

## 高精度反射镜组件面形检测结构设计方法

王成彬, 孙胜利, 胡亭亮, 胡 凯

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:** 在反射镜组件进行检测装配时, 各零件加工过程中形成尺寸公差、形状位置公差会产生装配应力。装配应力通过反射镜体传到反射镜镜面使反射镜面形变差。针对该问题文中提出将柔性铰链应用于反射镜组件检测工装设计的方法。为验证该方法的可行性, 针对某反射镜组件的特征参数和检测方法, 应用柔性铰链设计理论及仿真分析软件设计了反射镜组件检测柔性工装。完成对反射镜组件重复性试验、拧紧力矩敏感性试验, 试验结果表明柔性工装具有较好的稳定性。反射镜组件面形与反射镜单镜面形相比变化  $0.006\lambda$  rms, 满足工装设计要求。与“刚性”工装比, 柔性铰链应用反射镜检测工装显著降低了装配应力对反射镜面形的影响。

**关键词:** 反射镜组件检测; 柔性铰链; 检测结构设计; 装配应力

**中图分类号:** V443.5; TH703 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0117006

## Design method of high precision reflection mirror topography measurement structure

Wang Chengbin, Sun Shengli, Hu Tingliang, Hu Kai

(Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** When the reflection mirror component is assembled for topography measurement, the manufacturing tolerance of parts, including dimensional tolerance, contour tolerance could cause assembling stress, which induces to descend of surface figure accuracy. In order to resolve the problem, a method of applying flexure hinge in the design of reflection mirror component measurement tooling was proposed. To verify its reliability, using flexure hinge theory and finite element analysis software, considering the characteristic parameters and verifying method of the reflection mirror component, the reflection mirror topography measurement tooling was designed and manufactured. The reflection mirror component repetition topography measurement, the sensitivity tightening torque topography measurement test were taken respectively, which proved that the flexure tooling has well stability. Compared with the single reflection mirror, the surface figure of component changed  $0.006\lambda$  rms, which satisfied the requirement of tooling design. Using flexure hinge in reflection mirror component topography measurement is better in reducing assembling stress than rigidity tooling.

**Key words:** mirror component topography measurement; flexible hinge; measurement structure design; assembling stress

收稿日期: 2015-05-09; 修订日期: 2015-06-13

基金项目: 中国科学院空间科学战略性先导专项(XDA04060500)

作者简介: 王成彬(1982-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事空间光学仪器光机结构设计和分析方面的研究。Email: sitp305@163.com

## 0 引言

随着空间光学遥感在资源勘查、减灾防灾、战略侦察等作用的日益凸显,人们对空间相机地面覆盖宽度、分辨率、探测灵敏度的需求也越来越高。长焦距、大视场和大光口径成为当前空间相机发展的趋势。相机口径的增大势必带来反射镜及其组件的重量增加<sup>[1]</sup>。这不仅增加了反射镜及支撑结构设计设计难度,还对反射镜组件研制过程中的检测、装配工装提出了更高的要求。反射镜组件在检测过程首先需要与检测工装连接固定。该过程在没有测量仪器监视下进行的,微小的零件加工、形位尺寸等公差极易将装配应力通过反射镜支撑结构传到反射镜镜面,造成反射镜面形变化。无法用检测结果指导镜面加工,很难分析装配过程导致反射镜变形原因。目前许多科研学者对大口镜反射镜支撑结构进行了广泛而深入的研究。通过在反射镜与其支撑结构间增加柔性支撑结构来消除或降低装配应力对反射镜镜面面形的影响<sup>[2-4]</sup>。针对如何消除或降低反射镜组件检测过程中反射镜组件与检测工装间的装配应力尚无广泛深入研究。文中将柔性铰链理论引入反射镜组件检测工装设计,来解决反射镜组件检测过程中因检测工装装配应力带来的误检测问题,降低检测工装装配应力对反射镜面形的影响。

## 1 反射镜组件检测布局及原理

文中涉及的反射镜外形尺寸为 840 mm×626 mm 的长圆形碳化硅离轴非球面反射镜,反射镜重量为 30 kg,反射镜组件重量为 55 kg。由于该反射镜为离轴非球面反射镜,在反射镜检测时需要根据反射镜面形设计相应补偿器,补偿器与反射镜组成检测系统,实现对反射镜面形的检测。图 1 为反射镜检测光路原理图。

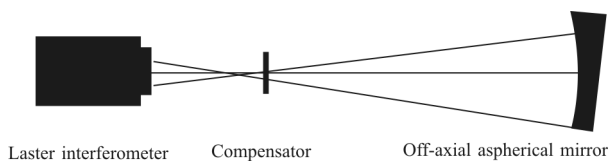


图 1 反射镜检测原理示意图

Fig.1 Sketch map of reflection mirror measurement

首先将激光干涉仪与补偿器固定到各自调节架上。调节激光干涉仪与补偿器的相对位置,建立激光干涉仪与补偿器的检测光路。再将被检测的反射镜组件安装到调节架上。通过调整反射镜组件与检测光路的相对位置,直至根据干涉图的分布形状、像差残余量等参数确定反射镜组件达到了理想位置。从而获得反射镜面形误差。

以上所检测到反射镜的面形误差主要由光学加工误差、检测误差、装配面形误差三部分组成:

(1) 光学加工误差。在光学加工过程形成,因为考虑加工成本、加工周期等因素,在达到光学设计要求面形误差后,不需要追求加工到理想面形。该部分误差在反射镜单镜加工过程中很容易识别和检测;

(2) 检测误差。测量误差主要是受环境气流、微振动、反射镜调整位置偏差等影响。该部分检测误差可以通过控制检测环境来消除或使该部分测量误差尽量小;

(3) 装配产生面形误差。一是反射镜组件装配带来的面形误差。二是反射镜组件和调节架装配带来的面形误差。除反射镜镜坯受力状态变化带来的固有变形外。无论是反射镜与其支撑结构装配,还是反射镜组件与调节架装配固定过程,各零件加工尺寸、形状位置公差等极易产生装配应力。装配应力通过结构转到反射镜镜面,产生面形误差。以上带来反射镜面形误差的因素很难区别,也是极易在反射镜检测过程中出现的现象。文中主要研究设计相应的工装方法,减少反射镜组件和调节架装配带来的反射镜面形误差。

## 2 反射镜组件检测柔性工装设计

### 2.1 柔性工装设计要求

为减小或消除反射镜组件与调节架之间装配应力带来的面形误差,就要消除或减少由于零件加工过程尺寸或者形状位置公差引入的装配应力。在实际零件机械加工过程中很难达到理想的尺寸和几何形状的目标。因此,要设计一种结构,该结构能够降低或消除反射镜组件与调节架装配过程中的变形。

作为反射镜组件实验室检测工装,在设计上的重点是柔性工装要有一定的柔度,能够通过柔性结构变形降低或消除反射镜组件和调节架之间的变形。该工装设计要求装配带来的反射镜面形残差

rms 变化小于  $0.01\lambda(\lambda=632.8 \text{ nm})$ 。此外,柔性工装要满足强度要求,过高的柔度必然牺牲工装结构柔性方向的强度,在反射镜检测过程不能由于反射镜组件自身重力加载,使出现强度上的失效。

### 2.2 柔性工装柔度和强度分析

柔性铰链在精密调整结构、空间光学遥感仪器、地面应用光学设备具有广泛的应用。柔性铰链也是柔性结构设计中的重要组成部分,其具有体积小、无机械摩擦、无间隙、具有非常高的精度和稳定性等优点。依靠柔性铰链的柔性环节的变形来传输运动或力,其具体结构由中间弹性变形单元连接两个刚体组成,通过中间单元变形实现两刚体之间的相对运动<sup>[5-6]</sup>。当反射镜组件与调节架之间因为尺寸或形状位置公差不能实现理想耦合接触时,柔性铰链受到柔度方向上弯矩作用。当柔性铰链的柔度合适,就会通过适量的变形降低装配应力对反射镜组件的作用。

对于柔性铰链有多种形式:直梁型柔性铰链、圆弧型柔性铰链,椭圆形柔性铰链、倒角型柔性铰链、抛物线型柔性铰链、双曲线型柔性铰链等结构形式。椭圆形柔性铰链具有各项弯曲刚度相等、较高的轴向刚度、较低的弯曲刚度与扭转刚度等特点<sup>[7]</sup>,文中选用椭圆形柔性铰链。

对于椭圆上的任意一点,令椭圆的长半轴为  $a$ 、短半轴为  $b$ 、椭圆的离心角为  $\varphi$ ,对椭圆上任意一点  $P$ ,有:

$$xp=bcos\varphi, yp=asin\varphi(0 \leq \varphi < 2\pi) \quad (1)$$

柔性铰链弯曲转动的柔度  $C$  为转角刚度  $K_\theta$  的倒数,可由单位弯矩作用下的转角求得。参考文献<sup>[7]</sup>对椭圆形柔性铰链柔性部分的柔度进行了详细推导计算。

$$C = \frac{1}{K_\theta} = \frac{\theta}{M} = \frac{24a\gamma_1}{E\omega t^3} \quad (2)$$

其中

$$\gamma_1 = \frac{6s(2s+1)}{(4s+1)^{5/2}} \arctan \sqrt{4s+1} + \frac{6s+4s+1}{(2s+1)(4s+1)^{5/2}}$$

$$s = at$$

式中: $E$  为材料弹性模量; $G$  为剪切模量; $t$  为柔性铰链最薄出厚度、 $M$  为柔性铰链所受弯矩。

柔性铰链最薄弱的地方为柔性切口厚度为  $t$  的地方。在纯弯曲情况下其最大应力为:

$$\sigma_{\max} = K_t \frac{6M}{t^2 w} \quad (3)$$

其中,  $K_t=(1+at/2b^2)^{9/20}$  为应力集中系数。

### 2.3 柔性工装设计

进行柔性工装设计前,要分析工装所需柔度方向。在非柔度方向要保证柔性工装具有承受反射镜组件重量的强度和刚度。因为该工装为反射镜组件实验室检测应用,对其刚度不做考核要求。

为了便于对反射镜组件检测工装进行柔度分析以及对反射镜组件检测过程进行描述。在反射镜组件上定义如下坐标系:以反射镜镜面几何中心为坐标原点,以反射镜短边方向为  $X$  轴、以反射镜长轴方向为  $Y$  轴、垂直反射镜安装面方向为  $Z$  轴。如图 2 所示。

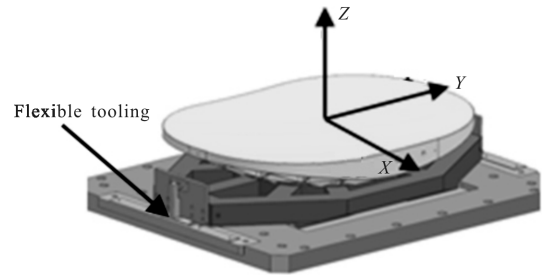


图 2 反射镜组件坐标系图

Fig.2 Define of coordinate reflection mirror component

该反射镜组件在检测前首先置于水平状态,即  $XY$  坐标面处于水平状态。反射镜组件通过柔性工装与调节架过渡板进行连接。通过调节架转动(转动轴与坐标系中  $Y$  轴平行)将反射镜组件和调节架过渡板整体翻转  $90^\circ$ ( $X$  轴竖直向下),与补偿器和干涉仪形成检测光路。

通过以上反射镜组件安装方式以及检测时所处状态可以得出,在与调节架过渡板安装时,要设计垂直安装面方向的柔度,即  $Z$  向柔度(见图 3)。该柔度用来消除反射镜组件与调节架过渡板安装面形状位置公差造成的装配应力。此外,反射镜组件在检测时,反射镜组件随调节架绕  $Y$  轴转动  $90^\circ$ ,至反射镜短轴与  $X$  轴方向平行。因此,柔性工装要保证在该方向具有一定承受反射镜组件重量的强度。

根据以上柔性工装设计分析,确定了其柔度方向和强度保证方向。考虑反射镜组件重量、反射镜组件连接接口形式、尺寸约束、柔性铰链柔度及最薄弱处强度估算等,以硬铝(牌号 LY12)为材料,其中柔性铰链最薄处为  $1.1 \pm 0.1 \text{ mm}$ 。

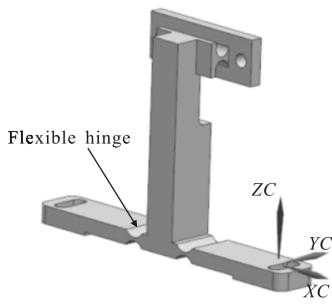


图 3 柔性工装三维模型图

Fig.3 3D model of flexible tooling

### 3 柔性工装力学仿真分析

在反射镜组件进行检测过程，柔性工装受到反射镜组件重力作用(沿 X 向)以及由于加工误差带来的沿柔性铰链柔度方向的弯矩作用。为确定柔性工装柔性铰链处最大应力是否小于其材料许用应力值，利用有限元方法对其所受最大应力进行了仿真分析(见图 4)。为更好的拟合柔性铰链形状，采用四面体单元，有限元模型共计 33 640 个单元。反射镜组件总重 55 kg，反射镜组件重量由两个并联柔性工装承载，因此，在柔性工装与反射镜组件安装处加载 27.5 kg 质量所产生的作用力，方向为柔性工装刚度保证方向，即上述章节所定义坐标的 X 向。

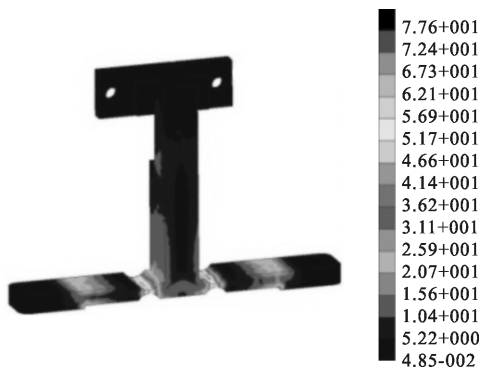


图 4 柔性工装应力分布

Fig.4 Distribution of flexible tooling stress

通过仿真分析可以看出在 27.5 kg 质量所产生力作用下，柔性工装在柔性铰链处具有最大应力，为 77.6MPa，屈服强度为 240MPa，约有 3 倍的强度余量。

### 4 柔性工装试验验证和分析

#### 4.1 柔性工装试验验证

基于以上设计、分析结果，完成了柔性工装的加

工，图 5 为完成加工的柔性工装实物图。

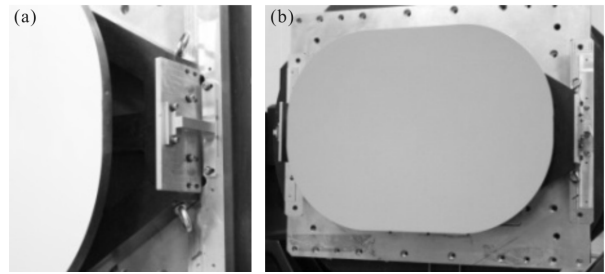


图 5 柔性工装

Fig.5 Flexible tooling

为验证柔性工装设计的可行性，利用该柔性工装对已完成装配的反射镜组件进行验证。根据反射镜组件的坐标系，通过柔性工装将反射镜组件与调节架过渡板用螺钉连接，建立反射镜检测光路，检测光路及反射镜组件置于气浮平台，并关闭容易产生气流扰动、振动的设备和仪器，降低外界干扰。

为验证柔性工装的稳定性，将反射镜组件与调整接过渡板进行重复安装 3 次，其中与调节架过渡板连接螺钉拧紧力矩为 2 N·m，3 次面形检测结果如表 1 所示。

表 1 3 次重复装配测量面形值(λ=632.8 nm)

Tab.1 Result surface figure of three times

reassemble measurement (λ=632.8 nm)

| Times               | First   | Second  | Third   |
|---------------------|---------|---------|---------|
| Surface figure /rms | 0.051 λ | 0.052 λ | 0.051 λ |

通过表 1 可以看出，3 次重复安装下镜面面形 rms 和面形分布未发生明显变化，其变化值在测量误差范围内(见图 6~8)。表明柔性工装在重复装配中具有一定的稳定性。

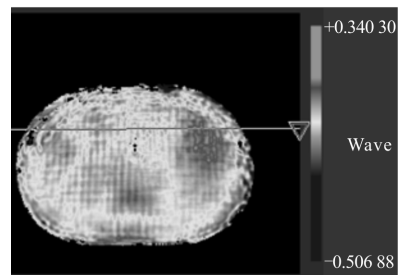


图 6 第 1 次装配面形分布

Fig.6 Surface distribution of the first assembly



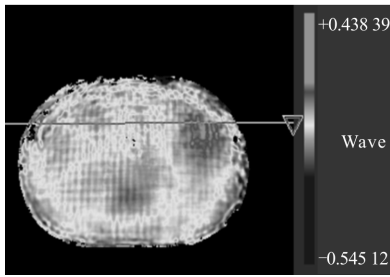


图 7 第 2 次装配面形分布

Fig.7 Surface distribution of the second assembly

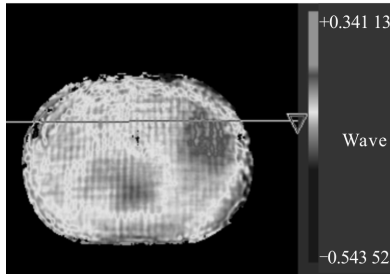


图 8 第 3 次装装配面形分布

Fig.8 Surface distribution of the third assembly

为验证柔性工装与调整架过渡板连接螺钉拧紧力矩对镜面面形的影响,在同一安装状态分别进行了不同拧紧力矩下的镜面面形检测结果见表 2。

表 2 不同拧紧力矩下检测面形值( $\lambda=632.8\text{ nm}$ )

Tab.2 Surface figure of different tightening torque

( $\lambda=632.8\text{ nm}$ )

| Tightening torque   | 2 N·m           | 3 N·m           | 4 N·m           |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Surface figure /rms | 0.051 $\lambda$ | 0.051 $\lambda$ | 0.051 $\lambda$ |

通过表 2 和在不同拧紧力矩反射镜面形分布可以看出,柔性工装连接螺钉在不同拧紧力矩下,镜面面形 rms 及面形分布未发生明显变化(见图 9~11)。

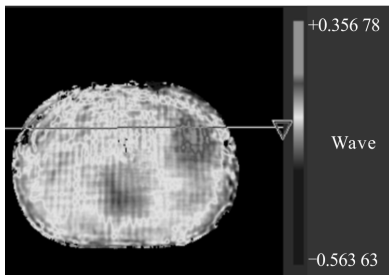


图 9 2 N·m 力矩下面形分布

Fig.9 Surface distribution of 2 N·m

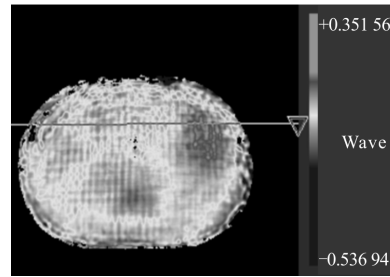


图 10 3 N·m 力矩下面形分布

Fig.10 Surface distribution of 3 N·m

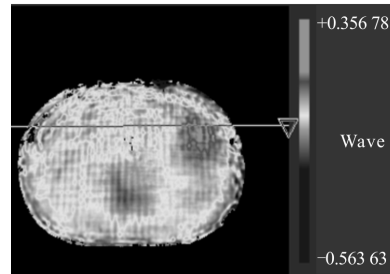


图 11 4 N·m 装配面形分布

Fig.11 Surface distribution of 4 N·m

为对比不同工装结构形式对反射镜面形的影响,设计了连接工装。相对柔性工装该工装在安装方向没有柔度,即为“刚性”工装。在连接工装上设计“一”形孔和提高加工公差等级的方式降低装配应力的影响。连接工装与反射镜组件和调整架过渡板连接方式如图 12 所示。

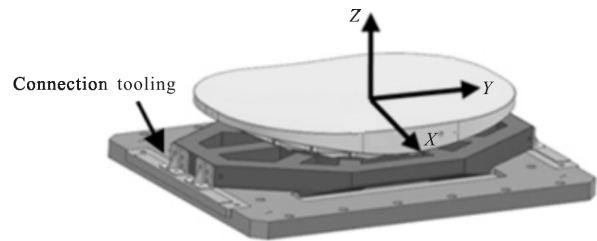


图 12 刚性工装连接方式

Fig.12 Connection mode of rigidity tooling

在螺钉拧紧力矩为 2 N·m 状态下用激光干涉仪对镜面面形进行检测,面形误差 rms 为 0.101 $\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ )。

#### 4.2 试验数据分析

通过以上试验可以看出相对刚性工装,柔性工装可降低装配应力对反射镜面形的影响。为分析柔性工装在消除装配应力所起的作用,结合试验数据,对上试验数据进一步梳理和分析。

在完成反射镜镜面加工后,单镜镜面形 rms 为  $0.045\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ),如图 13 所示。反射镜装配带来的镜面残差一部分来自反射镜组件零件间的装配过程;一部分来自反射镜组件和检测工装的装配过程。

反射镜组件装配过程带来镜面残差主要是组件装配应力带来的面形残差。此外,反射镜安装支撑结构后,反射镜受力状态变化也是带来面形残差的因素。反射镜单镜检测为反射镜侧面承力,完成装配后为反射镜背部安装孔承力。为验证反射镜受力状态变化是否对面形产生影响,将反射镜镜坯旋转  $180^\circ$ ,即用反射镜的另一侧面作为承力面。反射镜面形检测 rms 为  $0.045\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ),如图 14 所示。因为该反射镜为高次非球面反射镜,如反射镜自身结构刚度不能满足要求,在翻转  $180^\circ$  时,受力状态改变势必会影响镜面面形。该试验验证了反射镜结构具有良好的刚度特性,即反射镜受力状态变化对镜面面形不会产生明显影响。

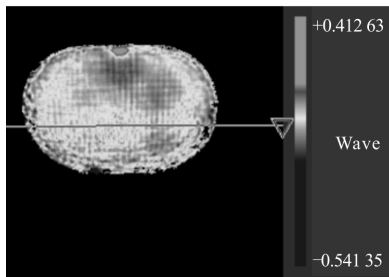


图 13 反射镜单镜初始状态检测面形分布

Fig.13 Surface distribution of initial measurement of single reflection mirror

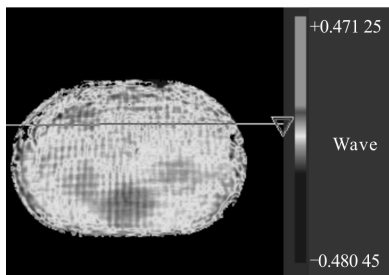


图 14 反射镜单镜翻转  $180^\circ$  检测面形分布

Fig.14 Surface distribution of reverse  $180^\circ$  measurement of single reflection mirror

通过以上分析可以看出,与完成单镜镜面加工后镜面残差相比,反射镜组件装配和反射镜组件与调整架装配带来面形残差合计约为  $0.006\lambda$  rms

( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ),满足柔性工装设计小于  $0.01\lambda$  rms ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ) 的要求。

## 5 结 论

文中通过不同试验对用于反射镜组件检测的柔性工装设计方法进行了试验验证。试验过程柔性工装未出现强度失效现象。试验表明柔性工装用于反射镜组件检测的方法能够降低零件加工中无法避免的尺寸公差、形状位置公差所带来的装配应力,从而降低对反射镜面形的影响。同时也降低在无干涉仪检测状态下对反射镜组件检测装配的难度。该方法为大口径、大质量反射镜组件检测工装设计提供了一种参考方法。针对反射镜组件与反射镜单镜面形检测 rms 存在约为  $0.006\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ) 的差异,虽满足该反射镜工装设计要求,但需进一步开展如何产生这种微小变化的原因以及如何降低微小变形的研究。

## 参 考 文 献 :

- [1] Yan Yong, Jin Guang, Yang Hongbo. Lightweight structural design of space mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 97-101. (in Chinese)
- [2] Guan Yingjun, Xin Hongwei. Design of support for large aperture primary mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(11): 1-6. (in Chinese).
- [3] Chen Hongda, Chen Yonghe, Shi Tingting, et al. Lightweight and mounting design for primary mirror in space camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 535-540. (in Chinese).
- [4] Zhang Xuejun, Li Zhilai, Zhang Zhongyu. Space telescope aspherical mirror structure design on SiC material[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 36(5): 577-582. (in Chinese)
- [5] Wang Lefeng, Rong Weibin, Sun Lining. Research on a three-lin six-dof micromanipulator with flexure hinge [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(4): 529-534. (in Chinese)
- [6] Wang Zhongsu, Zhai Yan, Mei Gong, et al. Design of flexible support structure of reflector in space[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1833-1841. (in Chinese)
- [7] Chen Guimin, Han Qi. Deep notch elliptical flexure hinges [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(3): 570-575. (in Chinese)