

文章编号: 0253-2239(2005)04-538-4

透镜自重变形引起波像差的有限元分析*

张德江 刘立人 徐荣伟 李大汕

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 在用大口径、长焦距平行光管模拟激光远场特性时,其光组透镜在重力作用下的变形不能忽略,为了分析对出射光束质量的影响,采用有限元分析软件“ANSYS”建立了平行光管光组中 $\phi 400$ mm 平凸透镜的有限元模型,给出一种分析透镜轴向变形引起的波像差的方法,在不同工况下,计算了平凸透镜在重力作用下轴向变形的峰谷值和均方根值,对轴向变形量均方根值最小工况画出了透镜表面变形的等值线图,计算了 $\phi 350$ mm 通光口径内的波像差峰谷值和均方根值,对平行光管光组的波像差做出估计,验证了设计的合理性。

关键词: 光学器件; 透镜; 平行光管; 波像差; 有限元分析; 星间光通信

中图分类号: TH74 文献标识码: A

Finite Element Analysis for Wavefront Error of Lenses Induced by Gravity

Zhang Dejiang Liu Liren Xu Rongwei Li Dashan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract: When collimator with big diameter and long focal length is used to simulate laser far-field character, the deformation of its lens under gravity cannot be ignored. To analyze the effect, finite element analysis software ANSYS is adopted to simulate a $\phi 400$ mm plano-convex lens from a collimator, and a method is presented to analyse wavefront error caused by axial deformation of lens, P-V and RMS values of axial deformations under gravity are computed in different cases, the contours of lens surface are plotted when RMS values of axial deformations is the smallest, the P-V and RMS wavefront error in $\phi 350$ mm are also calculated, finally the wavefront error of lenses is estimated in optimal case, and the rationality of collimator design is validated.

Key words: optical devices; lens; collimator; wavefront error; finite element analysis; space laser communication

1 引 言

在空间光通信中,涉及接近衍射极限的波面检测^[1],欧洲航天局(ESA)半导体激光星间通信实验(Semiconductor Laser Intersatellite Link Experiment,缩写为 SILEX)计划以及日本 Laser Communication Experiment (LCE)计划都做了相应的工作^[2,3]。其中一项重要的工作是在地面模拟激光远距离传输的光场特性,需要用大口径、长焦距的平行光管来实现,要求平行光管在实现激光远场特性模拟的过程中,引起的波像差小于瑞利判据,再加上透镜加工制造,安装等引起的面形误差,平行光管引起的波像差要远小于瑞利判据才能满足实验要求。

对于大口径平行光管,其光组透镜在重力作用下的变形已不能忽略,有限元方法不失为一种好的分析方法。采用有限元法对光学主镜受各种因素影响的变形进行分析,国内外进行了大量的报道,但大多是对大口径反射镜进行的分析,主要可分为以下几种情况:1)镜子几何形状及口径不同^[4,5];2)支撑方式不同^[4,6];3)施加载荷不同^[6,7]。文献[5]针对两种常见的径向支撑方式:点支撑和带支撑,以及相应的轴向支撑方式,给出了透镜表面变形的结果,并与实验结果进行了比较。但该文没有给出变形对波面的影响,即变形导致的光学波像差,并且在实际应用中,为了避免应力集中,所说的“点”支撑通常被弧

* 上海市科学技术发展基金(046105004)和中国科学院创新计划资助课题。

作者简介:张德江(1978~),男,辽宁朝阳人,主要从事大型光学仪器主镜的有限元分析、验证工作。

E-mail:master_2002@163.com

收稿日期:2004-05-28;收到修改稿日期:2004-08-19

面支撑代替。文献[7]对不受重力影响的空间相机光学窗口进行了热光学分析,计算了光学窗口在一个轨道周期内各典型位置的均方根波像差。

基于以上考虑,本文试图寻找一种分析透镜自重变形引起波像差的方法,结合课题实验要求,分析了自行设计的一个平行光管透镜光组,光组由两个 $\phi 400$ mm平凸透镜组成,水平放置,光组示意图如

表 1 透镜参量

Table 1 Lenses parameters

Material		Physical properties	
Young's modulus $E / (\text{N}/\text{m}^2)$	8.132×10^{10}	Diameter D / mm	400
Poisson's ratio μ	0.209	Thickness t / mm	40
Material density $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	2530	L_1 Radius of curvature R_1 / m	18.908
Refractive index n	1.51637	L_2 Radius of curvature R_2 / m	12.500

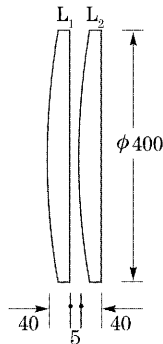


图 1 平行光管光组透镜

Fig. 1 The collimator lenses

图 1 所示,透镜参量见表 1。透镜径向采用三点弧面支撑,弧面对应的圆心角为 18° ,轴向为环形支撑。本文对多种工况做了有限元分析,并与两点支撑方式进行了比较,给出了一种计算透镜自重变形引起波像差的方法,计算了透镜的波像差峰谷(P-V)值和均方根(RMS)值,并对光组的波像差进行了估计,验证此平行光管光组的设计满足实验要求。

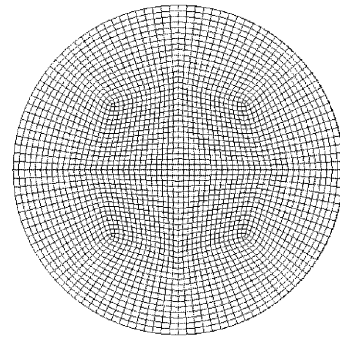


图 2 平凸透镜有限元模型

Fig. 2 Finite element model of plano-convex lens

2 采用的分析方法和有元模型的建立

自重变形主要指光学镜子在重力作用下的变形以及在镜室中受到卡夹或压紧的变形,通常表面变形是用许多表面点相对于某一最佳拟合面的轴向偏差的均方根值来表示的。在光学上,我们关心的是各种因素引起的变形对反射或透射的波面的影响,通常用光学波像差来衡量,可通过计算实际波面和理想波面之间的光程差而得到。对反射镜来说,通常取理想反射面为最佳拟合面,只需计算实际反射面相对于最佳拟合面的光程差即可。透镜的不同之处在于入射面和出射面都有相对于理想表面的轴向变形,需要计算光轴方向的总变形量引起的光程差。针对本文分析的平凸透镜,具体分析方法如下:

1)用 ANSYS 软件建立平凸透镜的实体模型,为了分析计算结果的准确性,采用二次三维实体单元进行有限元分网,要求变形前透镜入射面上节点坐标 (x_{r1}, y_{r1}, z_{r1}) 和出射面上的节点坐标 (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1}) 一一对应,透镜有限元模型如图 2 所示。

2)在不同工况下对有限元模型施加载荷和约束,进行有限元计算,可得到透镜入射面坐标改变量 $(\Delta x_r, \Delta y_r, \Delta z_r)$ 和出射面坐标改变量 $(\Delta x_c, \Delta y_c, \Delta z_c)$ 。载荷和约束示意图如图 3 所示。

3)求出入射面和出射面变形后的节点新坐标 (x_{r2}, y_{r2}, z_{r2}) 及 (x_{c2}, y_{c2}, z_{c2}) 其表达式如下

$$\begin{cases} x_{r2} = x_{r1} + \Delta x_r \\ y_{r2} = y_{r1} + \Delta y_r \\ z_{r2} = z_{r1} + \Delta z_r \end{cases}, \begin{cases} x_{c2} = x_{c1} + \Delta x_c \\ y_{c2} = y_{c1} + \Delta y_c \\ z_{c2} = z_{c1} + \Delta z_c \end{cases}, \quad (1)$$

4)所分析透镜为薄透镜,则有

$$\begin{cases} x_{r2} = x_{c2} = x \\ y_{r2} = y_{c2} = y \end{cases}, \quad (2)$$

我们感兴趣的是透镜上坐标为 (x, y) 的点对应的轴向变形量 Δz , 可把 Δz 看作坐标 (x, y) 的函数,即 $\Delta z_r(x, y)$ 和 $\Delta z_c(x, y)$ 。

5)进一步可得到:

$$\Delta d(x, y) = \Delta z_r(x, y) - \Delta z_c(x, y), \quad (3)$$

$$W(x, y) = (n - 1)\Delta d(x, y), \quad (4)$$

其中 Δd 为透镜的轴向几何变形量; W 为透镜轴向变形引起的波像差; n 为透镜材料的折射率。我们关心

的是波像差 W 的大小,故可不考虑 Δd 的符号问题。

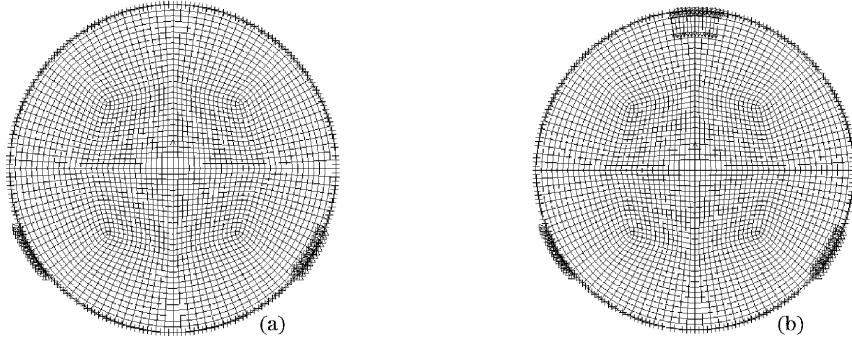


图 3 (a) 两点和(b)三点径向支撑载荷和约束示意图

Fig. 3 The sketch of loads and constrains with two-point (a) and three point (b) radial support

3 不同工况下有限元分析结果及讨论

在实际应用中,对于径向的弧面支撑,为了减小透镜的前后表面的面形变化,在保证安装稳定的前提下,装卡所施加的夹紧力应尽量小。本文分析了透镜的两点支撑方式和三点支撑方式,设底部两支撑点中心相对于透镜中心夹角为 α ,顶支撑点所施

加的夹紧力为 F ,两点支撑实际是三点支撑 F 为零时的特殊情况。

对 α 分别为 $60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$,顶支撑点夹紧力 F 为 $9.8\text{ N}, 19.6\text{ N}, 39.2\text{ N}$ 不同工况进行了分析,得到了轴向变形量的峰谷值和均方根值,分析结果见表 2。

表 2 透镜 L2 三点径向支撑轴向变形量 P-V 值和均方根值

Table 2 The P-V and RMS values of axial deformations of lens L₂ with three-point radial support

α	9.8N		19.6N		39.2N	
	P-V /nm	RMS /nm	P-V /nm	RMS /nm	P-V /nm	RMS /nm
60°	1.655	0.199	1.793	0.213	2.468	0.251
90°	1.734	0.198	1.869	0.215	2.537	0.258
120°	1.883	0.225	2.100	0.249	2.592	0.302

为显示透镜表面变形的趋势,画出三点支撑 $\alpha=90^\circ, F=9.8\text{ N}$ 时 L₂ 表面变形的等值线图,如图 4。

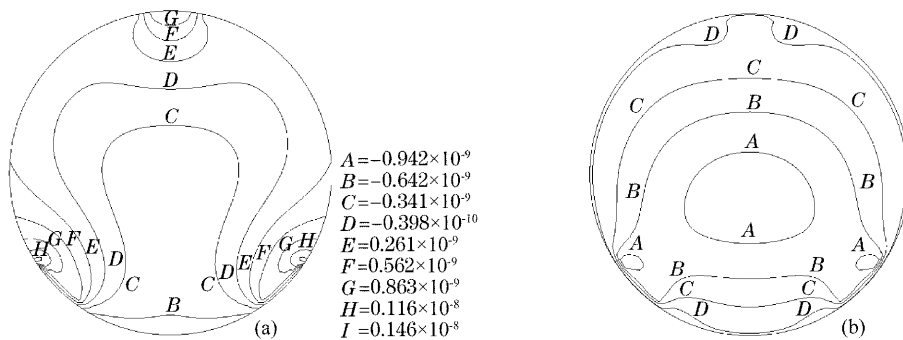


图 4 透镜 L₂ 三点径向支撑平面一侧(a)和球面一侧(b)的等值线图

Fig. 4 The contour of lens L₂ plane side (a) and spherical side (b) with three point radial support

两点支撑方式 α 为不同值时分析结果见表 3,画出了 $\alpha=90^\circ$ 时 L₂ 表面变形的等值线图,如图 5 所示。

下面对计算所得结果进行分析:

1) 由表 2 可以看出, α 分别为 $60^\circ, 90^\circ$ 或 120° 时,轴向变形的峰谷值和均方根值都随着顶支撑点夹紧力 F 的增加而增加,所以在保证透镜稳定的情

况下,安装夹紧力应尽量小。 $\alpha=90^\circ, F=9.8\text{ N}$ 时透镜轴向变形的均方根值最小,最佳支撑点应该在 90° 附近。表 3 的分析结果也证明了这一点。

2) 由图 4、图 5 轴向变形量的等值线图可看出,透镜两点支撑和三点支撑的表面变形均呈轴对称分布,且变形最大的位置在支撑点附近的边缘处。

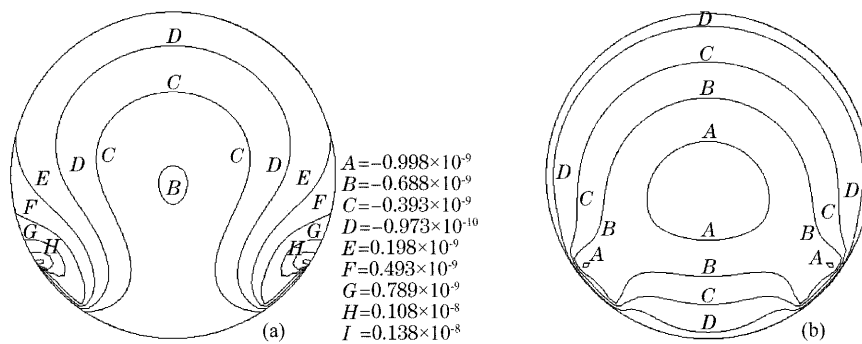
图 5 透镜 L_2 两点径向支撑平面一侧(a)和球面一侧(b)的等值线图Fig. 5 The contour of lens L_2 plane side (a) and spherical side (b) with two-point radial support

表 3 透镜 L_2 两点径向支撑轴向变形量峰峰值和均方根值
 Table 3 The P-V and RMS values of axial deformations of lens L_2 with two-point radial support

α	Axial deformations	
	P-V /nm	RMS /nm
60°	1.621	0.193
90°	1.586	0.188
120°	1.776	0.207

3)对于两种支撑方式,两点支撑要优于三点支撑,但三点支撑相对来说比较稳定,具体采用哪种支撑方式视具体要求而定。我们采用三点支撑方式。

4)经计算透镜采用三点支撑方式, $\alpha = 90^\circ$, $F = 9.8 \text{ N}$ 时 L_2 的波像差 $W_{P-V} = 1.734 \text{ nm}$, $W_{RMS} = 0.198 \text{ nm}$,若 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$,则 $W_{P-V} = 0.00274\lambda$, $W_{RMS} = 0.00031\lambda$,远远小于瑞利判据的要求。在通光口径 $\phi 350 \text{ mm}$ 内, L_2 波像差 P-V 值为 1.237 nm ,均方根值为 0.143 nm ,比全口径的分析结果要好。

5)采用相同的方法对透镜 L_1 进行有限元计算,得到 $\alpha = 90^\circ$, $F = 9.8 \text{ N}$ 时 L_1 通光孔径内波像差最大值 $W_{\max 1} = 0.888 \text{ nm}$,最小值 $W_{\min 1} = -0.218 \text{ nm}$,又有 L_2 通光孔径内的波像差最大值 $W_{\max 2} = 0.993 \text{ nm}$,最小值 $W_{\min 2} = -0.244 \text{ nm}$,则可估计光组轴向变形的引起的波像差不超过 2 nm ,若 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$,则波像差小于 0.004λ ,远小于瑞利判据的要求,验证了平行光管光组设计的合理性。

4 结 论

本文采用有限元方法分析了大口径、长焦距平行光管光组透镜在重力作用下的变形,计算了相应的波像差,所给出的分析方法具有一定的普遍意义,并对光组的波像差作了估计,分析结果对平行光管的设计具有重要的参考价值,也验证了平行光管设计的合理性。

参 考 文 献

- 1 K. Inagaki, M. Nohara, K. Araki *et al.*. Free-space simulator for laser transmission[C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1417**: 160~169
- 2 B. Laurent, G. Planche. SILEX overview after flight terminals campaign[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **2990**: 10~22
- 3 Nakagawa K, Yamamoto A. Performance test result of LUCE (laser utilizing communications equipment) engineering model[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **3932**: 68~76
- 4 A. J. Malvick. Theoretical elastic deformations of the steward observatory 230-cm and the optical sciences center 154-cm mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(3): 575~585
- 5 B. C. Bigelow. Finite element analysis of large lenses for the Keck telescope high resolution echelle spectrograph[C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1532**: 15~26
- 6 Wu Qingwen, Lu E, Wang Jiaqi *et al.*. Study on the surface figure changes of primary mirror centrally supported under gravity load[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1996, **4**(4): 23~28 (in Chinese)
吴清文,卢 铿,王家骥等. 自重作用下中心支撑主反射镜面形变化研究[J]. *光学精密工程*, 1996, **4**(4): 23~28
- 7 Zhao Lixin. Thermal-optical evaluation to optical windows of space camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(10): 1440~1444 (in Chinese)
赵立新. 空间相机光学窗口的热光学评价. *光学学报*, 1998, **18**(10): 1440~1444