

# 基于带状弹簧的空间望远镜精密展开技术进展

李 创, 王 炜, 樊学武

(中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

**摘要:**采用带状弹簧构造的可折叠多杆并联结构对卡塞格林型望远镜的次镜进行支撑,并结合在轨调节,可以实现口径 $<1\text{ m}$ 的可展开空间望远镜。描述了基于带状弹簧的可展开空间望远镜的结构特点,介绍了近年来发表的四杆支撑、八杆支撑、三杆支撑和六杆支撑等4种基于带状弹簧的空间望远镜精密展开技术的研究进展。建议针对带状弹簧空间望远镜的精密展开技术,应进一步开展结构动力学建模、结构优化以及误差的光电测量和校正等方面的研究。此外,在模拟微重力环境下展开实验也有助于推动展开动力学和展开精度的研究,而非对称展开结构将是今后该项技术的研究方向之一。认为开展基于带状弹簧的空间望远镜精密展开技术的研究将促进基于微小卫星平台的高分辨率遥感成像和自由空间光通信技术的发展。

**关键词:**空间望远镜;精密展开;带状弹簧

**中图分类号:**TP73 **文献标识码:**A

## Advance in precision deployment techniques for space telescopes based on tape springs

LI Chuang, WANG Wei, FAN Xue-wu

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** A deployable space telescope with an aperture bellow one meter can be realized easily by using foldable multi-pod parallel structures based on tape springs to support the secondary mirror of a Cassegrain-type telescope and by adjusting the structures on orbit. This paper introduces the structural features of the deployable space telescopes based on tape springs, and presents the research advances in the four techniques published in recent years for the space telescope precision deployments based on tape springs, namely, quadripod, octapod, tripod, and hexapod supports. It suggests that research on the precision deployments of space telescopes based on tape springs in future should put the focuses on the modelling and optimizing of deployment structures and the measurement and correction of the deployment deviation. Moreover, making an experiment in simulated gravity environments will be conductive to better research on the structure dynamics and deployment precision. Also, the development of an asymmetric deployable structure is a good choice for an off-axis telescope. Finally, it indicates that the improvement of deployment structures for space telescopes reported here will be a promising technique for high-resolution remote sensing imaging and free space optical communications.

**Key words:** space telescope; precision deployment; tape spring

## 1 引言

从农业估产到灾害监测,从民用资源调查到军事侦察,从深空探测到自由空间光通信,大口径空间望远镜有着广泛的用途,但是其应用经常受到装备有大口径空间望远镜的大卫星制造成本高、研制周期长、敏捷性差等因素制约。为了突破这些限制,各国政府纷纷资助研究基于微小卫星平台的大口径空间望远镜技术,其中,一个重要的研究方向是研究与微小卫星平台兼容并能在几百公里轨道高度上获得1 m级地面分辨率的超轻型空间望远镜技术。这类超轻型光学望远镜需要满足尺寸小、重量轻及敏捷性高的要求,口径大致为0.3~1 m,可用于被动高分辨率成像和 $1^\circ \times 1^\circ$ 左右视场的主动探测、深空光通信,也可用于行星探测等。现今空间望远镜超稳定的整体型结构型式无法很好地满足这些要求,因此需要研究大口径光学望远镜新的结构形式,比如可展开空间望远镜。由于可展开空间望远镜的结构通过在轨展开达到工作状态,改变了传统光机结构设计思想,可以使用以前较少使用的材料及连接方式。

20世纪60年代,为了突破火箭整流罩尺寸对航天器外形尺寸的限制,研究人员发展了空间可展开结构技术<sup>[1]</sup>。空间可展开结构以前主要用在空间可展开天线、太阳帆板、伸展臂和空间平台等方面,目前也用来研制可展开空间望远镜。针对极大口径空间望远镜,研究人员提出了很多可展开空间望远镜方案。这些方案不仅采用可展开的次镜支撑结构技术,而且采用了可展开反射镜技术。这些针对光学望远镜的可展开技术,精度要求极高,尤其是空间可展开反射镜技术,需要很长时间才能成熟,而且制造成本也很高,但对于口径在1 m以下的大口径空间望远镜来说,由于不需要采用空间可展开反射镜,只需采用可展开的次镜支撑结构,更容易实现可展开空间望远镜。采用这种可展开的次镜支撑结构可以产生显著的减重效果,并大大缩小发射体积。

## 2 基于带状弹簧的可展开空间望远镜

### 2.1 可展开次镜支撑结构

对于采用可展开的次镜支撑结构的空望远镜来说,卫星发射时,次镜支撑结构是折叠起来的,发射入轨后再展开。这种在轨展开后的次镜支撑结构可能达不到成像所要求的位置精度,需要在轨调节装置对展开误差进行校正,才能得到令人满意的性能。由于入轨后会对展开后结构的展开误差及长期几何误差进行校正,因此大大降低了发射时的尺寸稳定性要求。为了确保展开后光学系统能够工作,为在轨校正提供图像依据,次镜支撑结构必须具有一定的展开精度,能够达到拍摄图片的基本要求。

与传统的整体型非展开式望远镜结构相比,这种具有可展开次镜支撑结构的空望远镜结构的主要优点是:

(1)减小了转动惯量和重量:发射成本降低,系统自主性增加,敏捷性增强。

(2)缩小了体积:使微小卫星能够承载大口径长焦距的空间望远镜,易于满足一箭多星发射对卫星搭载体积的要求。

(3)降低了稳定性要求:放宽对空间望远镜结构的发射振动极端稳定性要求,最终结构只由展开及在轨调节决定。

### 2.2 基于带状弹簧的可展开次镜支撑结构

空间可展开结构的展开驱动方式可分为:电机驱动、弹簧驱动、自伸展驱动、充气驱动、弹性恢复驱动等。对于口径在1 m以下的可展开空间望远镜来说,其主镜与次镜之间的间隔大约在1 m左右,从展开结构的精度、设计、体积、重量、复杂性等评价标准来看,利用带状弹簧构造可展开的次镜支撑结构具有很多优点。

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,可以利用其弹性恢复变形,实现可展开结构<sup>[2,3]</sup>。这种可展开结构利用折叠时积聚的弹性应变能实现结构的自动展开而不需要其它的动力装置;在展开之后,又能够靠自身的刚度提供可展开结构所需的锁定力,而不需要另外加设锁定装置。基于带状弹簧的可展开结构构造简单,比刚度大,制造成本低,没有机械关节,能可靠地自行展开,一旦伸直则不易弯曲。从展开尺寸与折叠尺寸来看,带状弹簧结构提供了极高的折叠效率。

对于口径在 1 m 以下的可展开空间望远镜来说,可以采用基于带状弹簧的可折叠多杆并联结构实现对次镜的支撑,并借助在轨调节装置使展开后的次镜支撑结构达到光学系统所要求的位置精度。这种基于带状弹簧的可展开空间望远镜具有重量轻、刚度高、精度好和简单可靠的优点。

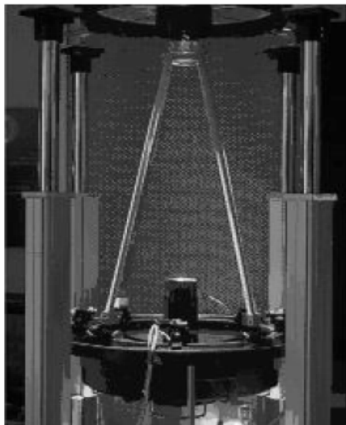
### 3 研究现状

国外已经有多家研究机构开始研究基于带状弹簧多杆并联结构的可展开空间望远镜技术,先后提出了四杆、八杆、三杆和六杆支撑结构。

美国 Johns Hopkins 大学 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<sup>[4]</sup>,如图 1 所示。实验中,主镜直径 355 mm,主次镜间隔 654 mm,每根钢带弹簧长 635 mm。该可展开空间望远镜通过 4 束激光测量主次镜之间的对准情况,并用倾斜/偏转及平移式促动器进行准



(a) 收缩状态  
(a) Stowed state



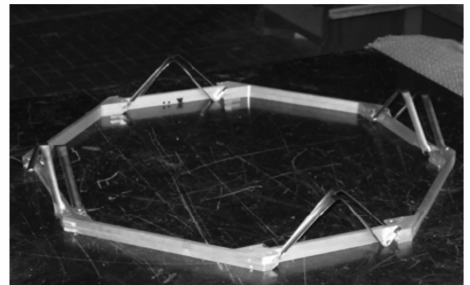
(b) 展开状态  
(b) Deployed state

图 1 4 根钢带组成的可展开结构

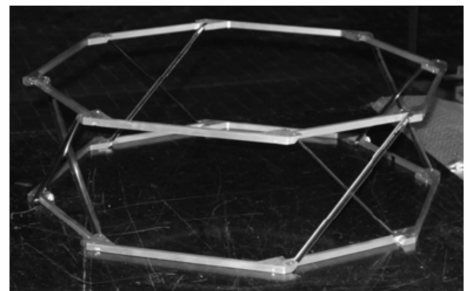
Fig. 1 Deployable structure comprised of four steel tape longerons

静态偏移校正及动态运动补偿。实验结果表明,倾斜/偏转及平移式促动器控制能够使可展开望远镜达到指向精度和成像分辨率所要求的  $1 \mu\text{rad}$  的精度,动态范围足够校正  $1 \text{ mrad}$  的偏差。结合此超轻型卡塞格林型望远镜,Boone 等人还研究了用于空间飞行器的自由空间光通信终端体系结构<sup>[5]</sup>。

意大利 Giulia Pica 等人提出了用于高分辨率对地观测卫星的可展开望远镜概念<sup>[6]</sup>,其可展开结构由带状弹簧连接的 5 个八边形环组成。对应的望远镜光学系统中,主镜直径 400 mm,次镜直径 100 mm,主次镜间隔 520 mm。在此基础上,意大利 Naples 第二大学的 Roberto Gardi 等人采用粘接有粘弹性阻尼的不锈钢带状弹簧实现了这种可展开结构<sup>[7]</sup>。该可展开结构的主体为并列的 5 个八边形刚体环,相邻的八边形刚体环之间由 8 根带有粘弹性阻尼的带状弹簧来连接,如图 2 所示。该结构还采用扭转弹簧解决了带状弹簧与八边形环之间的初始摩擦力,实现了自行展开。



(a) 收缩状态  
(a) Stowed state



(b) 展开状态  
(b) Deployed state

图 2 基于带状弹簧的八边形展开结构

Fig. 2 Octagon deployable structure based on tape springs

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<sup>[8]</sup>,如图3所示。在模拟实验中,模拟主镜直径305 mm,次镜直径102 mm,主次镜间隔305 mm,每根带状弹簧长321 mm。实验结果表明,该三杆可展开结构的展开重复精度在50  $\mu\text{m}$ 的量级。Whetzal等人进一步通过实验研究了这种复合材料三杆可展开结构的动态稳定性<sup>[9]</sup>。在模拟实验中,模拟主镜直径1.0 m,主次镜间隔1.41 m,每根带状弹簧与垂直方向的夹角为15°。在多次折叠/展开中,带状弹簧三杆支撑系统展开后的基频均保持在11.4 Hz,表明其动态刚度在多次折叠/展开循环后没有下降。

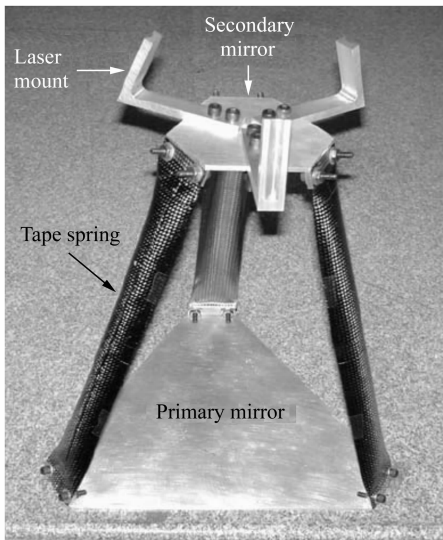


图3 由碳纤维复合材料带状弹簧构成的三杆支撑结构

Fig.3 Tripod support structure comprised of carbon-fiber-composite tape springs

法国 Alcatel 空间公司的 Laurent Ianchard 等人针对将来空间观测仪器的要求,提出了采用带状弹簧的可展开六杆结构概念<sup>[10]</sup>,如图4所示。该可展开六杆结构利用带状弹簧卷绕装置下方的6个垂直促动器可以校正6个自由度,消除展开误差和长期偏差,并通过自适应光学达到最终的光学性能。实验装置高500 mm,每坐标轴上同时平动能力为 $\pm 2$  mm,绕X和Y坐标轴转动能力为 $\pm 2^\circ$ ,Z轴为 $\pm 3^\circ$ 。实验结果表明,最大平动和转动展开误差分别为240  $\mu\text{m}$ 和700  $\mu\text{rad}$ ,在校正范围内。

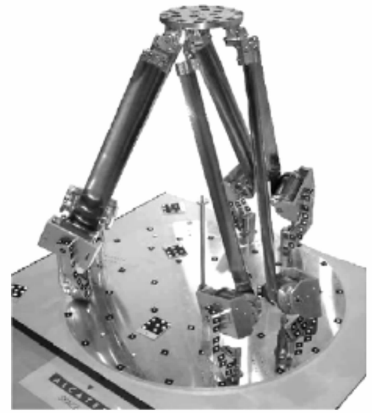


图4 带有6个促动器的带状弹簧六杆结构

Fig.4 Tape-spring hexapod with six actuators

法国的 G. Aridon 等人的多次展开实验表明,六杆结构中带状弹簧杆上端采用厚的连接片(如图5所示)能够提供更好的展开重复性和更高的系统刚度<sup>[11]</sup>。对这种采用带状弹簧的可展开六杆结构进行了非线性有限元分析,数值分析

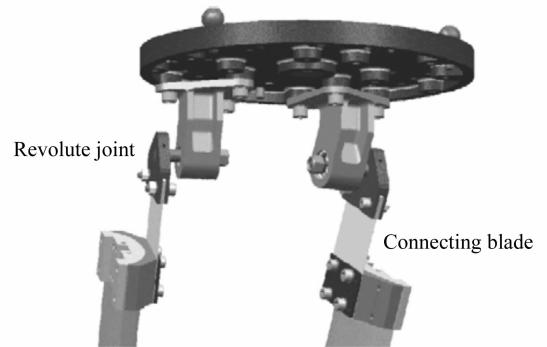


图5 带状弹簧的上端连接

Fig.5 Upper junction of tape-springs

结果与原理样机实验测得的模态形状和基频能够很好匹配。利用线性弹性六杆模型,识别了六杆结构的 Jacobian 矩阵,并计算了六杆结构的理论校正能力,结果表明,带状弹簧杆上端连接片的厚度对系统的校正能力没有显著影响,从而可以去掉连接片,通过带状弹簧的柔性来保证六杆结构的运动学要求。

法国的 G. Aridon 等人还提出了基于6根带状弹簧折叠储存应变能释放的六杆自展开模型<sup>[12]</sup>。在该模型中,滞后行为通过6个恢复力模型描述。采用 Lagrangian 方法,推导出六杆系统

的正解方程,并与递归 Newton-Euler 方法实现的数值法模型进行了算例比较,两种模型计算结果一致。采用所提出的恢复力模型,分析了卫星平台激励对六杆展开性能的影响。分析结果表明,在  $0 \sim 200$  Hz,  $230 \mu\text{m}$  振幅以下,该六杆系统能够成功展开。

国内很多单位也进行了空间可展开望远镜的研究。西安电子科技大学的杨东武等人研究了空间可展开望远镜的结构动力优化设计<sup>[13]</sup>,并建立了可展开主镜的动力学模型。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的刘磊等人研究了空间大口径望远镜可展开式反射镜单元镜支撑技术<sup>[14]</sup>。北京空间机电研究所的李瀛搏等人对几种典型空间光学精密展开机构进行了分析比较<sup>[15]</sup>,给出了空间精密展开机构的设计建议。中国科学技术大学的王翔等人以直径为  $2 \text{ m}$  的卡塞格林型望远镜为目标<sup>[16]</sup>,对其主反射镜和次镜的折叠、展开原理机构进行了初步分析,分别对主镜剖分后的子镜和次镜的展开、定位和锁紧等运动及其结构进行了分析和选择,给出了一种可展开空间望远镜的概念设计方案。中国空间技术研究院的刘志全等人提出了基于赫兹接触理论的空间光学遥感器主镜展开机构重复定位精度分析方法<sup>[17]</sup>。在带状弹簧可展开结构方面,浙江大学的王俊等人研究了空间可展开结构卷尺铰链的设计与分析<sup>[18]</sup>,并进行了卷尺铰链驱动太阳翼展开的初步实验。

## 4 结束语

由上述国内外研究现状可以看出,基于带状

弹簧的空间望远镜精密展开技术仍然处在研究阶段,还未成熟,需要在理论和实验两方面进行深入研究。这主要包括:

### (1) 展开结构动力学建模研究

对基于带状弹簧的展开过程进行建模与仿真,综合分析带状弹簧的屈曲、展开的摩擦力、展开的滞后效应、展开的阻尼及冲击、多个弹簧展开顺序等对展开精度的影响。

### (2) 展开结构优化设计研究

对带状弹簧的材料、截面尺寸、收缩卷绕装置、释放展开机构等进行优化设计。

### (3) 展开误差的光电测量研究

研究展开误差的光电测量及信号处理系统。

### (4) 展开误差校正研究

研究采用促动器对展开误差进行自动校正。

### (5) 模拟微重力环境展开实验研究

通过实验研究模拟微重力环境下的展开动力学特性及展开精度。

### (6) 非对称展开结构研究

在当前的基于带状弹簧的可展开望远镜研究中,次镜位于主镜的正上方,带状弹簧长度相同,空间分布对称。当研究离轴空间望远镜的可展开技术时,由于次镜避开主镜,需要研究基于带状弹簧的非对称精密展开结构。

开展基于带状弹簧的空间望远镜精密展开技术研究将推动超轻型空间望远镜技术的发展,加快我国在可展开空间望远镜方面的研究步伐,促进基于微小卫星的高分辨率遥感相机和自由空间光通信技术的发展。

## 参考文献:

- [1] 陈务军,张淑杰. 空间可展结构体系与分析导论(第一版)[M]. 北京:中国宇航出版社,2006.  
CHEN W J,ZHANG S J. *Deployable Space Structures and Analysis Theory(The 1st edition)*[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2006. (in Chinese)
- [2] SEFFEN K A,PELLEGRINO S. Deployment dynamics of tape springs[C]. *Proceedings of the Royal Society of London,A*, London:UK,1999,455:1003-1048.
- [3] YEE J C H,SOYKASAP O,PELLEGRINO S. Carbon fibre reinforced plastic tape springs[C]. *Collection of Technical Papers-AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. Gossamer Spa.,2004,3305-3313.
- [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[J]. *SPIE*,2004,5487:1042-1053.

- [5] BOONE B G, BRUZZI J R, MILLARD W P, *et al.*. Optical communications development for spacecraft applications: recent progress at JHU/APL[C]. *IEEE Aero. Conf.*, 2005:1570-1582.
- [6] PICA G, CIOFANELLO L, MATTEI S, *et al.*. High resolution deployable telescope for satellite application[J]. *SPIE*, 2004, 5234:531-538.
- [7] ROBERTE G, PICA G. Realization and preliminary tests on an innovative deployable structure for a high resolution telescope for microsatellite[J]. *SPIE*, 2004, 5570:411-422.
- [8] BLACK J T, WHETZAL J A, DEBLONK B J, MASSARELLO J J. 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
- [9] WHETZAL J A, DEBLONK B J. Dynamics of meter-class deployable composite structures for optical systems[C]. *Collection of Technical Papers: 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 2008.
- [10] BLANCHARD L, FALZON F, DUPUIS J, MERLET J P. Deployable hexapod using tape-springs[C]. *ESA/CNES Symposium, Marseille*, 2005.
- [11] ARIDON G, BLANCHARD L, ALLEZY A, REMOND D, DUFOUR R. On the correction capability of a deployed tape-spring hexapod[J]. *Mech. Mach. Theory*, 2008, 43(8):1009-1023.
- [12] ARIDON G, MAJID A A, BLANCHARD L, *et al.*. A self-deployment hexapod model for a space application[J]. *J. Comput. Nonlinear Dynam.*, 2009, 4:011002.
- [13] 杨东武, 段宝岩, 仇原鹰. 空间可展开望远镜结构动力优化设计[J]. *中国机械工程*, 2006, 17(增刊):241-245.  
YANG D W, DUAN B Y, QIU Y Y. Dynamics optimization design of a deployable space telescope structure[J]. *China Mechanical Eng.*, 2006, 17(supp.):241-245. (in Chinese)
- [14] 刘磊, 高明辉. 空间可展开式望远镜反射单元镜支撑技术[J]. *光学技术*, 2006, 32(3):343-345.  
LIU L, GAO M H. Support technique of deployable unit mirror[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(3):343-345. (in Chinese)
- [15] 李瀛搏, 傅丹鹰, 王永辉, 等. 空间光学精密展开机构展开方法的初步探讨[J]. *航天返回与遥感*, 2007, 28(3):11-18.  
LI Y B, FU D Y, WANG Y H, *et al.*. The preliminary discussion on deployment approach of space optical-precision deployable mechanisms[J]. *Spacecraft Recov. R. Sen.*, 2007, 28(3):11-18. (in Chinese)
- [16] 王翔, 张广宇, 初昶波, 等. 空间大口径望远镜可展开镜片系统的概念设计[J]. *机械设计与研究*, 2004, 20(6):49-52.  
WANG X, ZHANG G Y, CHU C B, *et al.*. Concept design for deployable large-aperture optical structure of space telescopes[J]. *Machine Design and Research*, 2004, 20(6):49-52. (in Chinese)
- [17] 刘志全, 孙国鹏. 空间光学遥感器主镜展开机构重复定位精度分析[J]. *中国空间科学技术*, 2008, 28(1):27-34.  
LIU Z Q, SUN G P. Analysis of repeatability of the primary mirror deployment mechanism for space optical remote sensors[J]. *Chinese Space Science and Technol.*, 2008, 28(1):27-34. (in Chinese)
- [18] 王俊, 关富玲, 周志钢. 空间可展结构卷尺铰链的设计与分析[J]. *宇航学报*, 2007, 28(3):720-726, 746.  
WANG J, GUAN F L, ZHOU Z G. Design and analysis of tape hinge for deployable structures[J]. *J. Astronautics*, 2007, 28(3):720-726, 746. (in Chinese)

作者简介:李 创(1970—),男,陕西人,副研究员,主要从事光学遥感技术研究。E-mail:lichuang@opt.ac.cn