

基于带状弹簧的空间望远镜自展开机构设计

左玉弟^{1,2}, 金光¹, 谢晓光¹, 李宗轩¹, 解鹏¹

(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: 为了充分减小空间望远镜发射的质量和体积, 适应微小卫星的运载需求, 针对某光学系统设计了一种基于带状弹簧的新型空间望远镜自展开机构。首先, 根据理论分析确定了所用带状弹簧的几何尺寸, 并针对某空间光学系统设计了一种基于带状弹簧的新型展开机构; 其次, 建立了该展开机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: 该展开机构展开后的高度为 500 mm, 展开后的重复精度误差小于 0.1 mm, 偏心小于 0.1 mm, 且展开后的一阶自然频率为 35.5 Hz, 与有限元分析出的结果相符, 其误差为 5.3%, 能够满足空间望远镜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: 空间望远镜; 微小卫星; 光学系统; 带状弹簧; 展开机构

中图分类号: TH703 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0518002

Design of the spontaneous deployable mechanism for space telescope based on lenticular tape springs

Zuo Yudi^{1,2}, Jin Guang¹, Xie Xiaoguang¹, Li Zongxuan¹, Xie Peng¹

(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 reduce launch mass and volume of the space telescope apparently, and to make it suitable for the vehicle requirements of the microsatellite, a new spontaneous deployment mechanism of the space telescope based on the lenticular tape springs was designed, which aimed at one optical system. Firstly, the geometrical sizes of the lenticular tape spring used in this article were preliminarily designated through theoretical analysis, and a new spontaneous deployment mechanism based on the lenticular tape springs was designed aimed at one space optical system. Secondly, the finite element model of the deployment mechanism was built, and its deployment characters were analyzed. Finally, the prototype of the spontaneous deployment mechanism was built up and the experiment was carried out to study its characters. Experimental results indicate that the deployment mechanism is 500 mm in height when it has deployed, and the repetitive deploy accuracy of it can be reached much less than 0.1 mm, also, the fundamental frequency is about 35.5 Hz when it has deployed. It can satisfy the deployment mechanism's

收稿日期: 2016-09-05; 修订日期: 2016-10-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2015AA7015090)

作者简介: 左玉弟(1990-), 男, 博士生, 主要从事空间反射镜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, 主要从事星载一体化设计方面的研究。Email: jing@ciomp.ac.cn

requirements of simple structure, low mass, steady and reliable deployment, as well as higher precision for space telescope.

Key words: space telescope; microsatellite; optical system; lenticular tape spring; deployment mechanism

0 引言

卫星技术作为现代航天靶场中的重要一环,在未来航天技术的竞争中起着至关重要的作用。由于现代微小卫星具有高新技术含量高、成本低、研制周期短、质量小、体积小、可批量化生产等优点^[1],各国政府纷纷资助于微小卫星的研究,而利用微小卫星平台搭载展开式空间望远镜以获得高分辨率图像的技术也越来越受到研究人员的关注和重视。与传统的空间望远镜相比,展开式空间望远镜发射前收拢,入轨后展开,具有体积小、质量轻、发射成本低等优点^[2]。展开机构是展开式空间望远镜的关键技术之一。

近些年来,带状弹簧因具有较好的工程特性而成为国内外的研究热点,基于带状弹簧的展开机构也层出不穷。带状弹簧是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机构构造简单,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^[3]。

目前国外已经有多家研究机构开始研究基于带状弹簧的可展开空间望远镜技术。美国 Johns Hopkins 大学的 Bradley G. Boone 等人研究了用 4 根钢带支撑卡塞格林型望远镜的次镜^[4];美国 Kentucky 大学的 Jonathan T. Black 等人提出了采用 3 根碳纤维复合材料带状弹簧对卡塞格林型望远镜的次镜进行支撑的方案^[5];法国的 G. Aridon 等人基于并行控制技术提出了一种六足展开结构,展开过程由 6 个卷绕控制器驱动带状弹簧展开,次镜经过激光测量进行定位并校正^[6];国内对于空间可展开望远镜的研究起步较晚,相关报道也比较少,中国科学院西安光学精密机械研究所的赵超、李创等人针对一种卡塞格林式望远镜设计了一种次镜展开机构并进行了分析,但其结构复杂,展开效果并不是很理想,需要进一步优化设计^[7]。

针对某空间光学系统设计了一种基于带状弹簧的新型空间望远镜自展开机构,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:该展开机构能够重复可靠地展开,且能够满足光学系统的设计要求。

1 展开机构设计

1.1 光学系统指标及设计要求

文中的空间望远镜采用传统的卡塞格林式光学系统,其部分指标如表 1 所示。其中,该光学系统对展开机构的设计要求为:展开机构的质量不超过 3 kg、展开精度优于 0.1 mm,展开后的主次镜偏心误差优于 0.1 mm,一阶自然频率大于 25 Hz。

表 1 光学系统部分指标

Tab.1 Segmental indicator of the optical system

Primary mirror diameter/mm	Distance primary secondary/mm	Secondary focal diameter /mm	Telescope focal length/mm
350	520	86	3 200

1.2 带状弹簧的几何与物理参数

带状弹簧的几何及材料参数包括其厚度 t 、曲率半径 R 、角度 θ 、长度 L 、弹性模量 E 以及泊松比 μ ,其参数及弯曲形式如图 1 所示。文中所用的带状弹簧为日本进口的田岛(TaJlma)系列卷尺弹簧,其弹性模量为 200 Gpa,泊松比为 0.3。

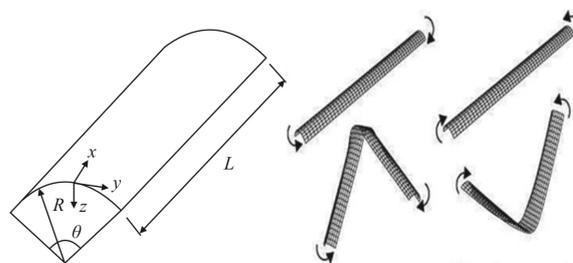


图 1 带状弹簧的几何参数及折叠形式

Fig.1 Geometrical parameters of the lenticular tape spring and its folding types

带状弹簧为开口柱面壳体,其正向屈曲与反向屈曲特性具有较大的差异。当带状弹簧受到反向弯

矩作用时,它在最初阶段会表现出较高的刚度,当外界弯矩达到临界弯矩 M_+^{\max} 后,其刚度会急剧降低并发生屈曲变形,且弯矩会逐渐达到稳态弯矩值 M_+^* ;当带状弹簧受到正向弯矩作用时,只需要较小的弯矩就可以使其发生屈曲变形,并最终达到稳态弯矩值 M_+^* [8],其弯矩-转角示意图如图 2 所示。因此,带状弹簧在反向屈曲过程中表现出的性能更加符合空间展开机构所需的展开动力学特性。

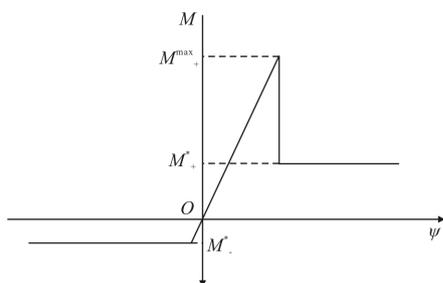


图 2 单根带状弹簧弯矩-转角示意图

Fig.2 Moment-rotation schematic of a tape spring

学者 Wuest [9] 通过研究带状弹簧的反向屈曲特性, 得出了单根带状弹簧反向屈曲过程中的力矩计算公式:

$$M = \int_{-s/2}^{s/2} (M_l - N_l w) dy = sD \cdot$$

$$\left(k_y + \frac{\mu}{R} - \mu \left(\frac{1}{R} + \mu k_y \right) F_1 + \frac{1}{k_y} \left(\frac{1}{R} + \mu k_y \right)^2 F_2 \right) \quad (1)$$

式中: $s=2R\sin(\theta/2)$ 为带状弹簧的宽度; M_l 和 N_l 分别对应单位长度的弯矩和轴向力; w 为平面外挠曲; y 为带状弹簧的纵向长度; $D=Et^3/12(1-\mu^2)$ 为弯曲刚度; k_y 为纵向曲率; F_1 和 F_2 可从公式(2)计算得到:

$$F_1 = \frac{2}{\lambda} \frac{\cosh\lambda - \cos\lambda}{\sinh\lambda + \sin\lambda}, F_2 = \frac{F_1}{4} - \frac{\sinh\lambda \sin\lambda}{(\sinh\lambda + \sin\lambda)^2} \quad (2)$$

式中: $\lambda = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)s} / \sqrt{t/k_y}$ 。 M_+^{\max} 为公式(1)的最大值,也是单根带状弹簧的临界弯矩,它体现了其自锁后抗干扰的能力(即支撑刚度), M_+^{\max} 值越大,带状弹簧的支撑刚度就越高。

由公式(1)可以看出,带状弹簧的弯曲特性取决于它所用的材料及其几何参数。带状弹簧的重要几何参数为厚度 t 与圆弧中心角 θ ,为便于研究这两个参数对带状弹簧屈曲特性的影响及敏感程度,文中采用单变量法进行分析。

分析时设定带状弹簧截面半径 $R=18\text{ mm}$, 则当其截面圆心角 θ 为 90° , 则不同厚度下其弯矩与弯曲曲率的关系曲线如图 3 所示; 同样地, 在带状弹簧的厚度 t 为 0.25 mm 时, 不同圆心角下其弯矩与弯曲曲率的关系曲线如图 4 所示。

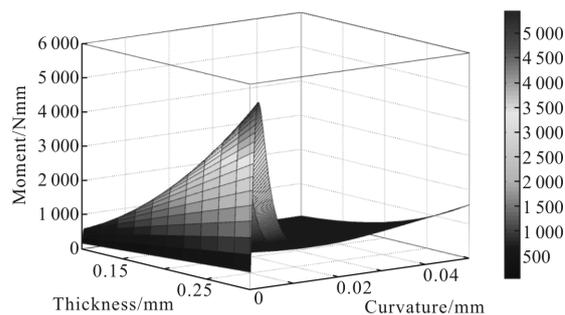


图 3 不同厚度下弯矩-曲率曲线

Fig.3 Moment-curvature graph under different thickness

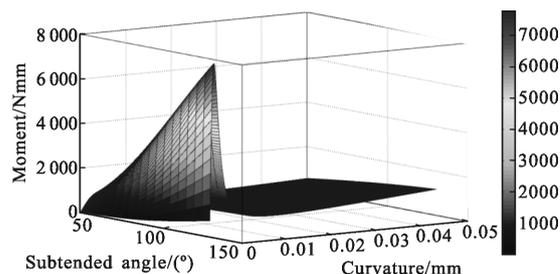


图 4 不同圆心角下弯矩-曲率曲线

Fig.4 Moment-curvature graph under different subtended angles

由图 3 及图 4 可知: 在截面圆心角 θ (或厚度 t) 为定量的情况下, 随着带状弹簧厚度 t (或截面圆心角 θ) 的增加, 其临界弯矩 M_+^{\max} 明显变大, 即支撑刚度增加, 厚度 t 对带状弹簧的弯矩影响更明显。

如果带状弹簧的临界弯矩值过大, 则其支撑刚度过高而不易折叠; 如果临界弯矩值过小, 则会导致其支撑刚度不够。由于文中次镜组件及其支架的质量为 0.68 kg , 主次镜间距为 520 mm , 为保守起见, 则所需单根带状弹簧的临界弯矩为: $M=0.68 \times 10 \times 520 / 2 = 1768\text{ Nmm}$ 。因此, 根据上述理论分析并结合文中实际设计需求, 决定文中所用的带状弹簧尺寸参数为: 圆心角 θ 为 80° , 厚度 t 为 0.2 mm , 长度 L 为 520 mm , 截面半径 R 为 18 mm , 其弯矩-曲率曲线如图 5 所示。该带状弹簧的临界弯矩 M_+^{\max} 为 1796 Nmm , 具有较高的支撑刚度, 它在达到临界弯矩前近似于锁定状态, 在达到临界弯矩后发生屈曲变形, 刚度迅速下

降,有利于空间展开机构展开过程中所需的动力学特性。

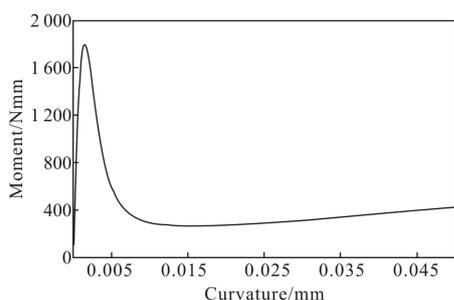


图 5 选用的带状弹簧弯矩-曲率曲线

Fig.5 Moment-curvature graph of the selected lenticular tape spring

1.3 展开机构结构设计

在对单根带状弹簧的屈曲特性进行分析并确定了保证其展开后支撑刚度的尺寸参数后,针对上述某光学系统进行了展开机构的初步设计,主光学系统的设计思想是把光学部分设计成为一个独立的部件,确定好与展开机构的接口关系后,装调工作可并行开展,加快工作进度^[10-11],可展开望远镜的整体结构设计如图 6 所示。

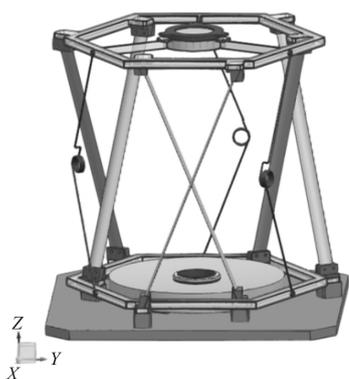


图 6 展开结构整体设计

Fig.6 Ensemble scheme of the deployable structure

其中,光学系统的主镜组件及展开机构通过螺纹接口连接在基板上,次镜组件则连接在展开机构的六边形框架上,该框架选用超硬铝合金材料,并在其表面加工凸台及安装接口以固定带状弹簧及其他零部件;在整个展开机构中共使用了 6 根带状弹簧,通过对比及优化设计,决定整体结构采用交叉布局“X”形式,这种布局形式不仅可以保证其支撑刚度,而且结构形式简单,同时还可以提高结构的整体扭转刚度^[12],其中,每根带状弹簧的两端分别采用两个

带有一定弧面的结构件压紧固定。

由于光学系统中主镜的口径为 350 mm,因此六边形框架的内切圆半径设计为 200 mm,带状弹簧采用之前选定的尺寸参数。整个展开机构展开后的高度为 500 mm,质量约为 2.5 kg。设计过程中,在整体结构加入了合适扭矩的扭簧,这样不仅可以保证展开机构平稳可靠地展开,而且还能够利用扭簧在其展开后为其提供一定的预紧力。

2 有限元分析

在完成了展开机构的初步设计之后,建立了其有限元模型(图 7)并进行分析。文中主要研究展开机构的特性,为了简便,在分析过程中,主、次镜组件分别采用质量点代替。由于可展开式空间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。

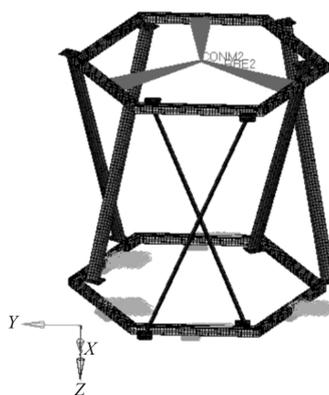


图 7 展开结构有限元模型

Fig.7 Finite element model of the deployable structure

经分析得出该展开机构在展开后的基频为 37.5 Hz,能够达到在轨展开后的基频使用要求;同时由于次镜的位置精度直接决定了光学系统的成像质量,望远镜展开后次镜沿光轴方向及垂直光轴方向的位移变形将会导致光学系统产生离焦及像散现象,并进一步降低成像质量,因此,必须对展开机构展开后的刚度特性及自重变形进行分析,以保证其刚度能够满足光学系统的成像及地面装调要求。为了分析研究该展开机构展开后的刚度特性,在次镜质量点处分别施加沿光轴方向的单位力、单位加速度及垂直光轴方向的单位力、单位加速度,其分析结果如表 2 所示。

表 2 力学变形结果

Tab.2 Displacement results under static loads

Load	Displacement of secondary mirror/mm
1.0 N	1.2e-3(axial)
1.0 g kg·m/s ²	1.3e-2(axial)
1.0 N(Shear)	2.8e-2(Off axis)
1.0 g kg·m/s ² (Shear)	7.1e-2(Off axis)

其中,表 2 中的第一行分析结果表明:该机构展开后在次镜处施加沿光轴方向 1 N 载荷时的最大变形量为 0.001 2 mm,第二行分析结果表明:该机构展开后沿光轴方向的自重变形为 0.013 mm,第三行分析结果表明:该机构展开后在次镜处施加沿垂直光轴方向 1 N 载荷时的最大变形量为 0.028 mm,第四行分析结果则表明:该机构展开后沿垂直光轴方向的自重变形量为 0.071 mm。由此可知,该展开机构在展开后具有较好的刚度特性,且其展开后沿光轴方向的自重变形为 0.013 mm,垂直光轴方向的自重变形为 0.071 mm,能够达到地面装调时的光学系统指标要求,这说明了该展开机构在轨展开后能够满足设计要求。

3 展开机构的实验研究

为进一步验证该展开机构的展开特性,在详细设计之后加工出了该展开机构的原理样机(图 8),并对其进行了实验研究。

3.1 展开实验

在完成展开机构的原理样机加工后,对其进行了展开实验,实验的首要目的是验证该展开机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,能否达到设计时的精度要求^[13-14]。实验过程中发现,在整体结构中加入扭簧部件后,该展开机构能够稳定可靠地展开并保持展开后的稳定状态,其展开时间大约为 1 s,该展开机构的收拢与展开状态如图 8 所示。

由图 8 可知,该展开机构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,通过在主次镜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重复检测该展开

机构的展开精度^[15]。测量结果表明:该展开机构重复展开精度优于 0.1 mm,展开后的主次镜偏心误差优于 0.1 mm,能够达到光学系统的设计要求。



(a) 收拢状态 (b) 展开状态
(a) Stowed state (b) Deployed state

图 8 展开机构原理样机

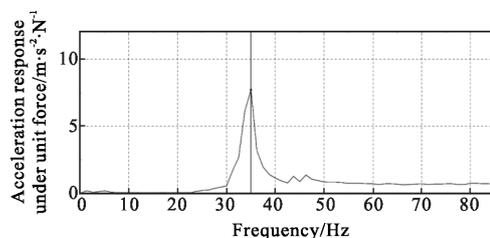
Fig.8 Prototype of deployment mechanism

经过多次重复展开及精度测量实验后,总结了影响展开机构展开精度的主要因素:(1) 带状弹簧的临界弯矩值及其达到临界弯矩值时所对应的弯曲转角对展开机构的展开精度影响较大,带状弹簧的临界弯矩值越大,或当其达到临界弯矩值时所对应的屈曲转角越小,展开机构的展开精度越高;(2) 带状弹簧的安装方式也会对展开机构的展开精度产生影响,在进行带状弹簧的安装固定时,应配合使用装调工装保证其安装角度,不能使其产生沿长度方向的扭转变形。

3.2 模态测试实验

为保证展开机构在展开后能够使光学系统正常工作,要求其必须具有良好的动态刚度,展开机构的前几阶自然频率越大,说明结构的动态刚度越高^[16-17]。为了验证该展开机构设计的合理性及上述有限元分析的准确性,对该原理样机进行了模态测试。

在模态测试过程中,采用北京东方振动和噪声技术研究所研制的 DASP V10 动态信号采集系统作为模态测试系统,并用锤击法进行了多次模态敲击实验。经测试,该原理样机展开后的基频约为 35.5 Hz(图 9),这表明实验结果很好地吻合了分析结果,其误差约为 5.3%,能够达到光学系统的设计要求,由此验证了之前有限元分析的正确性及设计的合理性。



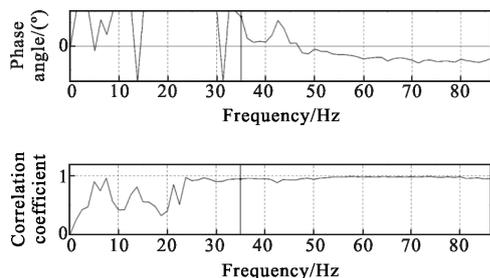


图 9 展开机构模态测试结果

Fig.9 Modal test result of the deployment mechanism

4 结论

文中首先对单根带状弹簧的屈曲特性进行分析并确定了保证其展开后支撑刚度的尺寸参数；然后针对某空间光学系统，设计了一种新型空间望远镜自展开机构，其质量约为 2.5 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，其展开时间大约为 1 s；该展开机构原理样机展开后的高度为 500 mm，其重复展开精度优于 0.1 mm，且其展开后主次镜偏心误差优于 0.1 mm，基频约为 35.5 Hz，在各个方向都具有比较高的刚度，能够满足光学系统的设计指标，同时也可以为之后的空间望远镜自展开机构设计提供一定的参考价值。

参考文献：

- [1] Xu Fuxiang. Introduction of Satellite Engineering [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2003. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] Seffen K A, Pellegrino S. Deployment dynamics of tape springs [C]//Proceedings of the Royal Society of London, 1999, 455: 1003–1048.
- [4] Boone B G, Bruzzi J R, Kluga B E, et al. Development and testing of an actively-controlled large aperture Cassegrain telescope for spacecraft deployment [C]//SPIE, 2004, 5487: 1042–1053.
- [5] Black J T, Whetzal J A, Deblonk B J, et al. Deployment repeatability testing of composite tape springs for space optics applications[C]//Collection of Technical Papers–AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. 2006.
- [6] Aridon G, Almajid A, Demond D, et al. A Self-deployment hexapod model for a space application [J]. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2009, 4(1): 651–658.
- [7] 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.
- [8] O’mer Soykasap. Analysis of tape spring hinges [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2007, 49: 853–860.
- [9] Wuest W. Einige anwendungen der theorie der zylinderschale [J]. *Zeitschrift fur Angewandte Mathematik and Mechanik*, 1954, 34: 444–454.
- [10] Guo Peng, Zhang Jingxu, Yang Fei, et al. Design and buckling analysis of TMT tertiary mirror cell assembly flexure structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3650–3655. (in Chinese)
- [11] Zhang Lei, Yao Jinsong, Jia Xuezhong, et al. Development of trusses made of Carbon fiber composites for coaxial space remote sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(9): 1968–1973. (in Chinese)
- [12] Eigenmann M, Schmalbach M, Schiller M, et al. Ultra-light deployment mechanism (UDM) for sectioned large deployable antenna reflectors [C]//14th European Space Mechanisms & Tribology Symposium–ESMATS 2011, 2011: 479–481.
- [13] Giulia Pica, Luca Ciofaniello, Stefania Mattei, et al. High resolution deployable telescope for satellite application [C]//SPIE, 2004, 5234: 531–538.
- [14] 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.
- [15] Feng Xuegui, Li Chuang, Zhao Chao. New measurement of the alignment of the deployable telescope [C]//SPIE, 2012, 8417(35): 1–7.
- [16] Li Zongxuan, Zhang Lei, Yao Jinsong, et al. Design of Cartwheel Bi-axial flexural hinge [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(9): 2317–2324. (in Chinese)
- [17] Fu Shixin, Zhou Chao, Cao Yuyan, et al. Structural design of 4 m telescope mount base based on topology optimization method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2441–2447. (in Chinese)