

空间衍射望远镜自展开结构设计

左玉弟^{1,2}, 金光¹, 李宗轩¹, 解鹏¹, 杨丰福^{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: 为了满足空间探测对衍射望远镜的发展需求, 针对某衍射光学系统设计了一种空间可展开衍射望远镜。首先, 根据 Serrurier 桁架原理及优化设计理论确定了文中所用展开结构的形式及几何尺寸, 并针对某衍射光学系统设计了一种新型自展开结构; 其次, 建立了该展开结构的有限元模型并分析了其展开后的特性; 最后, 搭建了原理样机并对其进行了实验研究。实验结果表明: 该展开结构的展开距离为 2.9 m, 展开后的重复精度误差小于 2 mm, 偏心小于 0.3 mm, 倾角小于 0.2°, 且可通过促动器将其展开精度调整至微米级, 能够满足空间衍射望远镜自展开机构的结构简单、质量轻、稳定可靠、精度高等要求。

关键词: 空间探测; 衍射望远镜; 衍射光学系统; Serrurier 桁架原理; 展开机构
中图分类号: TH703 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1218001

Design of the spontaneous deployable structure for space diffractive telescope

Zuo Yudi^{1,2}, Jin Guang¹, Li Zongxuan¹, Xie Peng¹, Yang Fengfu^{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)

Abstract: In order to satisfy the demand for the space diffraction telescope in space exploration, a new deployable space diffractive telescope was designed, which aimed at one diffraction optical system. Firstly, the structural form and geometrical sizes of the spontaneous deployable structure used in this article were preliminarily designated through the Serrurier truss theory and the optimization design theory, and a new spontaneous deployable structure was designed aiming at one diffractive optical system. Secondly, the finite element model of the deployable structure was built, and its deployment characters were analyzed. Finally, the prototype of the spontaneous deployable structure was built up and the experiment was carried out to study its characteristics. Experimental results indicate that the deployable structure is 2.9 m in length, its repetitive deploy accuracy can reach less than 2 mm, the decentration is less than 0.3 mm. Besides, the deploy accuracy can be adjusted to micrometer level by actuators when it has deployed. It can satisfy the deployment structure's requirements of simple mechanics, low mass,

收稿日期: 2017-04-06; 修订日期: 2017-05-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2015AA7015090); 国家科技部重大专项(2016YFB0501202)

作者简介: 左玉弟(1990-), 男, 博士生, 主要从事空间反射镜及其支撑结构设计与分析方面的研究。Email: zuoyd1809@163.com

导师简介: 金光(1958-), 男, 研究员, 博士, 主要从事空间光学遥感器总体方面的研究。Email: jing@ciomp.ac.cn

steady and reliable deployment, as well as higher precision for the space diffractive telescope.

Key words: space exploration; diffractive telescope; diffractive optical system; Serrurier truss theory; deployable structure

0 引言

为了满足高轨道卫星高分辨率对地观测的要求,国外从 20 世纪末开始研发新型光学成像技术,包括空间分块可展开技术、光学干涉合成孔径成像技术、稀疏孔径成像技术和衍射成像技术。衍射成像技术是一种重要的对地观测技术,是目前国外的研究热点。衍射成像系统具有大口径、高分辨率、质量轻、空间可展开、面型误差要求低、易复制等特点,衍射成像技术在卫星应用中具有重大潜力^[1]。

国内外相关研究机构的研究方向主要集中在两点:第一、衍射元件材料以及衍射效率;第二、展开机构的设计及原理样机制造。近些年来,欧美各国先后开展了衍射成像系统的研究工作,并取得了阶段性的成果。美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)的“眼镜”(Eyeglass)计划^[2]、美国国防部高级研究计划局(DARPA)的 MOIRE 计划^[3]、美国空军军官学校(USAFA)的 FalconSat-7 立方体验证卫星^[4-5],都采用类似的设计理念,实现了大口径、轻量化的衍射成像光学应用;国内方面,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院光电技术研究所、北京空间机电研究所等针对衍射元件的制备技术开展了研究^[6-8],中国科学院西安光学精密机械研究所的郑耀辉等人设计了一种空间薄膜衍射望远镜的展开机构,并对其进行了理论分析研究^[9]。国内对于衍射成像相关技术的研究起步较晚,并且主要集中在理论研究及小型地面光学系统,与国外差距明显。

针对某空间衍射成像光学系统的特点及空间发射的需求,根据 Serrurier 桁架原理及优化设计理论,设计了一个长度为 3 m 的空间衍射望远镜折叠与展开结构,建立了其有限元分析模型,分析了其展开后的力学特性,并搭建了原理样机,结合实验对其展开特性进行了研究。实验结果表明:该衍射望远镜能够重复可靠地展开,且能够满足光学系统的设计要求。

1 可展开衍射望远镜设计

1.1 衍射光学系统指标及设计要求

空间衍射成像光学系统一般由物镜和目镜系统组成,它是利用衍射元件的衍射成像能力作为入瞳的透射式光学系统,该系统中的物镜为衍射透镜,目镜系统为色差校正系统。其工作原理是首先通过衍射透镜汇聚光线,再由位于其焦点处的色差校正系统进行色差校正以增大带宽,最后成像到焦平面上^[10]。在高分辨率成像的前提下,对于大 F 数的衍射成像系统,其衍射主镜与色差校正系统之间的距离较大(从几米到几十米不等),为了适应发射时的尺寸限制,必须使用展开机构来支撑衍射主镜,使其在发射时处于收拢状态,当航天器入轨后通过释放压紧机构来实现其展开。

文中的衍射成像光学系统如图 1 所示。该空间衍射望远镜的指标要求如下:衍射主镜口径为 350 mm、衍射主镜与校正镜组件(色差校正系统)间的距离即展开距离为 2.95 m,衍射望远镜的质量不超过 15 kg。衍射望远镜展开后的精度要求:衍射主镜与校正镜组件展开后的偏心不大于 0.3 mm、展开后间距误差不大于 2 mm(即重复展开精度)、角度偏差不大于 0.2°。

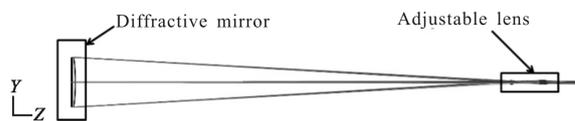


图 1 衍射成像光学系统

Fig.1 Diffraction imaging optical system

1.2 Serrurier 桁架原理

由于该衍射光学系统中衍射主镜与校正镜组件之间的距离较长,且对展开后衍射主镜及校正镜组件间的位置精度要求较高,如果采用主镜或校正镜

组件单独展开的方式,则容易导致展开后单侧的静力变形过大,且使得衍射主镜与校正镜组件之间的位置差距较大,即便是采用促动器等微调机构也不能将其调整至合适位置,无法满足光学系统的设计要求。为了尽量减小由衍射主镜与校正镜组件之间展开距离较大而引起的静力变形误差,根据 Serrurier 桁架原理^[11-13],采用从中间向两侧同时展开的方法来实现该衍射望远镜的结构设计。

图 2 是典型的 Serrurier 桁架原理图,使用可折叠的桁架杆结构将衍射望远镜的主镜及校正镜组件支撑在一个“箱体”结构上,可折叠的桁架杆从箱体向前和向后伸出,连接到衍射望远镜外端和内端的环形构件上。如果箱体两侧的桁架杆有正确的截面尺寸,那么在理想情况下,图 2 中的 A 点和 B 点就会在垂直于光轴的(AB 连线)重力负荷下变形一个相等的量(d_A 和 d_B),即为图 2 中理想情况下变形后的轴 A_1B_1 连线。从数学角度,AB 是水平的理想情况下:

$$d_A = \left(\frac{p_A b}{4Ea_A} \right) \left[\left(\frac{4L_A^2}{b^2} + 1 \right)^{3/2} \right] = d_B = \left(\frac{p_B b}{4Ea_B} \right) \left[\left(\frac{4L_B^2}{b^2} + 1 \right)^{3/2} \right]$$

式中: p 为施加于 A 或 B 上的载荷即为衍射主镜及校正镜组件等部件的重量; b 为箱体结构的高度; E 为可折叠桁架杆的弹性模量; a 为支撑 A 或 B 的桁架支架的截面积; L 为 A 或 B 点处结构的悬臂长度,根据此原理可初步对该衍射望远镜的展开结构进行设计。

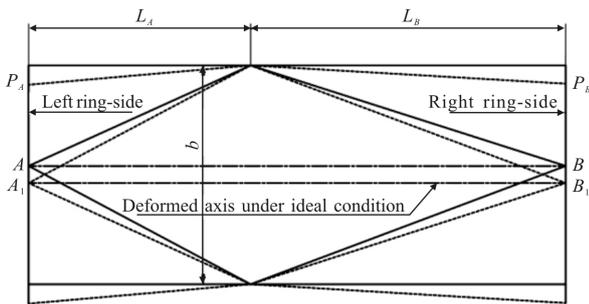


图 2 Serrurier 桁架原理图

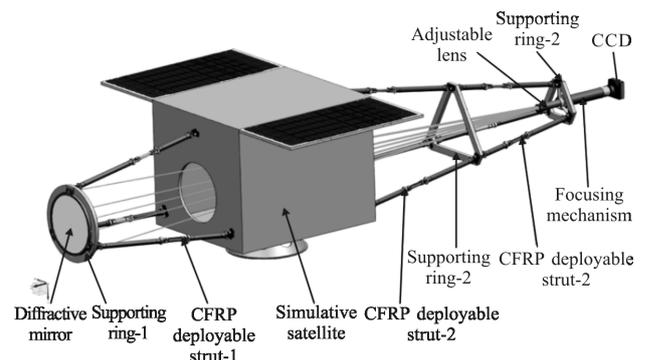
Fig.2 Drawing of Serrurier truss theory

1.3 衍射望远镜展开结构设计

结合 Serrurier 桁架原理及该设计中衍射主镜的刚度和精度要求,拟采用基于带状弹簧的可折叠桁架杆来构建展开结构。带状弹簧是形状类似钢卷尺的一种单层开口柱面壳构件,外形呈现为具有弧形

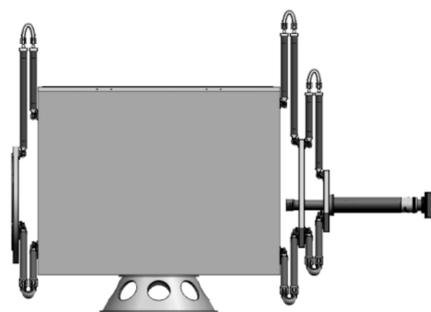
横截面的薄壁直带状,基于带状弹簧的展开结构构造简单,折叠效率高,质量轻,没有机械关节,能可靠地展开并自行锁定,具有较好的工程特性^[14]。可折叠桁架杆是由碳纤维杆件及带状弹簧铰链等组成,可折叠桁架杆从星体模拟件(即上文所提到的“箱体”结构)的两端分别向前和向后伸出进而实现衍射主镜及校正镜组件的展开。

由于衍射主镜口径及质量大、校正镜组件口径及质量小,通过简化模型并配合 Serrurier 原理公式计算及优化设计,确定衍射望远镜左侧的展开距离为 815 mm,右侧的展开距离为 1 490 mm,为了便于折叠与展开,同时减小折叠收拢后结构的整体外包装尺寸,决定该设计中左侧采用单层展开结构,右侧采用双层展开结构。衍射望远镜原理样机结构的初步设计如图 3 所示,该结构具有质量轻、折叠效率高、可靠性高、刚性高等优点。



(a) 展开状态

(a) Deployed state



(b) 收拢状态

(b) Stowed state

图 3 展开结构整体设计

Fig.3 Ensemble scheme of the deployable structure

由图 3 可知,该结构为带状弹簧式折叠展开结

构,主要由碳纤维可折叠支杆、带状弹簧铰链、支杆铰链及支撑环等组成。光学系统中的衍射主镜组件及校正镜组件通过螺纹接口分别连接在各自的支撑环上,支撑环则通过可折叠支杆组件连接在星体模拟件上。该衍射望远镜展开结构中的支撑环等框架结构为不可折叠部分,带状弹簧铰链、支杆铰链及碳纤维支杆所构成的可折叠支杆则具备折叠功能。其中,带状弹簧铰链采用了两片相对排列的带状弹簧,这种结构形式不仅可以实现其正向及反向弯曲 180° ,而且可以保证其顺利展开及展开后的刚度。支杆铰链的设计在于保证可折叠支杆能够顺利完成 180° 折叠并展开,且在其展开后为其提供锁定的预紧力及限位功能,为了达到预期目的,在设计支杆铰链时添加了扭簧结构。

通过 Serrurier 桁架原理公式的计算及优化分析,文中所用碳纤维支杆的外径为 28 mm,壁厚为 1.5 mm,镁铝合金支撑环框架结构的壁厚为 2.5 mm,设计完成后的衍射望远镜(不包含星体模拟件)总质量为 12.5 kg,结构展开后主镜与校正镜组件的距离为 2.95 m(含星体模拟件长度)。同时,为了保证带状弹簧铰链能够提供合适的展开力矩,文中所用带状弹簧的厚度为 0.18 mm,宽度为 25 mm,圆弧截面圆心角为 90° ,曲率半径为 20 mm,其最大弯矩为 1 925 Nmm,其弯矩-曲率曲线如图 4 所示。

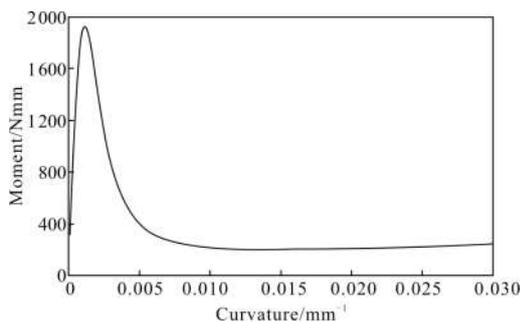


图 4 选用的带状弹簧弯矩-曲率曲线

Fig.4 Moment-curvature graph of the selected lenticular tape spring

该衍射望远镜的衍射主镜采用 PMMA 塑料板材,并配合金刚石单点车削技术在其表面加工衍射阶梯条纹,该材料具有较高的透明度及较好的机械加工性能,且质量轻,加工完成后的衍射主镜能够达到使用要求。色差校正系统则根据 Schupmann 消色

差理论设计了校正镜组件进而消色差(如图 1 所示),该衍射望远镜的衍射效率能够达到 30%左右。

当该衍射望远镜的展开结构处于收拢状态时,通过线熔断器进行锁紧固定,入轨展开时,线熔断器自动熔断解锁并实现展开运动,展开机构的主要动力源为带状弹簧及支杆铰链,带状弹簧通过自身的形状回复为系统提供展开所需的动力,从而实现展开运动。

2 衍射望远镜展开结构的有限元分析

在完成了衍射望远镜展开结构的初步设计之后,分别建立了其两侧展开结构的有限元模型(图 5、图 6)并进行分析。文中主要研究展开结构的特性,为了简便,在分析过程中对模型进行了合理简化,衍射主镜、校正镜组件及焦面组件均采用质量点代替。由于可展开式衍射望远镜在发射时处于收拢状态,入轨后展开并进行成像,因此需要着重分析其展开后的相关力学特性能否满足在轨成像的需求。



图 5 左侧展开机构有限元模型

Fig.5 Finite element model of the left deployable structure

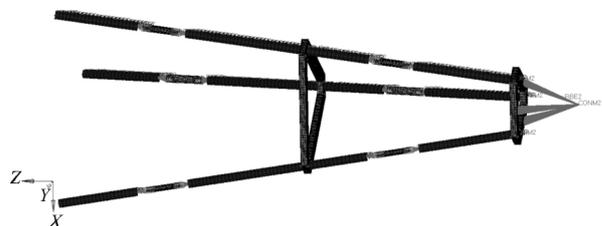


图 6 右侧展开机构有限元模型

Fig.6 Finite element model of the right deployable structure

在建立了该衍射望远镜左右两侧展开结构的有限元模型后,采用 MPC 刚性节点对连接在星体模拟件一端的可折叠支杆根部进行约束,分析了其模态及衍射主镜和校正镜组件在重力载荷作用下沿 X 向

(垂直光轴方向)的静力变形,该展开结构左右两侧的分析结果如表 1 所示。

表 1 展开结构分析结果

Tab.1 Analysis results of the deployable structure

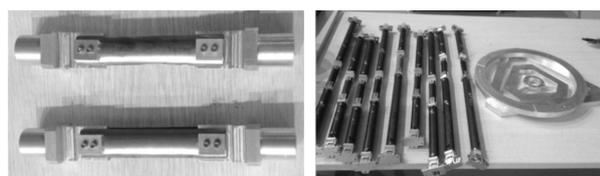
	Fundamental frequency/Hz	Static displacement in X orientation /mm	Variation of tilt angle/(°)
Left single-decker deployable system	12.2	1.453	0.04
Right double-decker deployable system	11.9	1.680	0.06

由表 1 中数据可知,该衍射望远镜左右两侧展开结构展开后的基频能够达到在轨工作时的使用要求,且它们沿 X 向的重力变形基本相等,差值较小即展开后衍射主镜与校正镜组件的偏心量约为 0.15 mm,倾角约为 0.1°,能够达到地面装调时的使用要求,其最终偏心值可以通过装调再次校正。

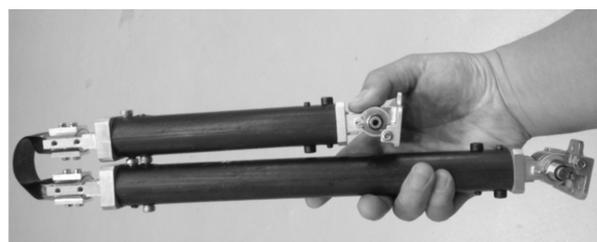
由于分析过程中对模型进行了简化,忽略了支杆铰链间隙对展开后结构精度的影响,而且结构重复展开后由铰链间隙所引起的误差是随机不可预测的,因此为了避免出现结构展开后的精度达不到衍射望远镜设计要求的随机现象,在衍射主镜镜座与支撑环连接处添加了微型促动器结构,通过调节促动器可将衍射主镜的位置精度调至衍射光学系统的设计要求范围。

3 衍射望远镜的实验研究

为了验证衍射望远镜展开结构的展开特性,在详细设计之后加工出了碳纤维可折叠支杆、支撑环、星体模拟件等部件(见图 7),进一步搭建了该可展开衍射望远镜的原理样机(见图 8),并对其进行了实验研究。



(a) Tape spring hinges (a) 带状弹簧铰链
(b) Components of the deployable structure (b) 展形结构的零部件



(c) CFRP strut under folding state (c) 折叠状态下的碳纤维支杆

图 7 加工完成的展开结构部件

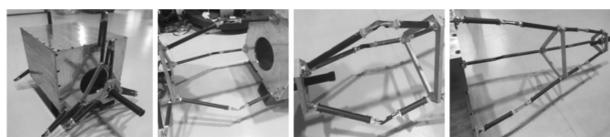
Fig.7 Components of the deployable structure after processing

在搭建了可展开衍射望远镜的原理样机后,对其进行了展开实验,实验的首要目的是验证该展开结构能否顺利展开及其展开后是否能始终保持最终的稳定状态;其次是为了验证该展开机构能否展开到预期设定的位置,能否达到设计要求的精度^[15]。实验过程中发现,该展开结构能够稳定可靠地展开并保持展开后的稳定状态,其左侧单层展开结构的展开时间大约为 3 s,右侧双层展开结构按靠近星体模拟件的次序依次展开,展开时间约为 8 s,该衍射望远镜左侧及右侧展开结构的收拢与展开状态如图 8 所示。



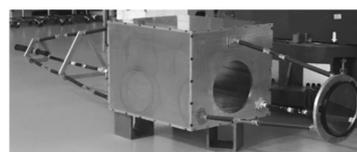
(a) 左侧结构展开过程

(a) Deployable processes of the left structure



(b) 右侧结构展开过程

(b) Deployable processes of the right structure



(c) 衍射望远镜展开结构样机

(c) Prototype of the diffractive telescope's deployable structure

图 8 展开机构原理样机

Fig.8 Prototype of the deployable structure

由图 8 可知,该衍射望远镜收拢后的尺寸大大减小,具有较高的折叠效率。在经过多次展开实验后,通过在衍射主镜及校正镜组件安装表面粘接小尺寸的平面反射镜并配合使用激光测距仪等测量仪器来多次重复检测该展开结构的展开精度^[6]。测量结果表明,该展开机构重复展开精度优于 2 mm,即展开后的衍射主镜及校正镜组件的间距误差小于 2 mm,倾角优于 0.2°,偏心误差大都能够优于 0.3 mm,偶尔会出现超出设计精度的情况。鉴于此,在检测过程中,通过使用促动器微调机构对衍射主镜的位置进行了调整,可以实现将衍射主镜及校正镜组件间的距离及偏心误差调整至微米级,能够达到衍射望远镜的光学设计要求。

经过多次重复展开及精度测量实验后,总结了影响该衍射望远镜展开精度的主要因素:(1)在设计过程中为了保证支杆铰链能够顺利平滑地转动,必需在其销轴与可转动部分间留有适当的铰链间隙,由于该展开结构使用了较多的支杆铰链,因此这些铰链间隙必然会对展开结构的精度产生不可忽略的影响;(2)各个碳纤维可折叠支杆的长度差异及安装方式也会对展开结构的展开精度产生影响,在进行可折叠支杆的加工时,应严格控制铰链间隙并保证同层各个可折叠支杆的长度相等,在安装固定时,应配合使用装调工装严格保证其安装角度,不能使其产生沿长度方向的扭转变形。

4 结 论

文中根据 Serrurier 桁架原理并针对某空间衍射光学系统,设计了一种空间衍射望远镜自展开结构,其质量约为 12.8 kg,并对其进行了有限元分析;最后搭建了原理样机,并进行了实验研究,分析了影响其展开精度的主要因素。实验结果表明:该展开机构结构简单、质量轻,能够平稳可靠地展开并始终保持展开后的状态;该展开机构原理样机展开后的衍射主镜及校正镜组件间的距离为 2.9 m,其重复展开精度优于 2 mm,倾角为 0.2°,且其展开后主次镜偏心误差基本优于 0.2 mm,通过促动器微调结构可将其偏心及间距误差调至微米级,能够满足光学系统的设计指标,同时也可以为之后的空间可展开衍射望远镜的设计提供一定的参考价值。

参 考 文 献:

- [1] Liu Tao, Zhou Yiming, Wang Jingquan, et al. Application of zone plate diffractive imaging technology in earth observation satellites [J]. *Spacecraft Engineering*, 2012, 21(3): 88–95. (in Chinese)
刘韬,周一鸣,王景泉,等.波带片衍射成像技术在对地观测卫星中的应用[J].*航天器工程*, 2012, 21(3): 88–95.
- [2] Hyde R. Eyeglass: A very large aperture diffractive space telescope [C]//SPIE, 2002, 4849: 28–39.
- [3] Howard A, Mac Ewen, James B, et al. Large diffractive/refractive apertures for space and airborne telescopes [C]//SPIE, 2013, 8739: 873904.
- [4] Geoff P Andersen, Olha Asmolova. FalconSAT –7: A membrane space telescope[C]//SPIE, 2014, 9143: 91431X.
- [5] Geoff Andersen, Olha Asmolova, Michael E Dearborn, et al. FalconSAT –7: a membrane photon sieve cubeSat solar telescope[C]//SPIE, 2012, 8442: 84421C.
- [6] Cheng Guanxiao, Xing Tingwen, Lin Wumei, et al. Design and fabrication of low-numerical-aperture amplitude-photon sieve [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(5): 2344–2347. (in Chinese)
程冠晓,邢廷文,林妩媚,等.微米孔阵列振幅型光子筛的设计和制作[J].*传感技术学报*, 2006, 19(5): 2344–2347.
- [7] Liu Minzhe, Liu Hua, Xu Wenbin, et al. Membrane photon sieve for space telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2127–2134. (in Chinese)
刘民哲,刘华,许文斌,等.用于空间望远镜的薄膜光子筛[J].*光学精密工程*, 2014, 22(8): 2127–2134.
- [8] Zhang Jian, Li Mengjuan, Yin Ganghua, et al. Large-diameter membrane Fresnel diffraction elements for space telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1289–1296. (in Chinese)
张健,栗梦娟,阴刚华,等.用于太空望远镜的大口径薄膜菲涅尔衍射元件[J].*光学精密工程*, 2016, 24(6): 1289–1296.
- [9] Zheng Yaohui, Ruan Ping, Cao Shang. Deployable structure design and analysis for space membrane diffractive telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0118004. (in Chinese)
郑耀辉,阮萍,曹尚.空间衍射薄膜望远镜展开机构设计与分析[J].*红外与激光工程*, 2016, 45(1): 0118004.
- [10] Yin Kewei, Huang Zhiqiang, Lin Wumei, et al. Effects of design parameters of diffractive optical element on stray light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3059–3064.

- (in Chinese)
 殷可为, 黄智强, 林妩媚, 等. 衍射光学元件设计参数对杂散光的影响[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 3059–3064.
- [11] Paul R Yoder, Jr. Opto-Mechanical Systems Design [M]. Zhou Haixian, Cheng Yunfang, Translated Beijing: China Machine Press, 2008: 676–679. (in Chinese)
- [12] Zhang Lei, Jia Xuezhi. Design and optimization of trussed supporting structure for off-axis three-mirror reflective space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(3): 603–608. (in Chinese)
 张雷, 贾学志. 大型离轴三反相机桁架式主支撑结构的设计与优化[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(3): 603–608.
- [13] Li Chang, He Xin. Design and optimization of trussed structure for space camera based on Rayleigh algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2405–2409. (in Chinese)
- 刘畅, 何欣. 基于 Rayleigh 算法的空间相机桁架结构设计与优化[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2405–2409.
- [14] Li Chuang, Wang Wei, Fan Xuewu. Advance in precision deployment techniques for space telescopes based on tape springs [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(2): 85–90. (in Chinese)
 李创, 王伟, 樊学武. 基于带状弹簧的空间望远镜精密展开技术进展[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(2): 85–90.
- [15] Roberto Gardi, Giulia Pica. Realization and preliminary tests on an innovative deployable structure for a high resolution telescope for microsatellite[C]//SPIE, 2004, 5570: 411–422.
- [16] Zhao Chao, Li Chuang, Zhou Nan. A deployable telescope imaging system with coilable tensegrity structure for microsatellite application[C]//SPIE, 2013, 8908(2): 165–189.