

文章编号 1004-924X(2006)01-0100-11

# 干涉式大气垂直探测仪中面弹簧的有限元分析

陶津平, 华建文, 代作晓, 王模昌

(中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:**面弹簧是干涉式大气垂直探测仪中的精密部件,系统要求其在工作过程中具有较大刚度比和足够的轴向行程。利用有限元分析方法对面弹簧进行了优化设计。通过对比不同缝形面弹簧在轴向拉伸过程中的轴向刚度、径向刚度、刚度比,确定了螺旋缝形是相对最优缝形。进一步对螺旋缝形面弹簧做了系统分析,得到了螺旋缝形面弹簧中的基圆半径、螺距、旋转角度、指数、直径、开缝数、簧片厚度、材料的杨氏模量等参数在面弹簧轴向拉伸过程中,对其轴向刚度、径向刚度、刚度比的影响规律。根据有限元分析结果最终确定一组最优参数值  $r_0 = 20$  mm,  $a = 20/\pi^2$  mm/rad,  $\theta_1 = \pi$  rad,  $b = 2$ ,  $\phi = 200$  mm,  $n = 3$ ,  $t = 0.2$  mm,  $E = 1.3 \times 10^{11}$  Pa, 并据此加工成实物。对实物的实测结果表明,螺旋缝形面弹簧具有的轴向行程和较大的刚度比达到了设计目标,验证了有限元分析结果的准确性和合理性。

**关键词:**大气垂直探测仪;面弹簧;螺旋缝形;有限元分析

**中图分类号:**TP73.2;TH765.81 **文献标识码:**A

## Finite element analysis of diaphragm flexure in atmospheric sounding interferometer

TAO Jin-ping, HUA Jian-wen, DAI Zuo-xiao, WANG Mo-chang

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

**Abstract:** A diaphragm flexure was designed with the finite element analysis method. By comparing different slit-shape diaphragm flexures' axial stiffness coefficient, radial stiffness coefficient and stiffness ratio in the course of elongating, the spiral slit-shape diaphragm flexure was selected. Furthermore, the influences of spiral slit-shape diaphragm flexure's base circle radius, screw-pitch, rotate angle, index, diameter, number of slits, thickness and elasticity modulus of material on axial stiffness coefficient, radial stiffness coefficient and stiffness ratio were analyzed. The best set of parameters ( $r_0 = 20$  mm,  $a = 20/\pi^2$  mm/rad,  $\theta_1 = \pi$  rad,  $b = 2$ ,  $\phi = 200$  mm,  $n = 3$ ,  $t = 0.2$  mm,  $E = 1.3 \times 10^{11}$  Pa) based on the finite element analysis results were chosen and a pair of spiral slit-shape diaphragm flexures was made. Measurement results show that the spiral slit-shape diaphragm flexure has elongation in axial direction and large stiffness ratio, which has satisfied the design objectives and confirmed the veracity and rationality of the finite element analysis as well.

**Key words:** atmospheric sounding interferometer; diaphragm flexure; spiral slit-shape; finite element analysis

收稿日期:2005-10-22;修订日期:2005-12-08.

基金项目:中国科学院上海技术物理研究所创新资助项目(No. 070715)。

## 1 引言

干涉式大气垂直探测仪是气象卫星上搭载的主要红外遥感仪器之一。它利用大气和地球表面的红外辐射性质,在空间遥感大气温度、湿度和大气成分的垂直分布,能够实现大范围、快速、连续和长期的气象测量。

干涉分光系统是大气垂直探测仪重要的组成部分之一,主要功能是使输入的红外光波产生自调制,并提供动镜调相位移信号。动镜支撑系统中的面弹簧是干涉分光系统的关键部件,也是要求最高的精密部件,被用来取代轴承对动镜起支撑和导向作用,弥补了用轴承支撑时存在间隙和磨损的不利因素,是动镜实现直线往复运动,产生调相位移信号的重要保障。

本文根据干涉式大气垂直探测仪总体要求和面弹簧在干涉系统中的具体功能制定了面弹簧的设计目标:面弹簧在工作过程中需要具有较大刚度比和足够的轴向行程。利用有限元分析方法对面弹簧进行了优化设计,通过对比不同缝形面弹簧在轴向拉伸过程中的轴向刚度、径向刚度、刚度比,确定了螺旋缝形是相对最优缝形。

迄今为止,国内尚无对螺旋缝形面弹簧进行系统研究的报道,国外也仅限于对标准螺旋缝形的研究。本文通过对螺旋缝形面弹簧的系统分析,得到了螺旋线方程中的基圆半径  $r_0$ 、旋转角度  $\theta_1$ 、螺距  $\alpha$ 、指数  $b$  等参数在面弹簧轴向拉伸过程中对其轴向刚度、径向刚度、刚度比的影响规律,首次提出指数  $b$ ,扩展了对螺旋缝形面弹簧研究的范围。有限元分析结果为螺旋缝形面弹簧的设计提供了可靠的依据。

## 2 设计目标

干涉分光系统原理如图 1 所示<sup>[1-4]</sup>。

入射光束经过分束器被分成两束,一束透射到动镜上,一束反射到定镜上,两光束由动镜和定镜反射再经过分束器叠加在一起。由于动镜沿光线方向直线往复运动使得两反射光束产生光程差,两反射光束经分束器合束后发生干涉,干涉光束通过组合场镜聚焦到红外探测器上,红外探测器将光信号转化成干涉图电信号,再经过傅里叶

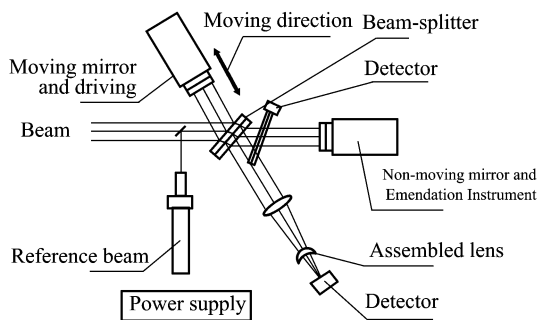


图 1 典型的干涉分光系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the typical interference beam splitting system

变换,最终得到光谱图。

两反射光经分束器合束后的波面要完全重合,才能获得好的干涉性能,如果有相对倾斜,就会影响干涉信号质量,这就要求动镜在直线往复运动中保证平动,不能发生倾斜。

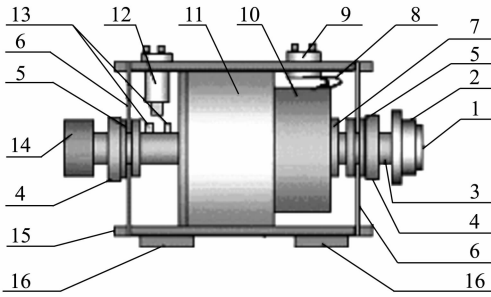
动镜在直线往复运动的过程中,受到干扰力(包括直线电机提供的力不严格沿电机轴方向,而产生的径向分力)的影响,使得支撑电机轴的两片面弹簧产生径向跳动(见动镜支撑系统示意图 2),导致电机轴和动镜发生倾斜,经动镜反射的光束也随之倾斜,这样通过分束器合束的两束光不能完全重合,最终导致干涉信号调制度的下降。

根据干涉式大气垂直探测仪总体要求,动镜运动最大倾斜角度不能超过  $30''$ ,为了达到这个非常严格的指标,必须对面弹簧进行系统的分析与设计。

设计面弹簧有三个主要目标:

(1)为了确保干涉式大气垂直探测仪的光谱分辨率  $\delta\nu$ ,要求面弹簧在直线电机提供的轴向推力  $F_z$  的作用下,轴向最大伸长量达到  $D_{\max}$ 。 $\delta\nu$ 、 $D_{\max}$  之间的关系式可以表述成  $\delta\nu = 1/2D_{\max}$ 。拟定光谱分辨率  $\delta\nu = 1 \text{ cm}^{-1}$ ,面弹簧的轴向最大行程应为:  $D_{\max} = 1/2\delta_{\max} = 1/2 \times 1 = 0.5 \text{ cm} = 5 \text{ mm}$ ,即要求面弹簧在直线电机的驱动下,轴向要有 5 mm 位移。

(2)为了节约功耗和减小电机力径向分力对面弹簧的影响,直线电机提供的推力  $F$  要尽可能的小,轴向分力  $F_z$  也会随之尽可能的小。为了满足轴向最大伸长量的要求,面弹簧的轴向刚度  $K_z$  也要尽可能小。面弹簧轴向刚度计算公式:



1、反射镜;2、镜座;3、电机轴;4、固定螺母;5、垫片;6、面弹簧;7、套筒;8、引线;9、接线柱;10、线圈与骨架;11、磁路模块;12、霍尔元件与支架;13、磁铁;14、配重;15、面弹簧压圈;16、金属底座

图 2 动镜支撑系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the bearing moving-mirror system

$$K_z = F_z / D, \quad (1)$$

其中,  $F_z$  为电机提供的轴向力,  $D$  为轴向伸长量。

(3) 在面弹簧轴向拉伸的整个过程中, 面弹簧的径向刚度  $K_y$  要设计得尽可能大, 提高其抗干扰能力, 以减小动镜运动过程中产生的倾斜角度。

面弹簧径向刚度计算公式:

$$K_y = F_y / y, \quad (2)$$

其中,  $F_y$  为施加在面弹簧径向上的干扰力,  $y$  为在径向干扰力  $F_y$  作用下, 面弹簧的径向位移量。

综上所述, 在设计面弹簧时, 既要满足轴向最大伸长量  $D_{\max}$ , 又要在轴向拉伸的过程中, 使得面弹簧的  $K_z$  尽可能小,  $K_y$  尽可能大, 即刚度比  $i = K_y / K_z$  尽可能大。

### 3 有限元分析

#### 3.1 缝形选择

要使面弹簧在轴向获得足够的伸长量, 应降低其轴向刚度。在面弹簧上割出狭缝是最好的方法, 狭缝形状与其  $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$  有很大的关系, 所以选好缝形是非常重要的。在相同条件下(面弹簧外径  $\phi = 200$  mm; 中心孔直径  $d = 30$  mm; 材料为铍青铜, 其杨氏弹性模量  $E = 13e10$  Pa; 厚度  $t = 0.2$  mm), 利用 ANSYS<sup>[5-10]</sup> 有限元分析软件对三角缝形、T 字缝形、螺旋缝形面弹簧进行分析计算。采用 SHELL 93 壳单元, 建立有限元分析模型如图 3 所示。模型中的开缝宽度均为 1 mm, 开孔直径为 4 mm, 缝线与开孔相切, 消除应力集

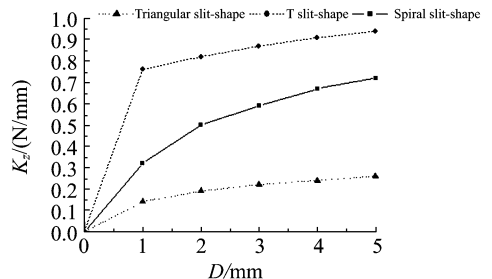
中。有限元分析时的约束条件: 面弹簧外边缘六个自由度全部约束, 中心电机孔边缘三个旋转自由度被约束。加载方式: 轴向力和径向干扰力均匀作用在电机孔边缘上。



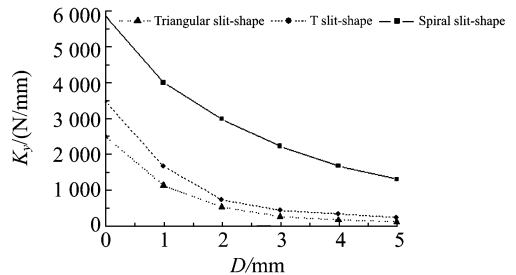
(a)三角缝形 (b)T 字缝形 (c)螺旋缝形  
(a)Triangular slit (b)T slit-shapes (c)Spiral slit-shapes

图 3 有限元分析模型

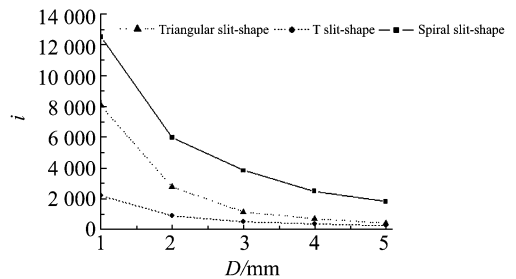
Fig. 3 Finite element analysis models



(a)



(b)



(c)

图 4  $K_z$  (a)、 $K_y$  (b)、 $i$  (c) 随  $D$  和不同缝形的变化曲线  
Fig. 4  $K_z$  (a)、 $K_y$  (b)、 $i$  (c) versus  $D$  and different slit-shapes

$D$  分别取 0、1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm,在轴向拉伸的过程中,径向干扰力  $F_y = 2$  N。经过网格划分、加载、求解,最终得到不同缝形面弹簧在轴向拉伸不同位置时对  $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$  影响的关系曲线,如图 4 所示。

由图 4 可以得到螺旋缝形面弹簧在轴向拉伸相同位置时的刚度比  $i$  都要大于三角缝形和 T 字缝形面弹簧的刚度比  $i$ ,所以螺旋缝形是相对最优缝形。

### 3.2 螺旋缝形面弹簧系统研究

利用有限元分析方法对螺旋线方程中参数  $r_0$ 、 $\theta_1$ 、 $a$ 、 $b$  和螺旋缝形面弹簧直径  $\phi$ 、 $360^\circ$  均匀分布螺旋线根数  $n$ 、厚度  $t$ 、材料弹性模量  $E$  等参数不同取值,在面弹簧轴向拉伸不同位置时对  $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$  的影响进行系统的研究。

(1)螺旋线方程中各参数对面弹簧  $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$  的影响

极坐标下的标准螺旋线方程:

$$r = r_0 + a \cdot \theta, \theta \in [0, \theta_1] \quad (3)$$

式中  $r_0$ 、 $a$ 、 $\theta$ 、 $\theta_1$  分别为螺旋线的基圆半径、螺距、角度范围、终止角度。对公式(3)作如下修改,可得到改进后的极坐标下的螺旋线方程:

$$r = r_0 + a \cdot (\theta)^b, \theta \in [0, \theta_1] \quad (4)$$

根据指数  $b$  的取值不同,可以得到更多的螺旋线线形,显然就能从更大范围内优化出所需的螺旋线形面弹簧,式(4)被称为广义螺旋线。

拟定  $\phi = 200$  mm(周边约束 10 mm,实际有效直径  $\phi_{\text{有效}} = 180$  mm),  $t = 0.2$  mm,  $n = 3$ , 材料为铍青铜,弹性模量  $E = 1.3 \times 10^{11}$  Pa,电机轴孔径  $d = 30$  mm。

a.  $r_0$  对  $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$  的影响

取  $\theta_1 = \pi$  rad,  $b = 1$ ,  $a = (\frac{20 \cdot \pi - r_0}{\pi})$  mm/rad,使螺旋缝有效分布在面弹簧上。 $r_0$  分别取 30 mm、40 mm、50 mm、60 mm,建立有限元模型如图 5 所示。有限元分析时, $D$  取 0、1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm;轴向拉伸过程中,径向干扰力  $F_y = 2$  N。经过网格划分、加载、求解,得到参数  $r_0$  在面弹簧轴向拉伸不同位置时对其  $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$  的影响规律,采用双线性插值法得到三维曲线图 6。

由图 6,可以得到:随着  $D$  的增大,螺旋缝形面弹簧  $K_z$  增大, $K_y$  减小, $i$  减小;随着  $r_0$  增大,

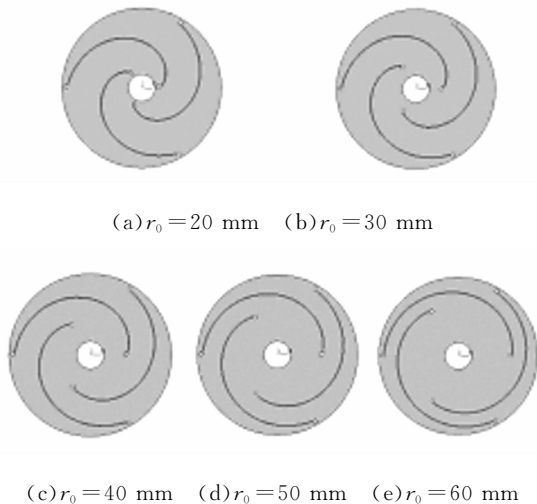
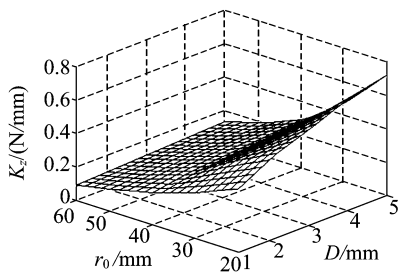
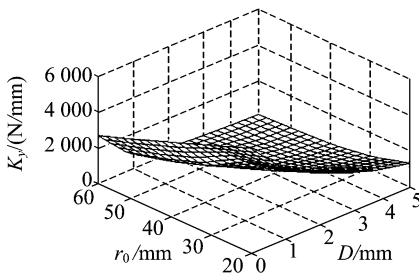


图 5 有限元分析模型

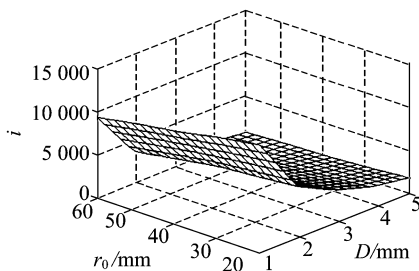
Fig. 5 Finite element analysis models



(a)



(b)



(c)

图 6  $K_z$ (a)、 $K_y$ (b)、 $i$ (c)随  $r_0$  和  $D$  变化的三维曲线

Fig. 6  $K_z$ (a)、 $K_y$ (b)、 $i$ (c) versus  $r_0$  and  $D$

螺旋缝形面弹簧的  $K_z$ 、 $K_y$  和  $i$  都减小。

### b. $a$ 对 $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$ 的影响

取  $r_0 = 20$  mm,  $\theta_1 = \pi$  rad,  $b = 1$ 。  $a$  分别取 5 mm/rad、10 mm/rad、15 mm/rad、20 mm/rad, 建立有限元模型如图 7 所示。有限元分析时,  $D$  取 0、1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm, 轴向拉伸过程中, 径向干扰力  $F_y = 2$  N。经过网格划分、加载、求解, 得到参数在面弹簧轴向拉伸不同位置时对其  $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$  影响规律, 采用双线性插值法得到三维曲线, 如图 8。

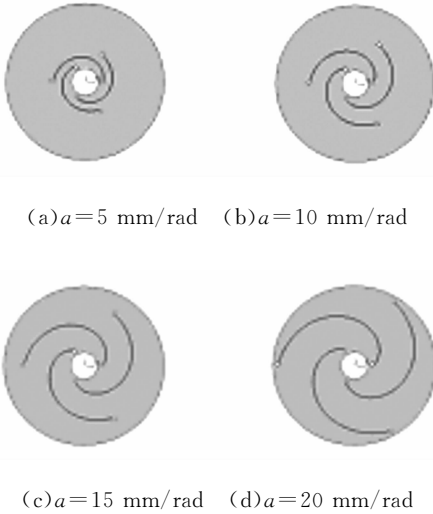


图 7 有限元分析模型

Fig. 7 Finite element analysis models

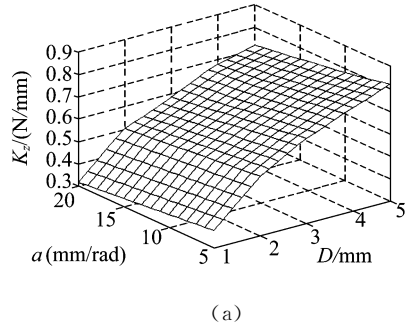
由图 8 可以得到: 随着  $D$  的增大, 螺旋缝形面弹簧  $K_z$  增大,  $K_y$  减小,  $i$  减小; 随着  $a$  增大, 螺旋缝形面弹簧的  $K_z$  减小,  $K_y$  增大,  $i$  增大。

### c. $\theta_1$ 对 $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$ 的影响

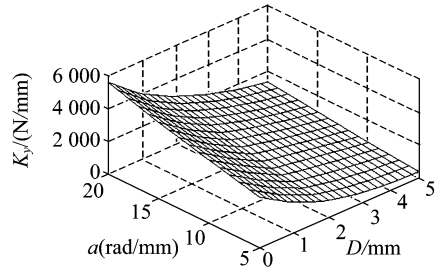
取  $r_0 = 20$  mm,  $b = 1$ ,  $\alpha = \frac{20 \cdot \pi}{\theta_1}$  mm/rad, 使螺旋缝有效分布在面弹簧上。  $\theta_1$  分别取  $0.8 \pi$  rad、 $0.9 \pi$  rad、 $\pi$  rad、 $1.1 \pi$  rad、 $1.2 \pi$  rad, 建立有限元模型如图 9 所示。有限元分析时,  $D$  取 0、1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm; 轴向拉伸过程中, 径向干扰力  $F_y = 2$  N。经过网格划分、加载、求解, 得到参数  $\theta_1$  在面弹簧轴向拉伸不同位置时对其  $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$  影响的规律, 采用双线性插值法得到三维曲线, 如图 10。

由图 10 可以得到: 随着  $D$  的增大, 螺旋缝形面弹簧  $K_z$  增大,  $K_y$  减小,  $i$  减小; 随着  $\theta_1$  增大, 螺旋缝形面弹簧的  $K_z$  和  $K_y$  都要减小,  $i$  先增大后减小。当  $\theta_1 = \pi$  rad 时,  $i$  最大。

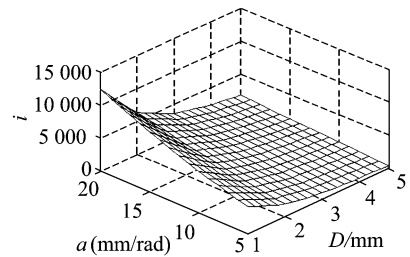
### (d) $b$ 对 $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$ 影响



(a)



(b)



(c)

图 8  $K_z$  (a)、 $K_y$  (b)、 $i$  (c) 随  $a$  和  $D$  变化的三维曲线

Fig. 8  $K_z$  (a)、 $K_y$  (b)、 $i$  (c) versus  $a$  and  $D$



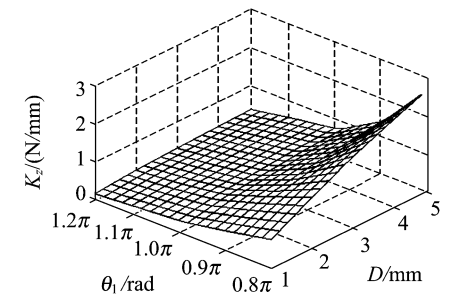
(a)  $\theta_1 = 0.8 \pi$  rad (b)  $\theta_1 = 0.9 \pi$  rad



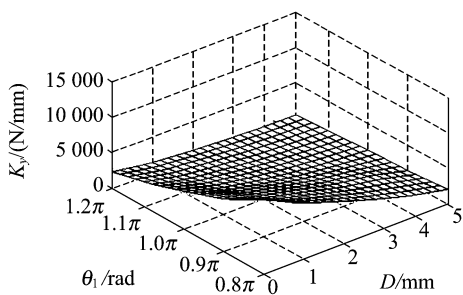
(c)  $\theta_1 = \pi$  rad (d)  $\theta_1 = 1.1 \pi$  rad (e)  $\theta_1 = 1.2 \pi$  rad

图 9 有限元分析模型

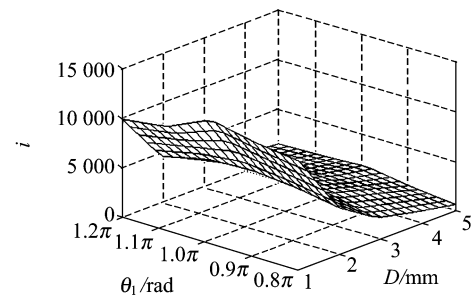
Fig. 9 Finite element analysis models



(a)



(b)



(c)

图 10  $K_z$ (a)、 $K_y$ (b)、 $i$ (c)随  $\theta$  和  $D$  变化的三维曲线

Fig. 10  $K_z$ (a)、 $K_y$ (b)、 $i$ (c) versus  $\theta$  and  $D$

取  $r_0 = 20$  mm,  $\theta_1 = \pi$  rad,  $a = \frac{20 \cdot \pi}{\pi^b}$  mm/rad

使螺旋缝有效分布在面弹簧上。  $b$  分别取 0.5、1、2、3, 建立有限元模型如图 11 所示。有限元分析时,  $D$  取 0、1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm; 轴向拉伸过程中, 径向干扰力  $F_y = 2$  N。经过网格划分、加载、求解, 得到参数  $b$  在面弹簧轴向拉伸不同位置时对其  $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$  影响的规律, 采用双线性插值法得到三维曲线, 如图 12。

由图 12 可以得到: 随着  $D$  的增大, 螺旋缝形面弹簧  $K_z$  增大,  $K_y$  减小,  $i$  减小; 随着  $b$  的增大,

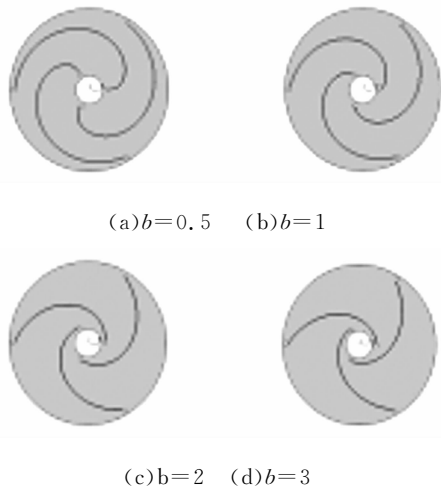
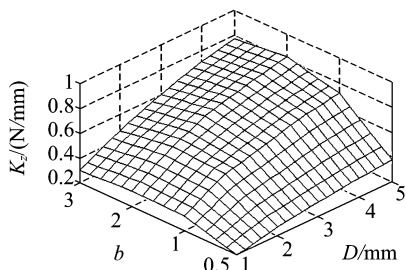
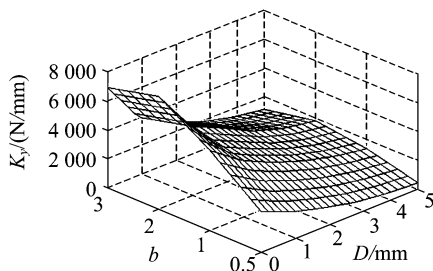


图 11 有限元分析模型

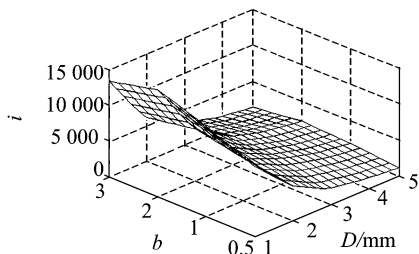
Fig. 11 Finite element analysis models



(a)



(b)



(c)

图 12  $K_z$ (a)、 $K_y$ (b)、 $i$ (c)随  $b$  和  $D$  变化的三维曲线

Fig. 12  $K_z$ (a)、 $K_y$ (b)、 $i$ (c) versus  $b$  and  $D$

螺旋缝形面弹簧的  $K_z$  和  $K_y$  先增大后减小,  $i$  先

增大后减小。当  $b=2$  时,  $i$  最大。

(2) 螺旋缝形面弹簧直径  $\phi$  对  $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$  的影响

取  $r_0 = 20 \text{ mm}$ ,  $\theta_1 = \pi \text{ rad}$ ,  $b = 1$ ,  $a = (\frac{\phi/2 - 17.2}{\pi}) \text{ mm/rad}$ , 使螺旋缝有效分布在面弹簧上,  $E = 1.3 \times 10^{11} \text{ Pa}$ ,  $n = 3$ ,  $t = 0.2 \text{ mm}$ 。 $\phi$  分别取 100 mm、150 mm、200 mm、250 mm, 建立有限元模型如图 13 所示。有限元分析时,  $D$  取 0、1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm; 轴向拉伸过程中, 径向干扰力  $F_y = 2 \text{ N}$ 。经过网格划分、加载、求解, 得到参数  $\phi$  在面弹簧轴向拉伸不同位置时对其  $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$  影响的规律, 采用双线性插值法得到三维曲线, 如图 14。

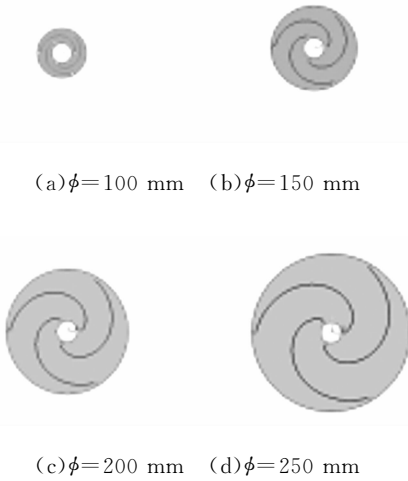


图 13 有限元分析模型

Fig. 13 Finite element analysis models

由图 14 可以得到: 随着  $D$  的增大, 螺旋缝形面弹簧的  $K_z$  增大,  $K_y$  减小,  $i$  减小; 随着  $\phi$  的增大, 螺旋缝形面弹簧的  $K_z$  减小,  $K_y$  增大,  $i$  增大。

(3) 螺旋缝形面弹簧根数  $n$  对  $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$  的影响

取  $r_0 = 20 \text{ mm}$ ,  $\theta_1 = \pi \text{ rad}$ ,  $b = 1$ ,  $a = 20 \text{ mm/rad}$ , 使螺旋缝有效分布在面弹簧上,  $E = 1.3 \times 10^{11} \text{ Pa}$ ,  $t = 0.2 \text{ mm}$ ,  $\phi = 200 \text{ mm}$ 。 $n$  分别取 3、4、5、6, 建立有限元模型如图 15 所示。有限元分析时,  $D$  取 0、1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm; 轴向拉伸过程中, 径向干扰力  $F_y = 2 \text{ N}$ 。经过网格划分、加载、求解, 得到参数  $n$  在面弹簧轴向拉伸不同位置时对其  $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$  影响的规律, 采用双线性插值法最终得到三维曲线, 如图 16。

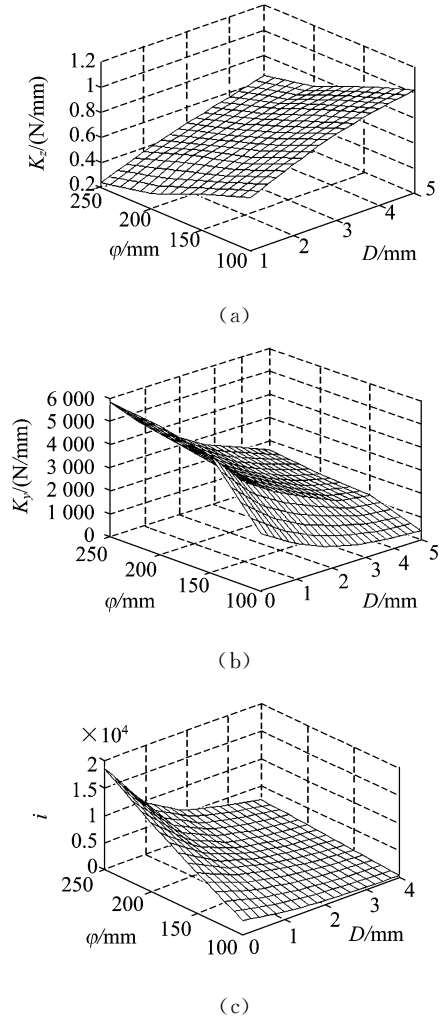


图 14  $K_z$  (a)、 $K_y$  (b)、 $i$  (c) 随  $\phi$  和  $D$  变化的三维曲线

Fig. 14  $K_z$  (a)、 $K_y$  (b)、 $i$  (c) versus  $\phi$  and  $D$

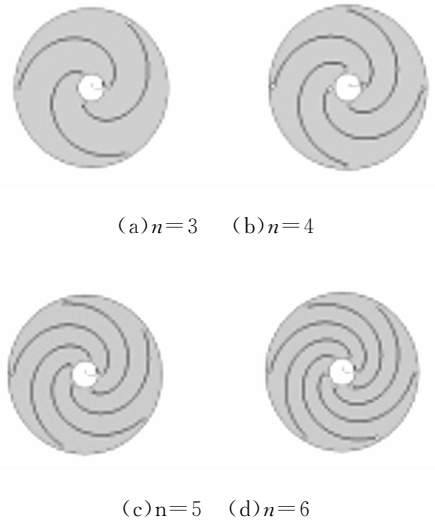


图 15 有限元分析模型

Fig. 15 Finite element analysis models

由图 16 可以得到: 随着  $D$  的增大, 螺旋缝形

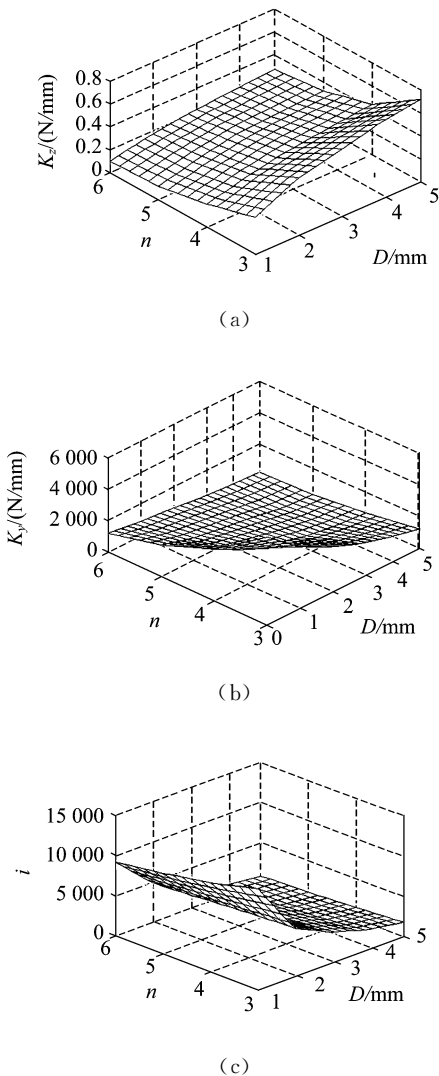


图 16  $K_z$ (a)、 $K_y$ (b)、 $i$ (c)随  $n$  和  $D$  变化的三维曲线  
 Fig. 16  $K_z$ (a)、 $K_y$ (b)、 $i$ (c) versus  $n$  and  $D$

面弹簧  $K_z$  增大,  $K_y$  减小,  $i$  减小; 随着  $n$  的增大, 螺旋缝形面弹簧的  $K_z$ 、 $K_y$  和  $i$  都减小。

(4)螺旋缝形面弹簧厚度  $t$  对  $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$  的影响

取  $r_0 = 20 \text{ mm}$ ,  $\theta_1 = \pi \text{ rad}$ ,  $b = 1$ ,  $a = 20 \text{ mm/rad}$ , 使螺旋缝有效分布在面弹簧上,  $E = 1.3 \times 10^{11} \text{ Pa}$ ,  $n = 3$ ,  $\phi = 200 \text{ mm}$ , 有限元分析模型如图 17 所示。在模型单元厚度设置对话框中分别输入  $0.1 \text{ mm}$ 、 $0.15 \text{ mm}$ 、 $0.2 \text{ mm}$ 、 $0.25 \text{ mm}$ 、 $0.3 \text{ mm}$ 。有限元分析时,  $D$  取  $0.1 \text{ mm}$ 、 $2 \text{ mm}$ 、 $3 \text{ mm}$ 、 $4 \text{ mm}$ 、 $5 \text{ mm}$ ; 轴向拉伸过程中, 径向干扰力  $F_y = 2 \text{ N}$ 。经过网格划分、加载、求解, 得到参数  $t$  在面弹簧轴向拉伸不同位置时对其  $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$  影响的规律, 采用双线性插值法得到三维曲线, 如图 18。

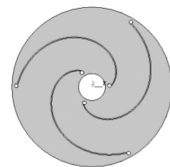


图 17 有限元分析模型  $r_1 = 20 \text{ mm}$ ,  $\theta_1 = \pi \text{ rad}$ ,  $b = 1$ ,  $a = 20 \text{ mm/rad}$ ,  $\phi = 200 \text{ mm}$ ,  $n = 3$ ,  $E = 1.3 \times 10^{11} \text{ Pa}$

Fig. 17 Finite element analysis models with  $r_1 = 20 \text{ mm}$ ,  $\theta_1 = \pi \text{ rad}$ ,  $b = 1$ ,  $a = 20 \text{ mm/rad}$ ,  $\phi = 200 \text{ mm}$ ,  $n = 3$ ,  $E = 1.3 \times 10^{11} \text{ Pa}$

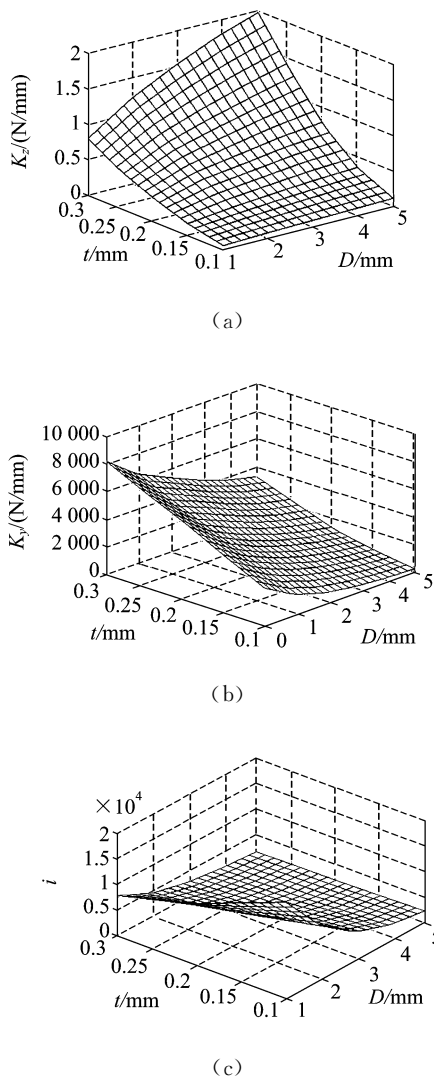


图 18  $K_z$ (a)、 $K_y$ (b)、 $i$ (c)随  $t$  和  $D$  变化的三维曲线  
 Fig. 18  $K_z$ (a)、 $K_y$ (b)、 $i$ (c) versus  $t$  and  $D$

由图 18 可以得到: 随着  $D$  的增大, 螺旋缝形面弹簧  $K_z$  增大,  $K_y$  减小,  $i$  减小; 随着  $t$  的增大, 螺旋缝形面弹簧的  $K_z$  和  $K_y$  增大,  $i$  减小。

(5)螺旋缝形面弹簧弹性模量  $E$  对  $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$  的影响

取  $r_0 = 20 \text{ mm}$ ,  $\theta_1 = \pi \text{ rad}$ ,  $b = 1$ ,  $a = 20 \text{ mm/rad}$ , 使螺旋缝有效分布在面弹簧上,  $\phi = 200 \text{ mm}$ ,  $t = 0.2 \text{ mm}$ ,  $n = 3$ , 有限元分析模型同图 17, 在材料弹性模量设置对话框中分别输入  $0.7 \text{e}11 \text{ Pa}$ 、 $0.9 \text{e}11 \text{ Pa}$ 、 $1.1 \text{e}11 \text{ Pa}$ 、 $1.3 \text{e}11 \text{ Pa}$ 。有限元分析时,  $D$  取  $0$ 、 $1 \text{ mm}$ 、 $2 \text{ mm}$ 、 $3 \text{ mm}$ 、 $4 \text{ mm}$ 、 $5 \text{ mm}$ ; 轴向拉伸过程中, 径向干扰力  $F_y = 2 \text{ N}$ 。经过网格划分、加载、求解, 得到参数  $E$  在面弹簧轴向拉伸不同位置时对其  $K_z$ 、 $K_y$ 、 $i$  影响的规律, 采用双线性插值法得到三维曲线, 如图 19。

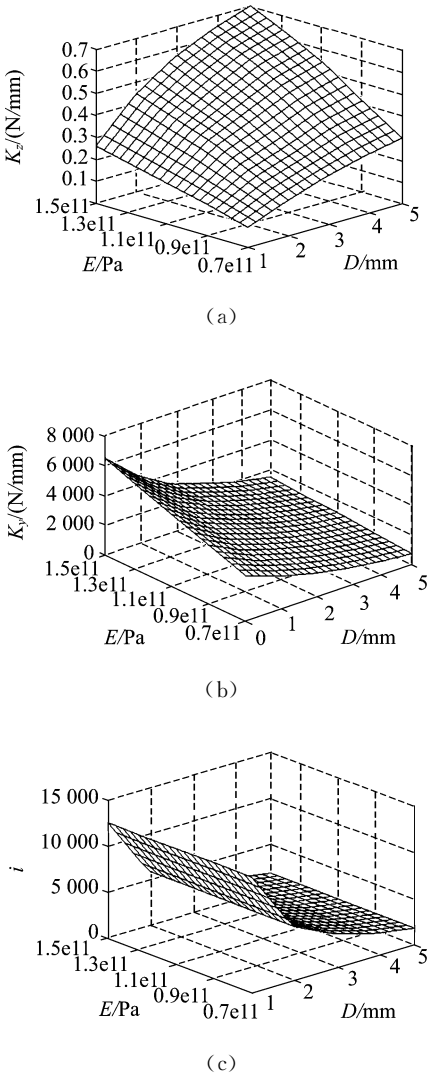


图 19  $K_z$ (a)、 $K_y$ (b)、 $i$ (c) 随  $E$  和  $D$  变化的三维曲线

Fig. 19  $K_z$ (a)、 $K_y$ (b)、 $i$ (c) versus  $E$  and  $D$

由图 19 可以得到: 随着  $D$  的增大, 螺旋缝形面弹簧  $K_z$  增大,  $K_y$  减小,  $i$  减小; 随着  $E$  的增大, 螺旋缝形面弹簧的  $K_z$  和  $K_y$  都增大, 增大倍数基本相同, 所以  $i$  也基本保持不变。

## 4 实验

根据干涉式大气垂直探测仪结构空间尺寸等实际应用要求, 最终确定的一组参数:

$r_0 = 20 \text{ mm}$ ,  $a = 20/\pi^2 \text{ mm/rad}$ ,  $\theta_1 = \pi \text{ rad}$ ,  $b = 2$ ,  $\phi = 200 \text{ mm}$ ,  $n = 3$ ,  $t = 0.2 \text{ mm}$ ,  $E = 1.3 \text{e}11 \text{ Pa}$ 。使得螺旋缝形面弹簧的刚度比  $i$  相对较大, 并据此加工成实物。

### 4.1 螺旋缝形面弹簧轴向刚度实验

螺旋缝形面弹簧轴向拉伸  $1 \text{ mm}$ 、 $2 \text{ mm}$ 、 $3 \text{ mm}$ 、 $4 \text{ mm}$ 、 $5 \text{ mm}$  时, 所用轴向力和轴向刚度的实验值与有限元计算值对比曲线如图 20 所示。

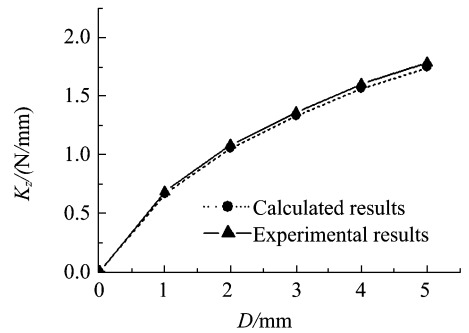


图 20 轴向刚度计算值和实验值的对比曲线

Fig. 20 Comparison between calculated axial stiffness coefficients and experimental ones

由图 20 可以得到: 轴向刚度有限元理论计算值与实验值的两条曲线走势相同并且基本吻合。

### 4.2 动镜运动倾斜实验

本实验主要检测指标是: 动镜在电机驱动下做  $\pm 5 \text{ mm}$  直线往复运动的过程中, 产生的最大倾斜角度。实验系统如图 21 所示, He-Ne 激光经过准直后以  $45^\circ$  角入射到分束器上, 准直器与分束器之间加圆形光阑限制光束直径。调节动镜支撑系统, 使光束正入射到动镜上。反射光经分束器透射到与动镜相距为  $L$  处的竖直白屏上。白屏上观测到的是一个圆形光斑, 如果动镜在直线往复运动过程中发生倾斜, 圆形光斑会产生相应的移动。设光斑中心移动距离为  $d$ , 则动镜倾

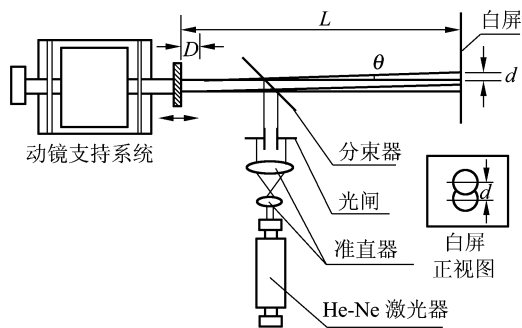


图 21 动镜运动倾斜实验系统图

Fig. 21 Moving mirror tilt test system

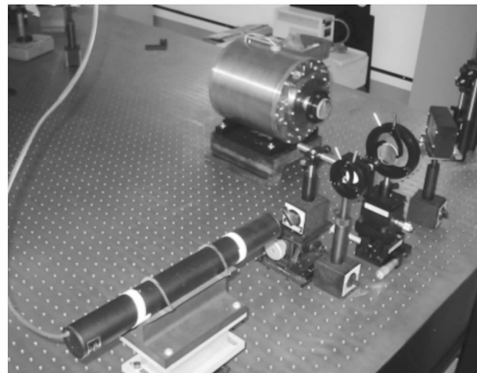


图 22 动镜运动倾斜测试实验实物图

Fig. 22 Configuration of moving mirror tilt test system

斜角  $\theta$  可由下式得出:

$$\theta = \frac{d}{D} \times \frac{180}{\pi} \times 3600'' \quad (5)$$

图 22 为动镜运动倾斜测试实验实物图。动镜在直线电机的驱动下做  $\pm 5$  mm 的往复运动,观察在此过程中光斑中心的最大偏移量  $d$  的变化范围,表 1 是动镜在运动过程中最大倾斜角的测试数据。

表 1 动镜运动最大倾角测试数据

Tab. 1 Test data of the maximum tilt of the moving mirror

动镜行程 $D(\text{mm})$	镜屏间距 $L(\text{mm})$	光斑最大偏移 $d(\text{mm})$	动镜最大倾斜角 $\theta(^{\circ})$
$\pm 5$	18 000	1.5~2	18~24

通过实验得到动镜在运动过程中的最大倾斜

角  $\theta$  在  $18 \sim 24''$ , 满足仪器对动镜运动最大倾斜角不能超过  $30''$  的要求,证明了所设计的螺旋缝形面弹簧具有较大的径向刚度,且抗干扰能力强。

## 5 结 论

通过对面弹簧上缝形的有限元分析,得到各参数对面弹簧轴向刚度、径向刚度、刚度比的影响规律并由此设计出螺旋缝形面弹簧。实测结果验证了所设计的螺旋缝形面弹簧具有的轴向行程和较大的刚度比,达到了面弹簧的设计目标。本文对面弹簧的研究旨在提高干涉式大气垂直探测仪的干涉性能,以获得好的干涉信号质量,保证大气温度、湿度和大气成分等气象测量数据的准确性。

## 参考文献:

- [1] KOHRMAN R J, LUCE S D. Mechanical design of the cross-track infrared sounder (CrIS)[J]. *SPIE*, 2002, 4486: 445-455.
- [2] STUMPF K, OVERBECK J. CrIS optical system design[J]. *SPIE*, 2002, 4486: 437-444.
- [3] BINGHAM G E, CANTWEL L G, ROBINSON R C, et al. Image stability requirements for a geostationary imaging Fourier transform spectrometer (GIFTS)[J]. *SPIE*, 4151: 11-20.
- [4] HENAULT F, BUIL C, SCHEIDEL D. Spaceborne infrared interferometer of the IASI instrument[J]. *SPIE*, 1998, 3437: 328-345.
- [5] ANSYS, Inc. ANSYS structural analysis guide release 5.4 third edition[M]. SAP, IP Inc. 1997.
- [6] 龚曙光. ANSYS 在应力分析设计中的应用[M]. CAD/CAM 计算机辅助设计与制造, 2001.
- [7] 龚曙光. ANSYS 基础应用及范例解析[M]. 长春:机械工业出版社, 2003.

- [8] 易日. 使用 ANSYS 6.1 进行结构力学分析[M]. 北京:北京大学出版社,2002.  
YI R. *Utilizing ANSYS-6.1 to analyze structural mechanics* [M]. Beijing: Beijing University Press, 2002. (in Chinese)
- [9] 贾宇辉,谭久彬. 超磁致伸缩驱动器及有限元分析方法的研究[J]. 光学 精密工程,2000,4(2):161-164.  
JIA Y H, TAN J B. Giant magnetostrictive actuator and finite element model[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000,4(2):161-164. (in Chinese)
- [10] 刘宏伟,张芹,丁亚林,等. 基于有限元分析的长条状主镜支撑结构设计[J]. 光学 精密工程,2003,12(6):555-559.  
LIU H W, ZHANG Q, DING Y L, *et al.* Design of strip primary mirror supporting structure based on finite element analysis [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003,12(6):555-559. (in Chinese)

**作者简介:**陶津平(1977—),男,天津市人,中国科学院上海技术物理研究所博士研究生,主要从事大气垂直探测仪的研究工作. E-mail: tjp0325@tom.com.