

文章编号:1002-2082(2010)06-0914-04

光学窗口形变对平行光管光学性能影响分析

许亮, 李创, 樊学武

(中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要: 由于环境工况的多变性, 光学窗口设计交叉了光、机、热等多种学科。在压差、轴向温差及径向温差工况下, 分析光学窗口形变对某大口径、长焦距平行光管光学性能的影响, 建立了光学窗口的有限元模型, 与理论结果进行对比, 验证了该有限元模型的有效性。以有限元分析得出的光学窗口变形数据为输入数据, 带入改进了的 Zernike 多项式光机分析接口程序, 获得了与像差对应的 Zernike 系数。用得到的 Zernike 系数表示光学窗口面型, 以波像差作为光学系统成像质量评价指标, 分析光学窗口形变对大口径、长焦距平行光管系统光学性能的影响。结果表明: 光学窗口形变对平行光管系统光学性能的影响可以忽略不计。

关键词: 光学窗口; 有限元分析; 大口径、长焦距平行光管; Zernike; 波像差

中图分类号: O43; TH741

文献标志码: A

Deformation of optical window and its influence on collimator's optical performance

XU Liang, LI Chuang, FAN Xue-wu

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China)

Abstract: For various applications, the development of optical window is a multi-discipline engineering effort, which involves optics, mechanics and thermology. Under the circumstance of pressure difference, as well as axial and radial temperature difference, the finite element model (FEM) of optical window is established. The FEM was compared with the theoretical results and validated. Taking FEA data as the input at the interface of modified Zernike polynomial structural/optical analysis, the Zernike coefficients corresponding to aberrations are obtained. Using the obtained Zernike coefficients as the figure of optical window, wave aberration and MTF as measure of imaging quality, the impact of optical window's deformation on optical performance of large-aperture and long focus collimator was analyzed. The results show that the impact is negligible.

Key words: optical window; FEA; large-aperture and long-focus collimator; Zernike; wave aberration

引言

随着航天技术的发展, 大口径、长焦距光学系统应用越来越多。而对大口径、长焦距光学系统的成像质量评价, 离不开相应的大口径、长焦距平行

光管。根据平行光管焦面位置放置目标的不同, 可以有 MTF 测量、点到点成像测试和焦距测量等多种应用。平行光管与真空罐对接可以模拟检测有效载荷在轨性能。

收稿日期: 2010-03-31; 修回日期: 2010-08-25

作者简介: 许亮(1983-), 男, 江苏宿迁人, 研究实习员, 硕士, 主要从事光学加工与检测及光机一体化等方面的研究工作。
E-mail: liangx@opt.ac.cn

大口径、长焦距平行光管不同于短焦距的平行光管,它的光学性能很大程度上受到环境的影响,比如气流扰动。为了克服空气扰动的影响,长春光机所的穆全全^[1]等人基于液晶波前校正器的自适应光学技术实现对大口径、长焦距平行光管内部扰动的实时校正。而另一种有效的方法是将平行光管光学系统置于真空环境中。一般平行光管的真空环境是低真空环境,而真空罐是高真空环境。这样就需要光学窗口隔绝不同的真空环境并透射平行光束。

光学窗口的材料本身性能,光学加工装调以及所受环境工况等都都对平行光管系统光学性能有影响。特别是由于环境工况的多变性,使光学窗口设计交叉了光、机、热等多种学科,从而变得复杂化。在压差、轴向温差以及径向温差环境工况下,以波像差及MTF作为光学系统成像质量评价指标,本文分析了光学窗口形变对平行光管光学系统光学性能的影响。

1 问题描述

图1所示为一种大口径、长焦距平行光管光学系统,为离轴Cassegrain型。通光口径为970 mm,系统焦距为30 m。主要光学零件处于无油低真空(350 Pa)环境中。光学窗口用来隔绝平行光管内外不同的压差环境并透射平行光束。

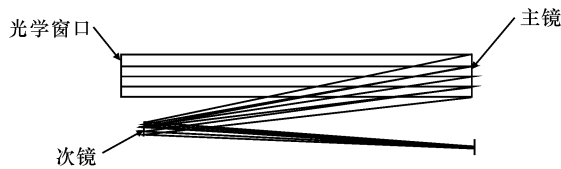


图1 大口径、长焦距平行光管光学系统
Fig.1 Optic system of a large-aperture and long-focus collimator

光学窗口尺寸为Φ1 000 mm×65 mm,材料为熔石英。根据相机性能检测需要,光学窗口主要有两种环境工况:1)未与真空罐对接时,主要受近1个大气压的压差作用;2)与真空罐对接时,由于真空罐内部冷沉的辐射换热,主要受温度梯度作用。

2 光学窗口形变理论

2.1 压差作用

假定圆形窗口受简单支撑,整个通光孔直径A上承受的压强为ΔP,则以径向位置为自变量,平行平板光学窗口变形如下式所示^[2]:

$$w(r) = \frac{3\Delta p(1-\nu^2)}{16Ed^3} \left[\frac{5+\nu}{1+\nu} (A/2)^2 - r^2 \right] \times$$

$$[(A/2)^2 - r^2] \quad (1)$$

窗口每边中心处曲率半径近似为

$$R = \frac{16Ed^3}{3(1-\nu)(3+\nu)A^2\Delta P} \quad (2)$$

2.2 轴向温差作用

轴向温差会使光学窗口变为球形。如果窗口是一个简单支撑的平行平板,那么轴向温差引起的球形曲率半径由下式给出:

$$R = \frac{K}{\alpha q} \quad (3)$$

式中:K为窗口材料的热导率;α为窗口材料的热膨胀系数;q为窗口材料单位面积上的热通量,q=ΔT×K/d,ΔT为窗口轴向温差。

2.3 径向温差作用

径向温差下平面窗口变形分为两种情况^[3]:当边缘温度高于中心温度时,变形如图2(a)所示,称为“翘边”;当边缘温度低于中心温度时,变形如图2(b)所示,称为“塌边”。

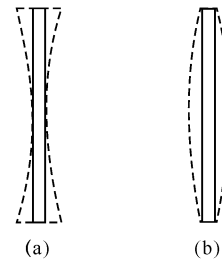


图2 径向温差下平面窗口变形

Fig.2 Plane window's deformation under radial temperature difference

3 有限元分析

3.1 网格划分与约束

基于ANSYS软件,建立了平行光管光学窗口的有限元模型。网格划分如图3左图所示,共5 632个Solid45单元。

假设光学窗口在内侧最外边简支,因此内侧最外层节点只能在径向自由变形,厚度方向和切向完全约束;在窗口中心,只有厚度方向变形,径向和切向完全约束。光学窗口约束如图3右图所示。

3.2 有限元分析结果

100 975 Pa压差作用下,光学窗口的形变及曲率计算结果如图4和图5所示,可见光学窗口内、外表面的有限元分析结果与理论解非常接近,从而验证了有限元模型的有效性,光窗中心处曲率半径最小为398 m。图6为4℃轴向温差下光学窗口曲率变化图,从图可见曲率半径趋于常值30 092 m。图7为3.58℃

径向温差(边缘温度高于中心温度)下光学窗口形变图,从图7中可见如图2(a)所示的“翘边”现象。

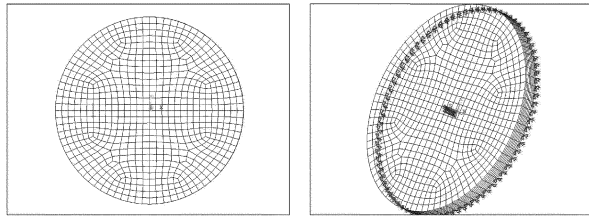


图3 平行光管光学窗口网格划分(左)与约束(右)

Fig. 3 Grid plot and restriction of optical window

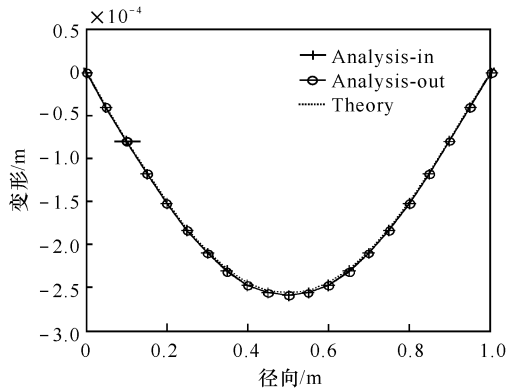


图4 压差下,光学窗口形变

Fig. 4 Deformation under pressure difference

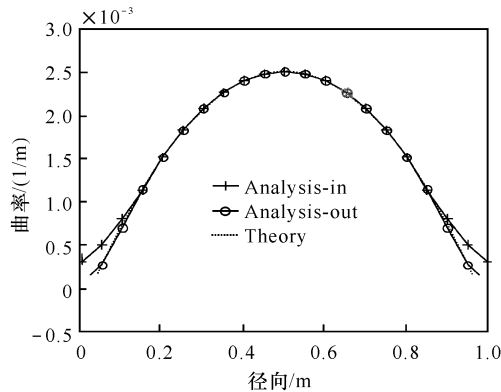


图5 压差下,光学窗口曲率

Fig. 5 Curvature under pressure difference

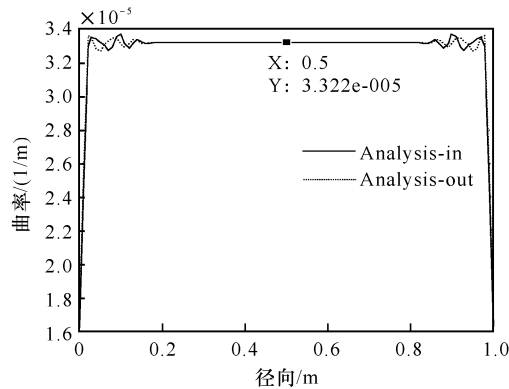


图6 轴向温差下,光学窗口曲率

Fig. 6 Curvature under axial temperature difference

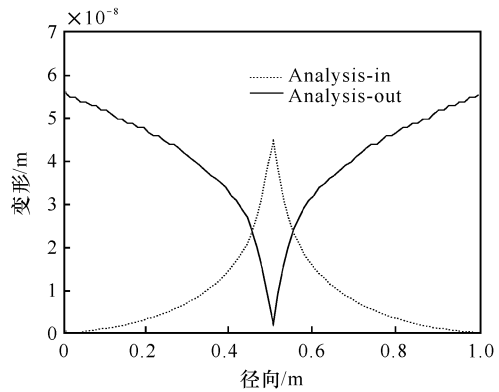


图7 径向温差下,光学窗口形变

Fig. 7 Curvature under radial temperature difference

4 光学窗口形变对平行光管光学性能的影响

Zernike 多项式是 F. Zernike 在 1934 年构造的,是理想的结构分析与光学分析软件之间的接口工具。为了统计学分析方便,Robert J. Noll 提出的改进 Zernike 多项式如下式所示^[4]:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\text{even } j} &= \sqrt{n+1} R_n^m(r) \sqrt{2} \cos m\theta \\ Z_{\text{odd } j} &= \sqrt{n+1} R_n^m(r) \sqrt{2} \sin m\theta \end{aligned} \right\} m \neq 0 \quad (4)$$

$$Z_j = \sqrt{n+1} R_n^0(r) \quad m = 0$$

其中

$$R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [(n+m)/2-s]! [(n-m)/2-s]!} r^{n-2s} \quad (5)$$

式中 n 和 m 为整数,且满足 $m \leq n, n - |m| = \text{even}; j$ 是项数,为 n 和 m 的函数。

在 3.58 °C 径向温差作用下,用 Zernike 多项式拟合平行光管光学窗口形变,其中前 10 项系数如表 1 所示。

表 1 径向温差作用下,前 10 项 Zernike 系数

Table 1 The first 10 Zernike polynomial coefficients

项数	外表面	内表面
1	-1.577 6e-007	8.047 2e-009
2	-1.921 4e-023	-4.223 9e-025
3	-7.083 0e-023	2.893 2e-024
4	7.323 7e-009	-7.278 0e-009
5	2.120 7e-023	-1.088 0e-024
6	-1.820 3e-011	-7.074 4e-014
7	-9.258 1e-024	-4.027 5e-025
8	1.669 9e-025	-2.388 8e-025
9	-9.778 2e-024	1.093 5e-024
10	-2.313 6e-024	3.951 2e-025

径向温差作用下平行光管光学窗口起初面型以及去除 Zernike 拟合面型之后的残留面型如图 8 所示。

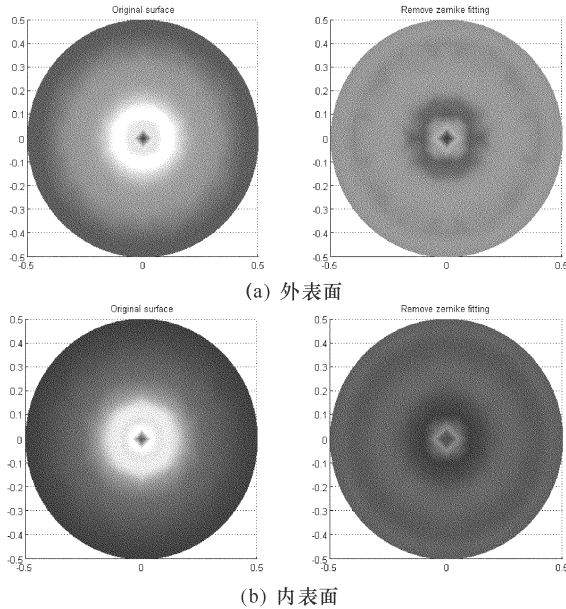


图 8 径向温差下,光学窗口起初面型和残留面型
Fig. 8 Optical window's original shape and retained shape under radial temperature difference

此处 Zernike 多项式与一般光学设计软件中的标准 Zernike 多项式有所不同,将经过处理的 Zernike 系数带入平行光管光学系统中,结果表明系统波像差维持在设计值 0.01λ ,即 3.58°C 径向温差下光学窗口形变对系统光学性能影响可以忽略不计。

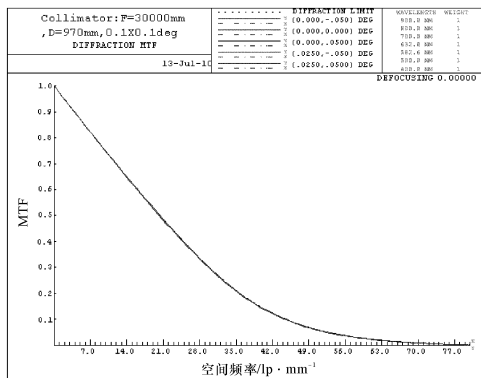


图 9 MTF 曲线
Fig. 9 MTF curve

另外,将式(1)和(3)表示的面形分别带入平行光管光学系统,视场范围内 MTF 曲线如图 9 所示,同设计 MTF 曲线相比较没有变化,都接近衍射极限。因此 $100\ 975\ \text{Pa}$ 压差和 4°C 轴向温差作用下光学窗口形变对平行光管系统的光学性能影响同样可以忽略不计。

5 总结

光学窗口设计不能被低估,其包含了光、机、热等多种学科。本文对某大口径、长焦距平行光管光学窗口进行了有限元分析,分析结果与理论解非常接近。在压差、轴向温差及径向温差环境工况下,以波像差及 MTF 作为光学系统成像质量评价指标,分析了光学窗口形变对平行光管光学性能的影响。分析结果表明,已知各种环境工况下光学窗口形变对平行光管光学系统波前误差的影响可以忽略不计。本文仅考虑环境工况下光学窗口形变对平行光管波前误差的影响。在温度梯度下,光学窗口折射率及均匀性的变化,及热光效应对光学系统造成的波前误差本文没有考虑,也是作者下一步的工作重点。

参考文献:

[1] MU Q, CAO Z, HU L D, et al. Adaptive optics technique to overcome the turbulence in a large-aperture collimator [J]. Applied Optics, 2008, 47 (9):1298-1301.

[2] HEARN D V. Vacuum window optical power induced by temperature gradients [J]. SPIE, 1999, 3750:297-308.

[3] 吕保斌,杨利华,马臻,等. 光学窗口形变对平行光管像质影响[J]. 光电技术应用, 2009, 24(2):13-17.
LU Bao-bin, YANG Li-hua, MA Zhen, et al. Influence of optic window deformation on collimator image quality [J]. Electro-optic technology application, 2009, 24 (2): 13-17. (in Chinese with an English abstract)

[4] NOLL R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. The Optical Society of America, 1976, 66(3):207-211.