定支撑的应用需求较小, 因此 Whiffle Tree 结构的应用主要集中在地基天文望远镜项目中, 如 TMT、E-ELT 等^[12-13]。

随着空间望远镜主镜口径不断增加,Whiffle Tree 结构在航空航天项目中的应用也逐步增多。典型的案例是由 NASA、德国航空太空中心(DLR)和大学太空研究协会(URSA)共同合作的红外线天文学观测望远镜项目——同温层红外线天文台 (SOFIA)^[14-16],其 2.7 m 口径主反射镜采用了侧面 6 点 Bipod 支撑和背部 18 点 Whiffle Tree 支撑的组合支撑方式,如图 5 所示,复合两种静定支撑方式,实现反射镜在重力、过载等力学环境下变角度工作的面形精度。如图 6 所示,JWST 望远镜的主镜分块镜上也采用了 Whiffle Tree 结构,其控制分块镜方位的三组作动器的前端各有一个 Whiffle Tree 结构^[17]。

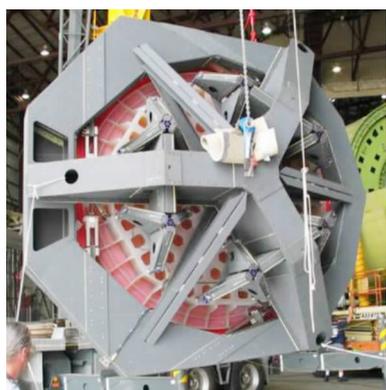


图 5 SOFIA 主反射镜组件

Fig.5 SOFIA primary mirror assembly

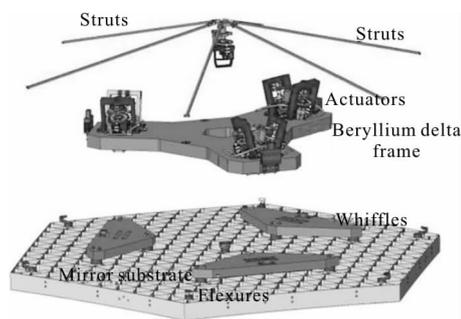


图 6 JWST 主镜分块镜支撑结构

Fig.6 Supporting structure of JWST primary mirror segment

表 1 从适用特性角度对三点支撑、六杆支撑、Whiffle Tree 支撑三种支撑形式进行了对比。三种支撑都是在三点定面原则的基础上进行扩展,因此支撑点数量可以概括为 $3 \times 2 m \times 3 n$,其中 m 和 n 的数值各不相同;支撑点数量的增多使得地面重力作用下的反射镜面形精度依次提高,对反射镜口径和刚度的适用能力依次增强;但另一方面,支撑结构复杂度也相应提高,导致设计难度增大,特别是对强迫位移、温度波动等载荷的适应能力也会受到影响。从抗力学环境能力方面看,三点支撑、六杆支撑在火箭发射阶段通常需要辅助支撑,Whiffle Tree 支撑则不需要。因此,Whiffle Tree 支撑对天基大口径反射镜具有更强的适用性。

表 1 三种支撑形式的适用特性对比

Tab.1 Comparison of applicabilities of the three support forms

Support forms	Number of points $3 \times 2 m \times 3 n$	Surface figure of gravity	Applicability to mirror aperture	Applicability to mirror stiffness	Structure complexity	Applicability to forced displacement or thermal load	Requirement on auxiliary supports at launch
Three points	$m=0; n=0$	Low	Low	Low	Low	High	Yes
Hexapod	$m=0,1; n=0$	Medium	Medium	Medium	Medium	Medium	Yes
Whiffle Tree	$m=0,1,\dots; n=0,1,\dots; m+n \neq 0$	High	High	High	High	Low	Not

2 反射镜支撑设计原则

反射镜在研制过程中会经历加工、装调、检测、发射和工作等多个阶段,特别是装调检测阶段还会开展力学、热学、真空等环境试验,使得反射镜所处的外力作用状态不断变化,设计需求和设计约束也

不同,并且差异程度会随着反射镜口径的增加而变得更加显著。

表 2 汇总了一般情况下反射镜要经历的主要阶段及其载荷环境^[7-8]。反射镜支撑要保证反射镜的定位精度和面形精度满足在轨工作阶段的要求,并且合理兼顾地面装调、系统检测和运输、发射等阶段的

表 2 空间反射镜经历的主要阶段及相应载荷环境
Tab.2 Main phases and corresponding loads of space mirror

Phase	Processing	Alignment and test on ground				Launch	On orbit	
		Mirror surface test	Support structure assembly	Cell surface test	System tes			
Static	Gravity, support and machine force	Gravity, support	Gravity, support and assembly stress	Gravity, support and assembly stress	Gravity, support and assembly stress	Gravity, support, acceleration and assembly stress	Assembly stress	
Dynamic	Vibration, impact and noise	Ambient vibration	Ambient vibration	Ambient vibration	Ambient vibration Test vibration	Vibration, impact and noise	Micro-vibration	
Load	Thermal	Complex thermal status in the processing region	Ambient temperature	Ambient temperature	Ambient temperature	Ambient temperature and thermal test	Thermal environment in the fairing	Thermal control system
	Pressure	Atmospheric turbulence	Atmospheric turbulence	Atmospheric turbulence	Atmospheric turbulence	Atmospheric turbulence and vacuum test	Air pressure in the fairing	-
Others	Transfer	Transfer and rotation	Adhesive curing, transfer and rotation	Transfer and rotation	Transfer and rotation	-	-	
Surface figure requirement	Best	Best	Minimum deformation	Met requirements with gravity unloading	Met requirements with gravity unloading	-	Best	

要求，就要求反射镜支撑能够在多种受力状态下保持性能稳定，具有对载荷环境变化的适应性。

通常，反射镜支撑设计要遵循三条基本设计原则：运动学支撑、减少摩擦力不确定性影响、材料热膨胀特性匹配^[10-18]。在运动学支撑条件下，反射镜的受力状态不会因外力作用的变化而发生形变，使其能够在各种力、热环境试验前后保持性能稳定一致，并且易于建模仿真、预测和评估。三维空间运动学支撑的最简形式是球面-V槽-平面 (ball-vee-flat)系统，三点支撑、六杆支撑、Whiffle Tree 支撑等都是在此基础上通过改变自由度约束的分配而衍生出来。无论何种形式的运动学支撑，都必须减少摩擦力不确定性的影响。摩擦力的影响机制复杂，接触表面的抛光、涂层、温度、污染、受力、间隙等状态的细微差异都可能引起摩擦力的剧烈波动，并且这些影响因素难以有效控制，导致摩擦力无法准确测量和描述。因此空间反射镜的支撑结构要严格控制螺纹连接、铰链运动副等的使用，并对螺纹连接点胶加固、铰链改用柔性元件代替。第三条原则要求反射镜与支撑结构的热膨胀特性匹配，通过材料的选择和支撑结构的热

补偿、热卸载设计等尽量减小这种不匹配所导致的热应力，提高支撑结构对热环境变化的适应能力。

3 大口径反射镜支撑的关键技术

3.1 支撑点数量与分布的设计优化

一般意义上，支撑点数量越多，反射镜在重力作用下的面形质量越好，支撑结构刚度越高；但同时也会带来支撑结构的设计难度、复杂度、组件总质量的增大以及热卸载效果的下降。因此，支撑点数量的确定原则是在满足反射镜的地面装调、系统检测、运输发射和在轨工作等阶段要求的前提下越少越好。支撑点数量和分布确定之后，支撑结构形式也就随之确定。Counder^[7]、Hall^[7]、Nelson^[19]等人通过大量理论推导与仿真试验，总结了一些列反射镜自重变形与支撑点数目以及反射镜材料特性、口径大小、厚度等参数间的经验公式，并且给出不同的支撑点分布形式的效率系数。这些公式为支撑点数量、分布的初步确定提供了参考，但并不适用于多为非实心、非平板的空间反射镜。对于空间反射镜，支撑点数量和位

置要受到曲率半径、轻量化形式等参数的影响,因此通常要与反射镜自身设计相结合进行组件级的优化设计,其中基于参数化模型、利用各分析软件及优化平台实现直接面向面形质量的多学科优化是目前效率和效果都较佳的方法。国外早在 1989 年,Cho^[20]即应用 NASTRAN 软件进行了多种支撑条件下的轻质反射镜参数化建模,实现波相差、质量、支撑点位置的优化。经过多年发展,William R. Arnold 等在 NASA 的赞助下开发并不断升级了专用反射镜设计软件 Arnold Mirror Modeler^[21-23],可用于近地和空间遥感反射镜设计,能够完成单块镜、分块镜、SOFIA 形反射镜、离轴反射镜等的快速设计以及支撑数量和位置的自动优化,使得反射镜组件设计效率极大提高,已经在 Kepler 项目主镜研制中获得成功应用。图 7 展示了 Arnold Mirror Modeler 的支撑结构优化功能,设计师通过该工具能够很方便地尝试和比较 Hexapod 支撑方式的任意一种几何构型。国内尚未开发此类专用工具,研究方法局限于 ProE、Patran、Sigfit 等商业软件的松散集成,如范磊^[24]、耿麒先^[25]、王书新^[26]、Ding Ke^[27]、王克军^[28]、

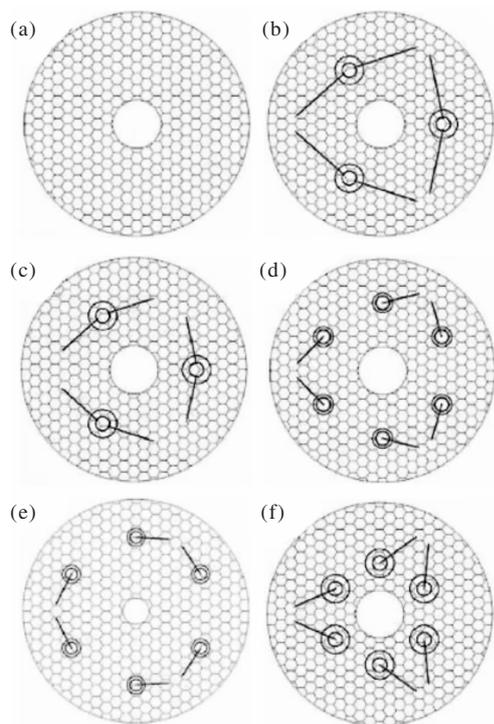


图 7 Arnold Mirror Modeler 的反射镜支撑优化功能
Fig.7 Mirror support optimization function of Arnold Mirror Modeler

兰斌^[29]等分别运用不同商业软件、不同优化算法对反射镜支撑位置开展了优化设计工作。

对空间望远镜来说,一方面热控措施受到技术水平和天上资源的限制,反射镜所处的工作环境必然存在温度变化;另一方面,反射镜组件多数由几种不同材料制成,镜体、支撑结构以及连接二者的胶层的热膨胀系数(CTE)各不相同,而且镜体可能由于原材料的制造或晶粒尺寸/方向的微观机械变化产生 CTE 不均匀性,即使在较小的温度范围内 CTE 可视作常数,组件各部分的热变形和热应力也是不可避免的。反射镜以及整个望远镜对这种热变形十分敏感,可能导致性能的大幅下降甚至结构失效。因此,大口径反射镜支撑设计时必须考虑热稳定性,开展无热化设计。

结构无热化设计的一方面是支撑结构自身的热稳定,通常基于热补偿原理,针对不同材料的热膨胀系数差异设计合理的结构几何构型,使得各零件热变形相互协调,保持关键几何参数的热稳定。图 8 为热补偿原理的典型应用——类似 Hooke 补偿摆^[30],其菱形四边为同种材料,中间的对角边为具有不同热膨胀系数的另一种材料,如果菱形边长、角度以及热膨胀系数配置合适,就能够实现摆锤在温度变化情况下始终保持高度稳定。对于更为复杂的温度变化环境,支撑结构可以通过增加材料种类和热变形环节来实现热稳定。基于这一原理,A. Gelman^[31]、Virginia Ford^[32]、Conglin Yan^[33]等设计了数种不同应用的无热化支撑结构,并经分析和试验验证了良好效果。

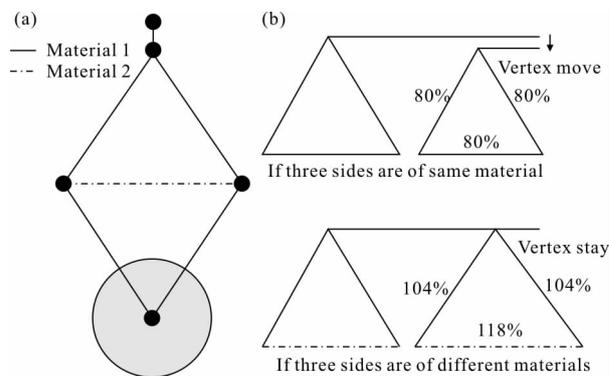


图 8 Hooke 补偿摆原理

Fig.8 Hooke's compensated pendulum

结构无热化设计的另一方面是胶结环节的热变

形协调,以减小径向热应力为设计目标,通过选择合适的胶粘剂和胶结厚度实现热应力最小化。在外界温度载荷作用下,反射镜、支撑结构部件及胶粘剂的热膨胀系数不匹配致使反射镜组件内部产生热应力,使反射镜面形精度降低。Baryar^[34]首先提出无热化胶结厚度问题,并推导了胶结厚度的求解方程。但 Baryar 只考虑了胶层径向热膨胀,忽略了其轴向和切向约束,并要求胶粘剂 CTE 最大,支撑结构件与反射镜的 CTE 相继次之。随后研究人员基于胡克定律推导了一系列无热胶结厚度解析方程,包括改进 Baryar 方程、Van Benzooijen 方程、改进 Van Benzooijen 方程、纵横比近似方程等^[35-37]。这些方程因假设条件的不同而适用于各种不同的具体的支撑结构设计,其中 Baryar 方程和改进 Baryar 方程可分别作为胶层厚度的上下限计算公式。

3.3 无应力装配的实现与分析

由于零件加工的尺寸形位误差以及重力等载荷的作用,反射镜组件在装配过程中会产生变形,影响反射镜的光学性能。减小装配应力的措施主要有胶粘剂和柔性铰链的使用。

胶粘剂通常模量较低,用其代替螺纹等连接方式,能够避免反射镜与支撑结构间的硬接触、摩擦力和应力集中现象,使支撑应力分布均匀,降低零件表面加工误差的影响,并减轻组件总质量。但胶层在由液态到玻璃态的固化过程中必定会产生体积收缩,粘附力和机械力的作用会造成粘接面积的收缩严重受阻,不能正常体积收缩,从而在不同材质的界面上产生不容忽视的内应力。因此,胶粘剂的使用和胶层参数设计除了需要满足强度要求以及无热化厚度要求以外,还需注意控制固化收缩的影响。参考文献[38-40]的研究表明,应尽量减少胶粘剂在固化后期的收缩,不宜在室温下长时间固化,并可采取降低胶结区域的支撑结构件刚度、控制总的胶结面积和单块胶片面积、清理溢出胶等措施减小固化内应力。

柔性铰链是反射镜支撑实现运动学支撑、减少摩擦力影响的重要环节,而理想的运动学支撑可使反射镜的受力状态不受周围环境弹性变形的影响,不因外力作用的变化而发生形变,因此柔性铰链对于无应力装配的实现意义重大。关于柔性铰链的设计已有大量文献报道,文中不再展开论述。但在工程

上空间应用反射镜无法实现完全的运动学支撑,装配的特定过程中产生的变形将一直保持在反射镜组件中,预测这部分变形的量级及其影响是反射镜设计师必须关注的。应用多步分段非线性分析可以把过程中变化的载荷、连接状态和边界条件等顺序完成仿真,实现对装配过程应力影响评估的目的^[41]。

4 结束语

空间技术往往是伴随着地面技术应用的成熟而发展的,天基大口径反射镜支撑技术也不例外。在泡沫、薄膜等新型反射镜材料没有实现大口径工程应用之前,由 ULE、微晶以及 SiC 等材料制成的天基大口径反射镜仍将以 Whiffle Tree 等多点运动学支撑结构为主要支撑形式;支撑结构设计方法将会随着各项关键技术的发展而逐步完善,形成相对统一、固定的设计分析流程,并将开发出专用的模块化智能化软件工具系统。主动支撑技术也会在未来的天基大口径反射镜得到更加广泛的应用。

随着国际空间探索掀起新一轮热潮,多个大口径空间望远镜项目陆续立项启动,我国在这一领域的差距将进一步增大,开展大口径空间望远镜研制的需求日益迫切。另一方面,由中国运载火箭技术研究院研制的长征 5 号重型运载火箭的发射成功,国内大口径反射镜坯制备、加工和镀膜等能力的不断完善,以及高分系列、风云系列等空间相机的经验积累,为大口径空间望远镜的立项研制提供了系统支持。在这一背景下,我国开展大口径空间望远镜项目既是科学研究的需要和技术进步的必然,也是带动相关领域技术发展、提升我国空间科学地位的有利契机。

参考文献:

- [1] William R Oegerle. ATLAST-9.2 m: a large-aperture deployable space telescope[C]//SPIE 2010, 7731: 77312M.
- [2] William R Arnold. Evolving design criteria for very large aperture space-based telescopes and their influence on the need for integrated tools in the optimization process[C]//SPIE, 2015, 9573: 95730G.
- [3] Li Zongxuan, Jin Guang, Zhang Lei, et al. Overview and outlook of monolithic primary mirror of spaceborne telescope with 3.5 m aperture [J]. *Chinese Optics*, 2014,

- 7(4): 532–541. (in Chinese)
李宗轩, 金光, 张雷, 等. 3.5 m 口径空间望远镜单块式主镜技术展望[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 532–541.
- [4] Zhu Junqing, Sha Wei, Chen Changzheng, et al. Position layout of rear three points mounting for space rectangular mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(9): 2562–2569. (in Chinese)
朱俊青, 沙巍, 陈长征, 等. 空间长条形反射镜背部三支撑点的设置[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(9): 2562–2569.
- [5] Yan Yong, Jia Jiqiang, Jin Guang. Design of new type spaceborne lightweighted primary mirror support [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(8): 1533–1539. (in Chinese)
闫勇, 贾继强, 金光. 新型轻质大口径空间反射镜支撑设计[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(8): 1533–1539.
- [6] Xu Hong, Guan Yingjun. Structural design of 1m diameter space mirror component of space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1488–1495. (in Chinese)
徐宏, 关英俊. 空间相机 1 m 口径反射镜组件结构设计[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(6): 1488–1495.
- [7] Yoder P R. Opto–Mechanical Systems Design [M]. Zhou Haixian, Cheng Yunfang, translated. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)
Yoder P R. 光机系统设计 [M]. 周海宪, 程云芳, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [8] Zhang Limin, Wang Fugao, An Qichang, et al. Application of Bipod to supporting structure of minitype reflector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 438–443. (in Chinese)
张丽敏, 王富国, 安其昌, 等. Bipod 柔性结构在小型反射镜支撑中的应用[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(2): 438–443.
- [9] Zhou Yuxiang, Shen Xia. Structure design of backside bipod flexure mount for space reflector [J]. *Laser Technology*, 2017, 41(1): 142–145. (in Chinese)
周宇翔, 沈霞. 空间反射镜背部双脚架柔性支撑结构设计[J]. 激光技术, 2017, 41(1): 142–145.
- [10] Hom C, Irwin J W, Stubbs D M, et al. Design of bipod flexure mounts for the IRIS spectrometer [C]//SPIE, 2013, 8836: 88360Q.
- [11] Kaercher Hans J, Peter Eisentraeger, Martin Sü. Mechanical principles of large mirror supports [C]//SPIE, 2010, 7733: 77332O.
- [12] Curtis Baffes, Terry Mast. Primary mirror segmentation studies for the Thirty Meter Telescope [C]//SPIE, 2008, 7018: 70180S.
- [13] Cayrel M. E–ELT optomechanics: overview [C]//SPIE, 2012, 8444: 84441X.
- [14] Bittner H, Erdmann M, Haberler P. SOFIA primary mirror assembly: structural properties and optical performance [C]//SPIE, 2003, 4857: 266–273.
- [15] Sean C Casey. The SOFIA program: astronomers return to the stratosphere [C]//SPIE, 2006, 6267: 62670Q.
- [16] Paul Keas, Rick Brewster. SOFIA Telescope modal survey test and test–model correlation [C]//SPIE, 2010, 7738: 77380K.
- [17] Charlie Atkinson, Scott Texter. Status of the JWST optical telescope element [C]//SPIE, 2006, 6265: 62650T.
- [18] Doyle K B, Genberg V L, Michaels G J. Integrated Optomechanical Analysis [M]. 2nd ed. Lian Huadong, Wang Xiaoyong, Xu Peng, translated. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)
凯斯·B·道尔, 维克托·L·基恩伯格, 格雷戈里·J·迈克尔斯. 光机集成分析 [M]. 第 2 版. 连华东, 王小勇, 徐鹏, 译. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [19] Nelson J E, Lubliner J, Mast T S. Telescope mirror supports: plate deflection on point supports [C]//SPIE, 1982, 332: 212–228.
- [20] Cho M K, Richard R M, Vukobratovich D. Optimum mirror shapes and supports for light weight mirrors subjected to self–weight [C]//SPIE, 1989, 1167: 2–19.
- [21] William R Arnold, Matthew Fitzgerald, Rubin Jaca Rosa, et al. Next generation lightweight mirror modeling software[C]//SPIE, 2013, 8836: 883601.
- [22] William R Arnold, Ryan M Bevan, H Philip Stahl. Integration of mirror design with suspension system using NASA’s new mirror modeling software[C]//SPIE, 2013, 8836: 88360J.
- [23] William R Arnold. Recent updates to the Arnold Mirror Modeler and integration into the evolving NASA overall design system for large space –based optical systems[C]//SPIE, 2015, 9573: 95730H.
- [24] Fan Lei, Yang Hongbo, Zhang Jingxu, et al. Lightweight design for 2 m SiC arch mirror [J]. *Opto–Electronic Engineering*, 2010, 37(10): 71–76. (in Chinese)
范磊, 杨洪波, 张景旭, 等. 2 m SiC 反射镜拱形轻量化结构设计[J]. 光电工程, 2010, 37(10): 71–76.
- [25] Geng Qixian, Yang Hongbo, Li Yanwei. Optimum method of backside support position for large–aperture primary mirror with flat rear surface [J]. *Optical Technology*, 2007, 33(6): 889–895. (in Chinese)

- 耿麒先, 杨洪波, 李延伟. 大口径平背形主镜背部支撑位置优化计算方法[J]. 光学技术, 2007, 33(6): 889-895.
- [26] Wang Shuxin, Li Jinglin, Zhang Fan, et al. Optimization of large aperture space reflector based on RSM [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S2): 291-297. (in Chinese)
王书新, 李景林, 张帆, 等. 响应面模型的大口径空间反射镜优化[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S2): 291-297.
- [27] Ding Ke, Qi Bo, Bian Jiang. Integrated opto-mechanical optimization analysis of large-aperture primary mirror's support position[C]//SPIE, 2016, 9682: 968213.
- [28] Wang Kejun, Dong Jihong, Xuan Ming, et al. Compound support structure for large aperture mirror of space remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(7): 1719-1730. (in Chinese)
王克军, 董吉洪, 宣明, 等. 空间遥感器大口径反射镜的复合支撑结构[J]. 光学精密工程, 2016, 24(7): 1719-1730.
- [29] Lan Bin, Yang Hongbo, Wu Xiaoxia, et al. Optimal design of $\Phi 620$ mm ground mirror assembly [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0118001. (in Chinese)
兰斌, 杨洪波, 吴小霞, 等. $\Phi 620$ mm 口径地基反射镜组件优化设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0118001.
- [30] Colin Cunningham, Adrian Russell. Precision engineering for astronomy: historical origins and the future revolution in ground-based astronomy [J]. *Phil Trans R Soc A*, 2012, 370(1973): 3852-3886.
- [31] Gelman A, Maliah E. Mechanism for passive thermal compensation in harsh environment[C]//SPIE, 2007, 6715: 671506.
- [32] Virginia Ford, Rick Parks. Passive thermal compensation of the optical bench of the galaxy evolution explorer[C]//SPIE, 2004, 5528: 171-180.
- [33] Yan Conglin, Liu Weilin, Wu Qinzhang. Design and analysis on a kind of primary reflector support structure based on thermal compensation principle [C]//SPIE, 2012, 8415: 841511.
- [34] Bayar Mete. Lens barrel optomechanical design principles [J]. *Optical Engineering*, 1981, 20(2): 181-186.
- [35] James J Herbert. Techniques for deriving optimal bondlines for athermal bonded mounts [C]//SPIE, 2006, 6288: 62880J.
- [36] Christopher Monti. Athermal bonded mounts: Incorporating aspect ratio into a closed-form solution [C]//SPIE, 2007, 6665: 666503.
- [37] Guo Junli, An Yuan, Li Zongxuan, et al. Bonding technique of mirror components in space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0313002. (in Chinese)
郭骏立, 安源, 李宗轩, 等. 空间相机反射镜组件的胶结技术[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 0313002.
- [38] Yang Liwei, Li Zhilai, Xue Donglin. Analysis and test for effect of structural adhesive shrinkage during curing on mirror surface [J]. *Optical Technology*, 2014, 40(4): 307-312. (in Chinese)
杨利伟, 李志来, 薛栋林. 结构胶固化收缩对反射镜面形影响的分析与试验[J]. 光学技术, 2014, 40(4): 307-312.
- [39] Dong Deyi, Li Zhilai. Simulation and experiment of influence of adhesive curing on reflective mirror surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(10): 2698-2707. (in Chinese)
董得义, 李志来. 胶层固化对反射镜面形影响的仿真与试验[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2698-2707.
- [40] Doyle K B, Michels G J, Genberg V L. Athermal design of nearly incompressible bonds [C]//SPIE, 2002, 4771: 296-303.
- [41] Wang Dong, Yan Yong, Jin Guang. Nonlinear analysis method for predicting optical surface deformations resulted from assembly process [C]//SPIE, 2010, 7654: 76540A.