

## 空间薄膜衍射望远镜展开结构设计与分析

郑耀辉<sup>1,2</sup>, 阮萍<sup>1</sup>, 曹尚<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为满足空间探测对大孔径空间衍射望远镜的需求, 提出了一种空间薄膜衍射望远镜主镜展开的结构形式。首先分析了大孔径空间衍射望远镜成像的特点, 提出大孔径空间薄膜衍射望远镜主镜展开对结构设计的要求。然后根据这些设计要求设计了一种新型的展开结构形式, 使用三维建模软件 Solid Works 对提出的模型进行三维建模。最后使用 Adams 对展开结构模型进行仿真分析。对虚拟样机进行初步仿真结果表明, 该展开结构在旋转驱动的驱动下各部件可以按照设计的运动形式展开, 且运动平稳、可靠。所提出的主镜折叠展开结构为大孔径空间衍射望远镜主镜展开结构设计提供了一种新的思路。

**关键词:** 衍射望远镜; 展开机构; 折叠方式; 空间光学

**中图分类号:** TH751.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0118004

## Deployable structure design and analysis for space membrane diffractive telescope

Zheng Yaohui<sup>1,2</sup>, Ruan Ping<sup>1</sup>, Cao Shang<sup>1,2</sup>

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to satisfy the demand for the big aperture diffraction space telescope, a primary lenses deployable structure for space membrane diffractive telescope was investigated. Firstly, after analysis of the characteristics of diffraction imaging about the big aperture membrane diffraction telescope, the main requirements for deployable structure were put forward. Then according to these design requirements for the deployable structure, a 3D solid model was designed. Finally, with the help of Adams, a simulation model was established and analyzed. The results show that the structure under the driving of the rotating drive components is in line with the design form of exercise and achieved smooth and reliable movement. This deployable structure may provide a new train of thought for the design of large aperture membrane diffraction telescope.

**Key words:** diffractive telescope; deployable mechanism; fold methods; space optics

收稿日期: 2015-05-11; 修订日期: 2015-06-14

基金项目: 中国科学院西安光学精密机械研究所知识创新工程试点项目(Y551A21213)

作者简介: 郑耀辉(1989-), 男, 硕士生, 主要从事精密机械结构设计方面的研究。Email: ZhCourage@163.com

导师简介: 阮萍(1967-), 女, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事机载与星载光学遥感仪器等方面的研究。Email: ruanp@opt.ac.cn

## 0 引言

传统的空间望远镜多采用反射式结构,但是随着主镜尺寸的增大,结构的质量呈指数倍增加。采用新型轻质材料可以降低主镜的面密度,但是为了保证装配的精度需要复杂的支撑结构,实际是把主镜加工的难度转移到了结构设计上。而用平面透射薄膜作物镜的空间望远镜可以克服传统望远镜的缺点,达到结构简单且具有超轻的质量和宽松的面型精度要求。这是因为与反射光学元件相比透射光学元件对镜面误差不敏感,对于给定的表面误差,反射光学元件比透射光学元件引进更大波前误差。这样就降低了透射光学元件的制造精度,从而大大降低了制造的成本。并且制造和装备这种轻量级的薄膜与相同类别的反射镜相比要便宜<sup>[1-2]</sup>。

目前国外研究机构研究的方向主要集中在两点,第一衍射薄膜材料以及衍射效率,第二机械机构展开折叠的方式以及演示样机制造。利弗莫尔实验室和 NeXolve 的团队通过加工复杂的多级模式把衍射效率从 35% 提升到 55%。美国劳伦斯-利弗莫尔林肯实验室(LLNL)则研制了口径为 5 m 的衍射望远镜演示样机,并讨论了大口径平面薄膜衍射物镜的折叠和展开方法,验证了方案的可行性<sup>[3]</sup>。2010 年 3 月,美国国防部先进研究计划署启动 MOIRE (Membrane Optical Imager Real-time Exploitation) 计划,MOIRE 采用的是直径为 10 m 的衍射薄膜主镜<sup>[4]</sup>。中科院长春光机所早在 2007 年就有人提出衍射望远镜光学系统设计的方案,随后北京空间机电研究所也开展了一些研究,但是目前国内尚未见到关于大口径薄膜衍射物镜折叠和展开结构的相关报道。

针对衍射薄膜材料的特点和空间发射的需求,设计了一个口径为 5 m 的衍射望远镜折叠与展开结构,该结构在发射时折叠,进入轨道后展开,后期不工作时折叠有利于回收,减少空间垃圾。首先使用 Solid Works 建立该折叠展开结构的三维模型,然后利用 Adams 对展开过程进行仿真,仿真结果表明该展开机构能够按照设计要求平稳展开。验证了展开机构设计的合理性,能够满足使用要求。

## 1 衍射成像原理

衍射成像是利用光波的衍射原理对光波传播方向进行偏折成像的一种方法。衍射成像的关键是衍射光学元件的设计与加工。现在使用的衍射光学元件大多是连续表面三维浮雕结构的衍射光学元件 DOE(Diffraction Optical Elements)。衍射光学元件的最大优点是可以做得很薄,大大降低了镜头的质量。使用衍射镜头作为空间望远镜主镜最大的缺点是其色散。因为衍射望远镜只能对极窄频谱范围内的光线精确聚焦,要想实现衍射透镜的宽带应用就要对其进行色差校正<sup>[5-6]</sup>。传统的折射透镜通常采用不同色散的玻璃组合做成胶合结构,可以在某一频谱范围内实现色差校正。但衍射透镜却不能简单地用同样的方法校正色差,因为所有衍射元件具有相同的色散特性,即衍射元件的阿贝数只与波长有关:

$$V_0 = \frac{\lambda_0}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (1)$$

式中: $\lambda_0$  为设计波长; $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别是所用波段的最短波长和最长波长。

Schupmann 提出任何一个有色差的光学元件,其色差的校正可通过将与第一个元件具有相同色散、相反光焦度的元件放在第一个元件的共轭像位置来实现。这个原理的优点是可以实现全波段消色差,而不是局限在某一个较窄的频谱范围内<sup>[7-9]</sup>。基于 Schupmann 理论的衍射望远镜系统的结构如图 1 所示。

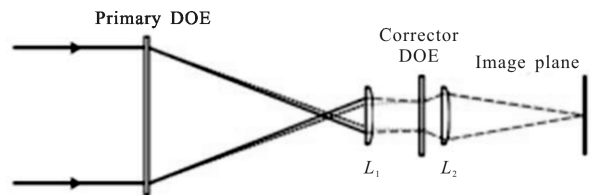


图 1 基于 Schupmann 理论的成像系统配置

Fig.1 Imaging system configuration based on Schupmann

用作衍射光学薄膜的衬底材料是由 NeXolve 公司生产的特殊的聚酰亚胺材料 Novastrat,这种材料的热膨胀系数很小而且可以根据不同的应用需求在 50~ -10 ppm/°C(1 ppm=10<sup>-6</sup>)的范围内进行调整。其特性如表 1 所示,图 2 给出了测试得到的 Novastrat 热膨胀系数(CTE)变化曲线<sup>[9]</sup>。

表 1 典型的 Novastrat 材料特性

Tab.1 Typical Novastrat material characteristics

| Parameter                   | Mean   | Standard deviation |
|-----------------------------|--|--------------------|
| CTE                         | 0.80 ppm/°C                                  | 2.63 ppm/°C        |
| CME                         | 9.2 ppm/%RH                                  | 0.3 ppm/%RH        |
| Outgassing                  | 0.57%  | 0.11%              |
| Tensile strength            | 41.6 ksi                                     | 1.0 ksi            |
| Transmission                | 86%  | n.a                |
| Creep<br>(1.5 ksi, ambient) | 0.41%(overall)<br>0.08%<br>(non-recoverable) | n.a                |

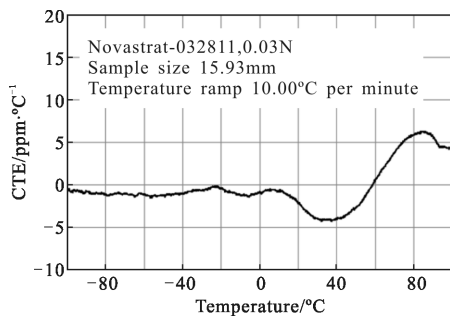


图 2 Novastrat 热膨胀系数测试结果

Fig.2 Novastrat CTE test results

## 2 展开机构的设计

### 2.1 主镜分块与折叠方法

主镜的分块及折叠方式直接影响着整个光学系统的性能与收拢效率(展开体积与收拢体积之比),是整个可展开光学系统设计的基础与重点。不同分块及折叠方式的选择对应不同的展开机构机械设计,一种合适的分块方式能够决定后续设计的走向与整个设计的优劣性。

一般情况下尺寸在 4 m 以下的镜头可以不用采取折叠方案,但是更大尺寸镜头的望远镜就需要采用空间展开结构。反射式望远镜的支撑以及展开机构都在背面,但是衍射望远镜的主镜是一个透镜,太多的遮拦会严重影响成像的质量。在进行结构设计时,衍射薄膜望远镜主镜的支撑以及展开结构的尺寸不能太大,但是要有足够的刚度。基于对平面薄膜衍射物镜的研究,提出 5 m 主镜的分块以及折叠方式如图 3 所示。分块时还要考虑到支撑结构的刚度以及目前能够加工出的衍射薄膜透镜的最大尺寸。

综合各方面的因素文中采用的分块方案主镜由 12 块结构完全相同的子块组成,折叠后的结构成中心轴对称。

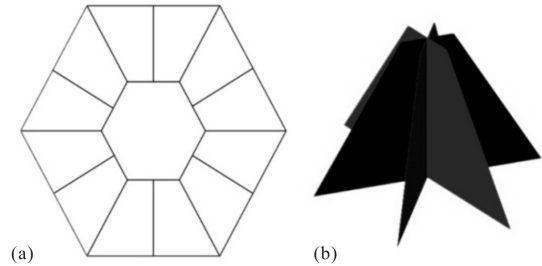


图 3 主镜分块与折叠状态

Fig.3 Segmentation and fold configuration

### 2.2 展开机构的设计

主镜展开机构是空间机构的一种,除了要满足质量轻、结构紧凑、适应空间环境和高可靠性等特点外,主镜展开机构还必须具有高精度、高刚度及高稳定度的特点。透射薄膜衍射望远镜和传统反射式望远镜相比在进行展开机构设计的过程还要注意减少背部遮拦。

根据上文提出的主镜展开机构的设计要求,结合提出的主镜分块以及折叠方法进行设计。空间薄膜衍射望远镜主镜展开机构的原理如图 4 所示。

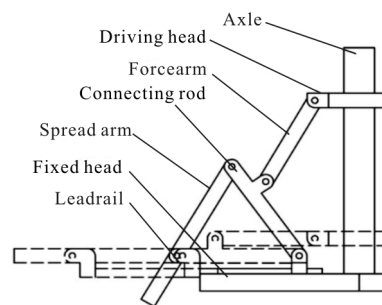


图 4 展开机构原理图

Fig.4 Schematic diagram of the deployment mechanism

当航天器入轨并且驱动解锁以后,整个系统由步进电机带动驱动头沿驱动轴向下运动,通过力臂、连杆和导轨将力传递给伸展臂,伸展臂在力的驱动下将绕导轨旋转 60°并带动主镜子块展开,展开到位后锁紧机构锁紧。当主镜停止工作时展开机构可以折叠收拢。图 4 中的虚线表示展开机构完全展开后各部件的位置。展开机构是整个展开系统的 1/6,整个展开系统由 6 个这样完全相同的子模块组成,如图 5 所

示。在进行结构设计的过程中根据几何关系计算得到展开机构各部件从折叠到展开过程相对运动（相对位移和转角）如表 2 所示。

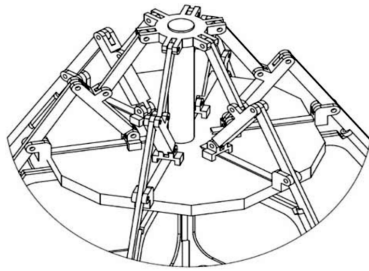


图 5 展开机构系统图

Fig.5 System diagram of the deployment mechanism

表 2 展开机构相对变化

Tab.2 Changes in the relative expansion mechanism

| Motion type                                      | Relative motion |
|--|-----------------|
| Displacement of drive along axle/mm              | 567.7           |
| Angle change of forcearm around driving head/(°) | 64.1            |
| Angle change of arm around fixed head/(°)        | 54.8            |
| Angle change of spreadarm around arm/(°)         | 114.8           |
| Angle change of spreadarm around leadrail/(°)    | 60              |
| Displacement of leadrail along fixed head/mm     | 341.6           |

### 3 展开机构建模与仿真分析

#### 3.1 展开机构建模

Adams 软件是 MSC. Software 公司开发的一款机械系统动力学仿真分析软件，可以与 UG、Pro/E、Solid Works 等多种三维软件兼容，由于 Adams 实体造型功能较弱，对于空间折叠展开机构这样复杂的机械系统，零部件较多且装配体较复杂的系统，利用 Adams 三维建模非常不容易实现。因此，常用的分析方法是专业的 CAD 建模软件和专业的动力学仿真软件联合进行。

三维实体建模软件 Solid Works 具有强大的三维建模功能，操作简单方便、易学易用，而且可以和多体动力学分析软件 Adams 之间进行数据传递。文中的展开机构的实体建模是在 Solid Works 中建立并完成装配的，将实体模型保存成扩展名为“.x\_t”的文件，然后导入 Adams 中进行仿真实验。机构展

开过程如图 6 所示。

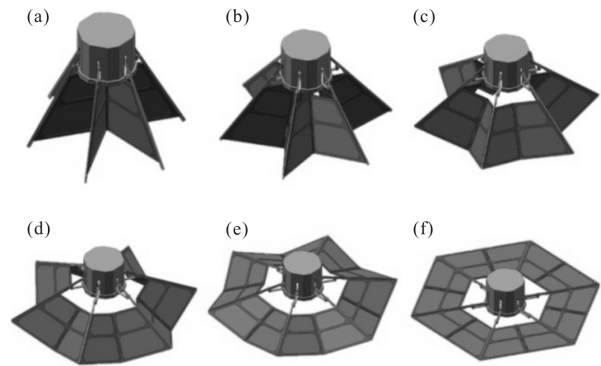


图 6 展开过程示意图

Fig.6 Schematic diagram of deployment procedure

#### 3.2 展开机构仿真分析

使用 Adams 进行仿真分析前要先将 Solid Works 中的三维模型导入 Adams，添加材料属性、运动副、驱动等。空间望远镜主镜的展开过程是一个缓慢的过程，一般需要几个小时甚至更长的时间，故动载荷很小。在整个展开的过程中各部件之间相互作用的力和冲击载荷也很小。

为了控制驱动在展开机构完全展开之后停止需要添加传感器，这里添加了角度传感器控制伸展臂与导轨的角度。当角度传感器探测到伸展臂与导轨的夹角由 60°减小到 0°时控制驱动停止。通过 Adams 中的 IF 函数添加匀速旋转驱动，驱动展开机构展开。仿真后得到驱动头位移和传感器角度的关系如图 7 中实线所示。从图 7 中可以看出，当驱动头从 700 mm 运动到 100 mm 时，测量的角由 60°减小到 0°。对实线求导数，导数值的大小表示单位位移对角度变化的影响，如图 7 中虚线所示。从图 7 中虚线可以看出，在展开的过程中随着机构不断地展开，越接近展开，角度变化越慢，因此，配合高精度导轨和精

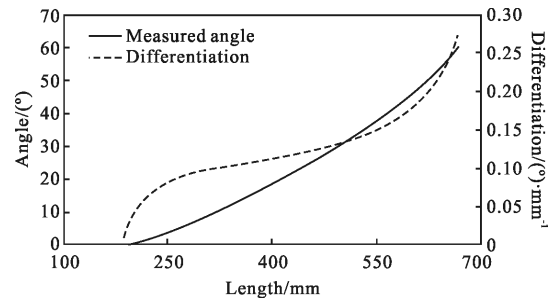


图 7 角度-位移曲线

Fig.7 Diagram of angle vs displacement



密缩紧定位结构可以保证展开结构具有较高的展开精度。

为了查看展开机构是否按照设计的形式进行运动,添加角度、位移变量并查看这些变量的变化曲线如图 8 所示。曲线 8(a)是驱动随时间的位移曲线,从曲线变化趋势可知展开机构是匀速展开。曲线 8(b)~8(e)是力臂以及伸展臂等夹角随着展开过程的变化曲线,从曲线的变化趋势可以看出各运动部件的夹角变化平稳,并且没有出现突变。曲线 8(f)是导轨随时间变化曲线,从曲线变化趋势可以看出导轨变化过程是一个减速的过程,当展开机构完全展开时导轨运动的速度也减小到零,对相连的机构几乎不产生冲击,并且导轨的使用可以提高展开结构的展开精度。对比表 2 相关机构的相对运动的设计指标可以看出展开机构运动仿真的结果与设计指标的要求完全相符,并且展开过程机构运动平稳、可靠。

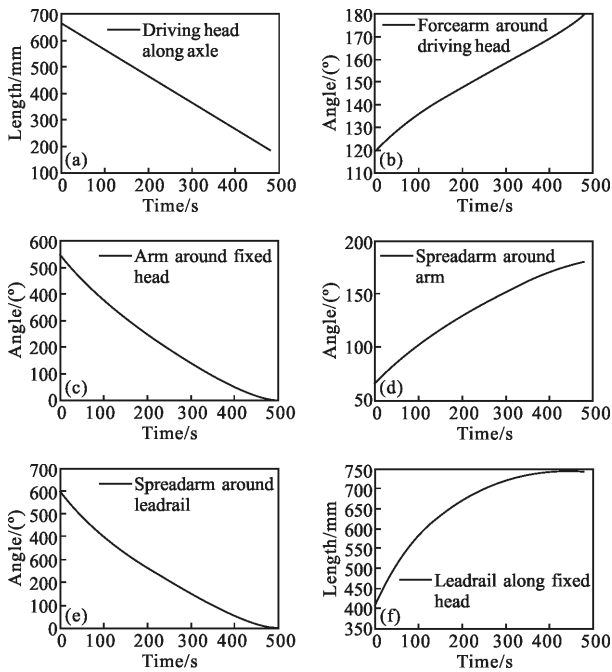


图 8 设计变量变化曲线

Fig.8 Diagram of design variable

## 4 结 论

薄膜衍射望远镜不但可以降低望远镜的质量,而且比较容易实现折叠,是未来大孔径空间望远镜发展的一个方向。国内外的研究机构已经对薄膜衍

射望远镜的原理、可行性进行了研究。文中首次提出空间薄膜衍射望远镜主镜展开方案,并且利用 Solid Works 和 Adams 进行三维建模和运动学分析。从建模过程分析发现,主镜的分块折叠方式合理,有利于三维模型的建立和展开功能的实现。初步仿真结果也显示该模型展开过程各机构的运动符合设计的指标,具有很好的对称性,展开过程受力均衡可以实现机构的平稳展开。下一步将开展对该模型的展开精度的研究,获得该模型更详尽实验数据,指导后续开发出更大口径主镜展开结构方案。

## 参 考 文 献 :

- [1] Roderick Hyde. Very large aperture diffractive telescopes [J]. *Appl Optics*, 1999, 38(19): 4198-4212.
- [2] Howard A MacEwen, James B Breckinridge. Large diffractive/refractive apertures for space and airborne telescopes [C]// SPIE, 2013, 8739: 873904.
- [3] Roderick A Hyde, Shamasundar N Dixit, Andrew H Weisberg, et al. Eyeglass: a very large aperture diffractive space telescope[C]//SPIE, 2002, 4849: 28-39.
- [4] Paul Atcheson, Jeanette Domber, Kevin Whiteaker, et al. MOIRE: ground demonstration of a large aperture diffractive transmissive telescope[C]//SPIE, 2014, 9143: 91431W.
- [5] James T Early, Roderick Hyde, Richard L Baron. Twenty-meter space telescope based on diffractive Fresnel lens [C]// SPIE, 2004, 5166: 148-156.
- [6] Aden Baker Meinel, Marjorie Pettit Meinel. Large membrane space optics: imagery and aberrations of diffractive and holographic achromatized optical elements of high diffraction order[J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(8): 1995-2007.
- [7] Zhang Nan, Lu Zhenwu, Li Fengyou. Optical design of diffractive telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 106-108. (in Chinese)
- [8] Chen Xiaoli, Su Yun, Jiao Jianchao. Technologies of diffractive imaging system for high-resolution earth observation from geostationary orbit [C]//SPIE, 2013, 8908: 890823.
- [9] Paul D Atcheson, Chris Stewart, Jeanette Domber, et al. MOIRE: initial demonstration of a transmissive diffractive membrane optic for large lightweight optical telescopes[C]// SPIE, 2012, 8442: 844221.