

# 棱镜自重变形对波面影响的研究\*

张德江 刘立人 孙建锋 徐荣伟 李大汕

(中科院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 采用有限元方法分析了单棱镜在重力作用下三个典型位置的表面变形,对棱镜表面  $\Phi 425$  mm 通光孔径轴向变形量进行 Zernike 多项式拟合,画出了相应的波差图,并确定设计方案. 进一步选择  $\Phi 360$  mm 口径光束对双棱镜在几种典型相对位置下进行光线采样、追迹,计算得到不同情况下由于双棱镜自重变形引起的总波差.

**关键词** 星间光通信;波像差;有限元分析;轨道模拟器;Zernike 多项式

**中图分类号** TH74 **文献标识码** A

## 0 引言

棱镜或棱镜系统对光束的偏转<sup>[1,2]</sup>作用在很多方面有着重要的应用,在精密光学系统尤其是成像系统中,其光学性能通常都需要进行分析<sup>[3,4]</sup>或修正<sup>[5]</sup>,以确保误差在允许范围内,同时棱镜的分析与反射镜<sup>[6]</sup>的相关分析是不同的.

在星间光通信项目中,通信终端的光学性能和技术特征只能通过地面模拟测试得到,需要开发一种设备<sup>[7]</sup>来模拟两通信卫星的相对轨道,旋转双棱镜轨道模拟器<sup>[8]</sup>可实现这个要求. 双棱镜轨道模拟器由双圆形棱镜构成,根据指标要求,要保证棱镜顶角  $\alpha$  为  $15^\circ$ ,通光口径  $\Phi 425$  mm. 在这样的前提下,造成棱镜长、短边尺寸差距很大,棱镜单件质量可达 36.625 kg,这样的设计是否安全合理,棱镜能否承

受装卡状态下的最大应力,是关心的焦点,所以必须对棱镜在重力作用下的变形、应力及对光学性能的影响进行分析. 根据具体要求,棱镜设计有短边 20 mm 和 30 mm 两种考虑方案,其它参量相同,采用有限元分析软件 ANSYS 对两种方案进行了比较分析,以选取棱镜在重力、旋转角速度、角加速度以及装卡作用下变形及应力较小的方案.

## 1 单棱镜的有限元分析

由于分析过程数据量非常庞大,先研究一下单棱镜在重力作用下的变形情况,以确定方案,接着再分析双棱镜. 因棱镜的几何形状不规则,为了保证分析的准确度,选取三维 20 节点体单元 solid95 划分网格,共划分 5440 个单元,26409 个节点. 棱镜旋转过程中三个典型位置处的有限元模型如图 1.

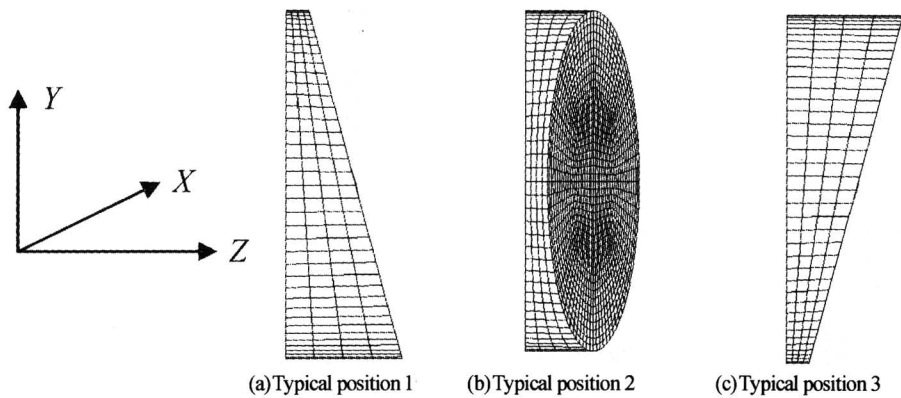


图 1 棱镜三种典型位置  
Fig. 1 Three typical positions of a prism

对每个典型位置处的有限元模型下半圆周施加全约束,轴向采用环形支撑,并施加重力加速度 ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ),旋转角速度 ( $0.0035 \text{ rad/s}$ ),角加速度 ( $0.00035 \text{ rad/s}^2$ ) 载荷,进行有限元求解计算,分析

结果如表 1,2. 其中坐标原点  $O$  在棱镜最左侧表面的中心,棱镜的光轴为坐标系的  $Z$  轴,旋转角速度

表 1 短边为 20 mm 时的分析结果

	X 方向变形/nm		Y 方向变形/nm		Z 方向变形/nm	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
位置 1	-0.979	0.979	-6.31	0	-3.21	0.281
位置 2	-1.63	0.59	-6.42	0	-0.848	0.819
位置 3	-1.73	1.73	-9.00	0	-1.44	2.91

\*上海市科学技术发展基金(046105004)和中科院创新计划资助项目

Tel:021-69918763 Email:master\_2002@163.com

收稿日期:2005-01-05

表 2 短边为 30 mm 时的分析结果

	X 方向表面		Y 方向表面		Z 方向表面	
	变形/nm		变形/nm		变形/nm	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
位置 1	-0.919	0.919	-6.17	0	-2.42	0.362
位置 2	-1.75	0.724	-6.63	0	-0.899	0.877
位置 3	-1.84	1.84	-9.05	0	-1.47	2.17

和角加速度方向均与光轴 Z 正向一致。

由表 1 和表 2 分析结果可见, X, Y, Z 方向的变形极值都在纳米量级, 变形值都很小且相差不大, 我们还难以决定究竟采用那种方案比较好。

下面从玻璃最大等效应力的角度来分析, 看两方案是否安全及哪种方案的最大应力比较小。由有限元分析结果可得到表 3 最大等效应力数据。棱镜

材料为 K9 玻璃, K9 玻璃许用应力为  $3.43E+5$  Pa。由表 3 可看出, 两种方案的最大等效应力都在许用应力范围内, 所以均是安全的。综合对比两种方案, 另外从双棱镜轨道模拟器轻量化和小型化考虑, 选取短边为 20 mm 的方案较好。

表 3 两种方案的最大等效应力比较

	位置 1 最大 等效应力	位置 2 最大 等效应力	位置 3 最大 等效应力
短边 20 mm	13721 Pa	14962 Pa	17124 Pa
短边 30 mm	14252 Pa	15389 Pa	17125 Pa

提取短边为 20 mm 棱镜表面坐标信息和轴向变形数据进行 Zernike 多项式拟合, 画出不同位置棱镜表面波差图如图 2。

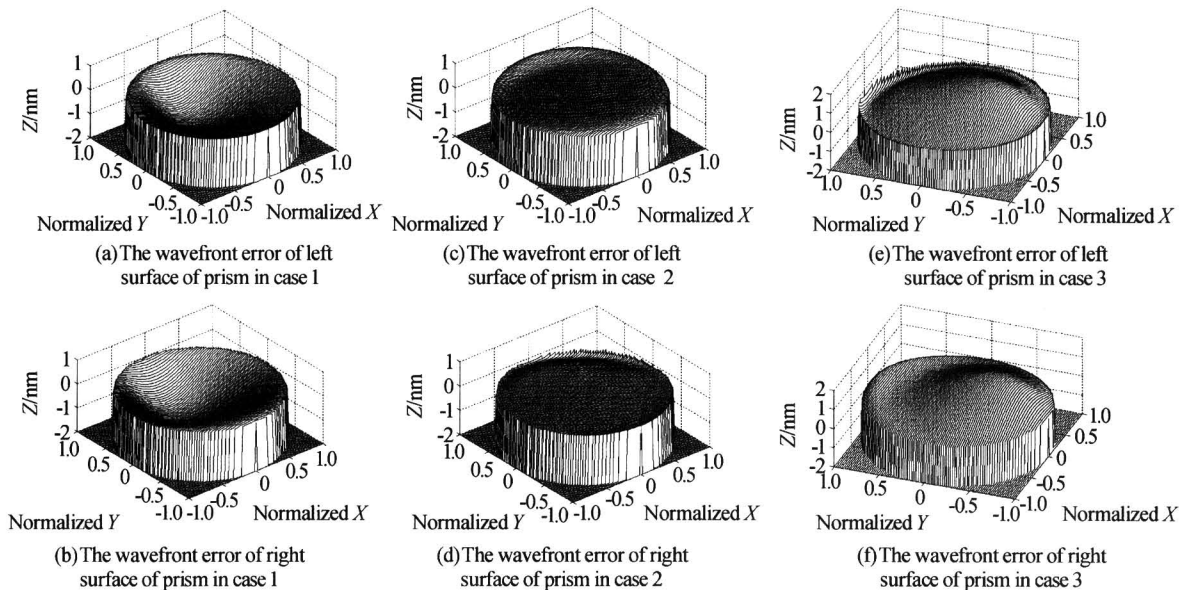


图 2 棱镜三个典型位置对应的表面波差图

Fig. 2 The surface wavefront error of prism in three typical positions

由单棱镜的表面波差图可看出, 当棱镜处于位置 1, 位置 3 时表面变形较大, 且表面变形方向的不同使波差产生了正负之分。

## 2 双棱镜的分析方法

在对单个棱镜分析的过程中, 得出了选用短边为 20 mm 的方案较好的结论。下面进一步分析双棱镜自重变形对透射光波面的影响。对双棱镜而言, 正负波差存在抵消作用, 当双棱镜的波差均为正或均为负时, 双棱镜在重力作用下的变形对出射光波面影响最大。

棱镜装配好后的通光口径为  $\Phi 425$  mm, 但由于两个棱镜对光线的偏转作用, 完全能够通过的光束口径要小于  $\Phi 425$  mm, 且随双棱镜相对位置的不同存在显著变化。对应单棱镜的典型位置, 只考虑两个棱镜旋转方向一致的情况, 双棱镜典型相对位置

会有九种情况, 其有限元模型如图 3。

图 3 中 (c) 和 (g) 两种情况的波差为同负或同正, 对波面的影响最大且等效, 另由单棱镜的分析已得到棱镜变形较大的位置, 所以对双棱镜选取图 3 中的 (a), (c), (e), (i) 四种典型情况进行分析。本文的目的是分析双棱镜在重力作用下对入射光束波面的影响, 采用下面的分析方法:

1) 从左向右, 依次对双棱镜四个表面在  $\Phi 425$  mm 通光口径范围内提取 X, Y 坐标和 Z 方向 (光轴方向) 变形数据, 对 X, Y 坐标值进行归一化, 进行 Zernike 多项式拟合, 得到 Zernike 多项式的前 36 项系数, 画出波差图; 2) 为了保证光束在双棱镜旋转过程中能顺利通过, 选择在  $\Phi 360$  mm 口径范围内对光线进行采样, 后面的分析将证明  $\Phi 360$  mm 口径的光束能顺利通过棱镜。对采样光线进行追迹, 可以获取光线在棱镜各个表面的位置坐标信息;

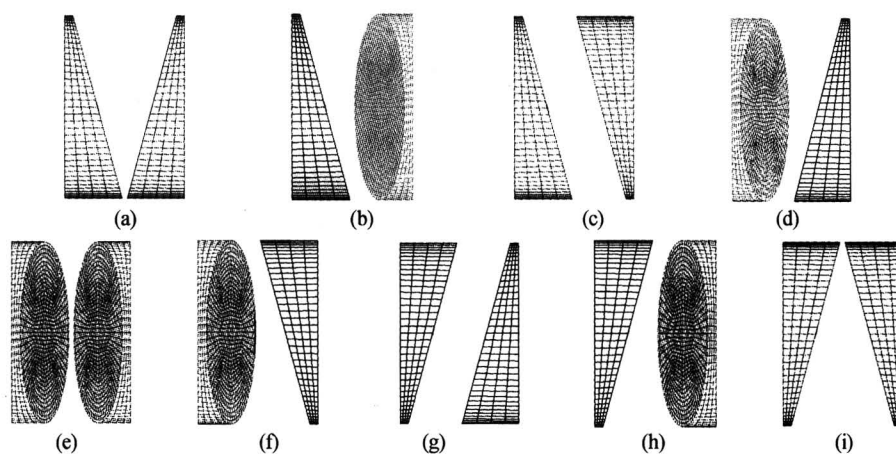


图3 双棱镜相对典型位置

Fig. 3 The typical relative positions of double prisms

3)将棱镜每个表面追迹光线的  $X, Y$  坐标变换到 Zernike 波面图中的相对  $X, Y$  坐标,由 Zernike 多项式计算得到对应的波像差值. 这样,追迹光线的总波像差为各个表面的波像差之和.

### 3 双棱镜分析结果及讨论

双棱镜处于图 3 中(a), (c), (e), (i)四种典型相对位置时的分析结果见表 4,列出了总波差的最大值,最小值,峰谷值(P-V)和均方根值(RMS).

表 4 四种典型相对位置的双棱镜总波差分析结果

	最大值/nm	最小值/nm	P-V/nm	RMS/nm
图 3(a)	1.3378	-0.40958	1.74738	0.32444
图 3(c)	-0.13423	-5.291	5.15677	1.54413
图 3(e)	0.1604	-0.07029	0.23069	0.05022
图 3(i)	0.39585	-1.2282	1.62405	0.30341

由表 4 可看出,双棱镜处于图 3(e)相对位置时,总波差 RMS 值最小,图 3(c)情况由于两个棱镜引起的波差均为负值,总波差 RMS 值最大. 另由光线追迹结果可得到:

1)双棱镜处于图 3(a)相对位置时,对光线在  $Y$  方向的偏转最大,光束最低点光线  $Y$  坐标偏移了 29.681 mm,最小值为 -209.681 mm,其绝对值小于通光口径的一半(212.5 mm),所以  $\Phi 360$  mm 的光束能顺利通过;2) $\Phi 360$  mm 口径平行光束经过第一个棱镜的偏转,在垂直于光线传播方向的接收面上显示为一椭圆,尽管椭圆长短轴差别很小,仍近似为圆形. 光束再通过第二个棱镜的偏转,变为一个近圆的复杂图形,且随双棱镜相对位置的不同而不同.

### 4 结论

通过对棱镜重力变形的有限元分析,验证了棱

镜设计的安全性,结合 Zernike 多项式拟合及光线追迹,画出了棱镜每个表面通光孔径的波差图,并计算得到双棱镜  $\Phi 360$  mm 口径范围内总波差的具体数值,对于旋转双棱镜轨道模拟器光学性能的分析以及棱镜的加工制造,都具有重要的现实意义.

#### 参考文献

- Juhala E R, Dubée G. Refractive beam steering. *Proc of SPIE*, 2004, **5528**: 282~292
- Lang P A. Optical deflector with high and variable sensitivity. *J. Phys E: Sci Instrum*, 1983, **16**: 1022~1023
- Ogle N K. Distortion of the image by prisms. *Journal of the Optical Society of America*, 1951, **41**(12): 1023~1028
- Mao W W, Xu Y X. Distortion of optical wedges with a large angle of incidence in a collimated beam. *Opt Eng*, 1999, **38**(4): 580~585
- Sparrold W S, Mills P J, Knapp J D, et al. Conformal dome correction with counterrotating phase plates. *Opt Eng*, 2000, **39**(7): 1822~1829
- 丁福建,李英才. 反射镜浮动支撑的应力与变形分析及支撑参数的优化. *光子学报*, 1998, **27**(11): 1041~1045  
Ding F J, Li Y C. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(11): 1041~1045
- 云茂金,祖继锋,孙建锋,等. 精密旋转双棱镜光束扫描器及其控制方法. 中国专利, 发明专利, 1542490, 2004-11-03  
Yun M J, Zu J F, Sun J F, et al. *China Patent, Invention Patent*, 1542490, 2004-11-03
- Sun J F, Liu L R, Yun M J, et al. Double prisms for two-dimensional optical satellite relative-trajectory simulator. *Proc of SPIE*, 2004, **5550**: 411~418

## The Research on Wavefront Error Induced by the Deformation of Prisms Under Gravity

Zhang Dejiang, Liu Liren, Sun Jianfeng, Xu Rongwei, Li Dashan

*Shanghai Institute of Optical and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*

Received date: 2005-01-05

**Abstract** Firstly finite element method is adopted to analyse surface deformation of a single prism under gravity when it is in three typical positions, and Zernike polynomials are fitted for  $\Phi 425$  mm axial deformations of the prism surfaces, corresponding wavefront error figures are plotted, a design of prism is choosed. Then  $\Phi 360$  mm light beam is sampled and ray tracing for double prisms in several typical relative position, and corresponding total wavefront error of double prisms under gravity are computed.

**Keywords** Laser communication in space; Wavefont error; Finite element analysis; Trajectory simulator; Zernike polymial



**Zhang Dejiang** was born in July 11, 1978, in Chaoyang, Liaoning Province, China. He received the B. E. Degree from physics department, Liaoning University in 2002. Now he is a M. S. candidate in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His major research interests include optical communication and finite element analysis of large-sized primary mirror of optical instruments.