

· 光电工程系统技术 ·

光学窗口形变对平行光管像质影响

吕保斌^{1,2}, 杨利华^{1,2}, 马 臻^{1,2}, 李英才¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要:对轴向温度梯度、径向温度梯度对大口径光学窗口面型的影响加以介绍,并运用 ansys 软件分析大口径光学窗口在两边存在温度差、压力差下的形变.用 Zernike 系数将 ansys 软件分析结果与 Zemax 软件连接,在 Zemax 软件中仿真光学窗口在 15~27°温度范围内 6 种工况下的形变对平行光管像质的影响.

关键词:温度梯度分布;热结构耦合分析;Zernike 多项式;平行光管

中图分类号:TH741

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2009)02-0013-05

Influence of Optic Window Deformation on Collimator Image Quality

LV Bao-bin^{1,2}, YANG Li-hua^{1,2}, MA Zhen^{1,2}, LI Ying-cai¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics Chinese Academy of Science, Xi'an 710068 China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract:The influence of axis and radial temperature gradients on the deformation of optic window with large aperture is discussed. The optic window deformation with temperature and pressure differences on the both sides is analyzed by ansys program. Zernike polynomial, as an interface tool, connects the ansys program simulated results with the optic design program. In zemax program, the influence of optic window deformations at 12~27°C on the optic system image quality are analyzed.

Key words:temperature gradient distribution; thermal construction analysis; zernike polynomial; collimator

长焦距平行光管光路一般比较长,光路中空气扰动、温度场不均匀分布、气压变化等都会对光管精度和检测结果产生很大影响.为消除环境变化对于光管的影响,一般将光管置于恒温恒压真空罩中,在一端有一个平行平板作为光学系统窗口出射平行光.真空罩内恒温恒压,而真空罩外的室内环境却是变化的(主要是温度).平行平板在两面存在压强差和温差下的形变对于高精度的平行光管光学系统精度的影响必须考虑.由于此时的系统元件已不可调,在设计阶段分析光学窗口由于内外环境不同而产生的形变对于系统精度的影响是非常必要的.

1 环境变化对光学窗口的影响

1.1 压强差对光学窗口的影响

光学窗口一侧为真空低压,另一侧为一个大气压,两侧的压差使其发生形变,趋于凹向真空罩内,如图 1 所示.相当于一个负透镜,使光线发散,从而改变系统焦面位置,影响成像质量,降低出射平行光的平行度.

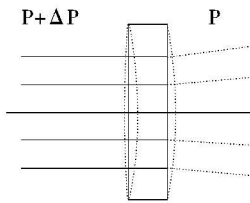


图1 压差对光学窗口的变形影响

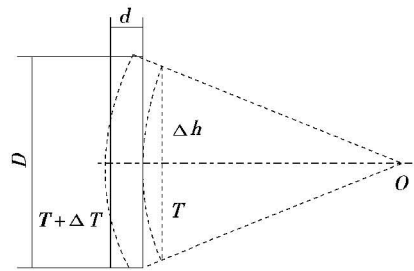


图2 轴向温差引起的平行平板形变

1.2 温度变化对光学窗口的影响

温度变化对于光学元件面型、曲率半径、折射率等都有影响,从而对于光学系统像质也有很大的影响.通常温度变化按变化形式可分为:稳态温度变化,瞬态温度变化.按温度场分布的不均匀性又可分为轴向温度场和径向温度场.

1.2.1 稳态温度变化对光学窗口的影响

稳态温度变化在某些文章中又称均匀温度变化,是指环境经过一段时间之后,从一个温度下的稳定状态分布变到另一个温度下的稳定状态分布.

稳态温度变化对于光学元件的影响比较简单,表现在2个方面:

(1) 由于光学玻璃与镜筒材料线膨胀系数的存在,使光学系统的几何参数(折射或反射面的口径和间隔)发生变化.

(2) 由于光学玻璃折射率温度系数的存在,使得材料的折射率发生了变化.最终使光学系统的几何参数(光焦度和理想像面位置)发生变化,导致成像大小和质量的变化^[1].

稳态温度变化是一种比较理想的温度变化.平行平板经过稳态温度变化仍为平行平板,厚度与口径的改变量与温度变化成线性关系

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

式(1)中, α 为平行平板的热膨胀系数.

1.2.2 轴向温差对光学窗口的影响

轴向温度梯度分布是指在光学系统中,温度沿轴向具有梯度分布.在这种温度场中,光学元件变形如图2所示.

图2中, D 为平行平板口径, d 为平行平板厚度,平板两侧温度相差 ΔT ,在轴向产生温度梯度,使平板由温度高的表面向温度低的表面弯曲.且有

$$\Delta D = D \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2)$$

$$R = d / \alpha \cdot \Delta T \quad (3)$$

$$\Delta h = D^2 \cdot \alpha \Delta T / 8d \quad (4)$$

式中, ΔD 为左右表面的基本圆直径差; R 为平板变形时的圆盘曲率半径; Δh 为矢高增量.对于抛物面反射镜,当焦距为 f 时,其镜面总矢高为

$$h = D^2 / 16 \cdot f \quad (5)$$

对式(5)进行微分计算,并代入式(4),可计算出矢高增量 Δh 对应的焦距改变量为

$$\Delta f = 2f^2 \cdot \alpha \cdot \Delta T / d \quad (6)$$

由此可见,轴向温度梯度分布不仅引起反射镜曲率的变化,而且由于光学元件内非均匀变形导致元件原来的面形被破坏,并且口径越大、温差越大,这种破坏越严重^[2].

1.2.3 径向温差对光学窗口的影响

径向温度梯度分布是指在光学系统中,温度沿径向具有梯度分布.在这种温度场中,光学元件形变如图3所示.

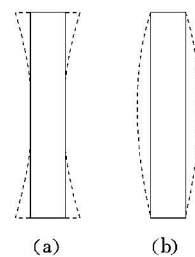


图3 径向温度梯度分布对于平行平板的影响

径向温度梯度分为2种情况:中心温度高于边缘温度和中心温度低于边缘温度,这2种温度分布对于光学元件变形的影响是不一样的,虚线为平板受温度影响后的变形.图3a为中心温度低于边缘温度,这种变形称为“翘边”;图3b为中心温度高于边

缘温度,称为“塌边”.这一温度效应称为边缘效应.径向温度梯度分布效应会改变元件的面型和曲率半径,马克苏托夫给出了一个经验公式^[3,4]

$$\Phi = E \cdot q / \alpha \quad (7)$$

式中, E 为材料的弹性模量; q 为导热率; Φ 是表征材料在减小边缘效应方面的一个参数, Φ 值越大,相应的材料在减小边缘效应方面对镜面越有利.

2 光学窗口在温差、压差下的形变分析

真空罩外气压基本不变,温度在一段时间内也相对稳定.但在不同的季节温度却有较大的变化.所以有必要分析光学窗口在一定温度范围内的形变对光学系统像质的影响.光学窗口在各季节不同的温度下的变化可视为稳态温度变化.

光学窗口材料选用熔石英,材料属性参数见表 1,窗口参数及工作环境见表 2.

表 1 熔石英材料参数

材 料 属 性	参 数
密度/(kg/m ³)	2 200
弹性模量/(GPa)	74
泊松比	0.167
热传导率/(W/m·℃)	1.38
热膨胀系数/(℃)	0.55 e-6
比热容/(J/kg·K)	787

表 2 玻璃窗口参数及工作环境

口径/(mm)	950
厚度/(mm)	130
真空罩外温度/(℃)	15~27
真空罩内温度/(℃)	20
真空罩外压强/(Pa)	1e5
真空罩内压强/(Pa)	300

光学窗口的装配采用一侧挡肩,一侧压圈的形式,压边 15 mm.运用 ansys 软件进行热结构耦合,分别对室温为 15、18、20、22、25 和 27 ℃ 这 6 个工况下的窗口形变进行模拟分析.图 4 为 ansys 软件中的网格划分,网格尺寸 3×10^{-3} m.图 5 为软件进

行热结构耦合分析后的光学窗口变形图.

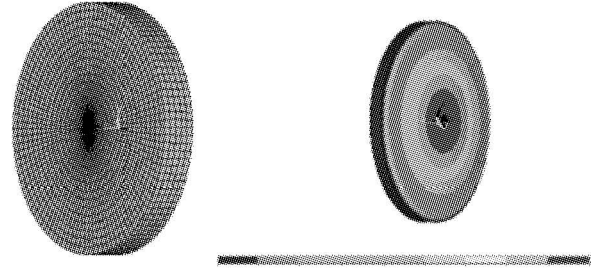


图 4 网格划分

图 5 光学窗口形变图

由图 5 可以看出窗口中心部分形变最大.当罩外温度低于罩内温度时,温差变形和压差变形同向,变形叠加;当罩外温度高于罩内温度时,温差形变与压差形变相反,总变形相对较小.

3 光学窗口形变对平行光管像质的影响

3.1 Zernike 多项式及波面拟合

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.可以用 Zernike 多项式拟合圆形孔径的波前,拟合精度与用于拟合的 Zernike 项数有关.项数越多,拟合精度越高.Zernike 多项式表达式为

$$\int_0^1 \int_0^{2\pi} U_n^l(\rho, \theta) U_m^k(\rho, \theta) \rho d\theta d\rho = \begin{cases} \frac{\pi}{n+1} \delta, & (n = m, l = k) \\ 0, & (n \neq m, l \neq k) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中, $U_n^l(\rho, \theta)$ 和 $U_m^k(\rho, \theta)$ 为 Zernike 多项式.当 $l=0$ 时, $\delta=1$;当 $l \neq 0$ 时, $\delta=0.5$.Zernike 多项式有以下几个特点:

(1) Zernike 多项式在连续的单位圆上具有正交性,各项之间相互独立,有利于消除偶然因素的干扰.由于一般系统多为圆形光瞳,归一化后的单位圆正好满足 Zernike 多项式的正交性要求.

(2) Zernike 系数与 Seidel 系数之间有很明确的对应,具体对应关系见表 3.通过它可以很直接地了解系统的初级像差.

(3) 便于与光学设计软件相联系.常用的光学设计软件有 Codev 和 Zemax 都包含有 Zernike 面

表 3 Zernike 系数与 Seidel 像差系数之间的关系

n	m	表达式	物理意义
0	0	1	Constant
1	1	$\rho \cos \theta$	X-tilt
2	1	$\rho \sin \theta$	Y-tilt
3	1	$2\rho^2 - 1$	focus
4	2	$\rho^2 \cos 2\theta$	0° or 90° astigmatism
5	2	$\rho^2 \sin 2\theta$	45° astigmatism
6	2	$(3\rho^2 - 2)\rho \cos \theta$	Coma and X-tilt
7	2	$(3\rho^2 - 2)\rho \sin \theta$	Coma and Y-tilt
8	2	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	Spherical and focus

型,都可以直接读取文件中的 Zernike 系数附加于相应面上,从而在软件中可以很直接地分析光学系统像质变化^[5,6].

Zernike 多项式在连续的单位圆上具有正交性,可是一般有限元分析软件给出的结果都是一些离散的节点数据,如果直接进行拟合会产生病态方程,需要在进行 zernike 多项式拟合时采取一些变换.常用的方法有:最小二乘法, Gram-Schmidt 正交化和 Householder 变换^[7].

3.2 光学窗口形变对光学系统像质的影响

Zemax 和 Codev 软件都可以直接读取包含 Zernike 系数的文件.利用自编程序从 ansys 分析给出的节点位移,算出变形后光学窗口面型的 Zernike 系数.在 Zemax 中读入 Zernike 系数并附于光学窗口 2 个面,利用软件分析窗口形变对光学系统像质的影响.

图 6 是设计的光学系统 MTF,图 7 是在 Zemax 中引入光学窗口形变后的系统 MTF.通过对比可以很清楚地看到窗口形变对系统成像的影响.系统 MTF 在空间频率中低频率下降较多.

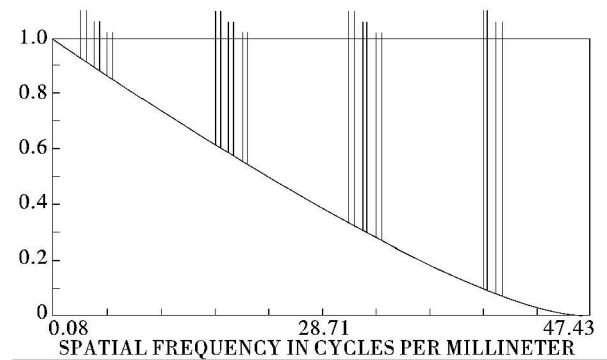


图 6 设计的光学系统 MTF

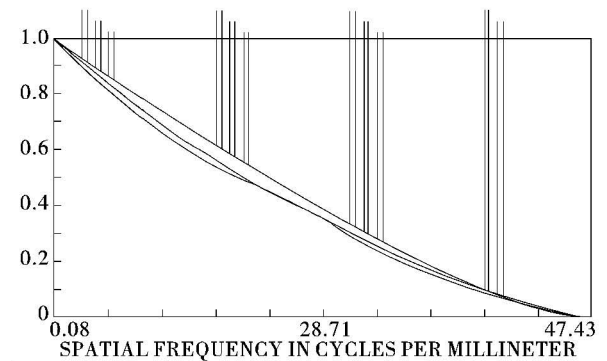


图 7 引入光学窗口形变后的系统 MTF

平行光管光学系统为共轴偏瞳两镜系统,主镜为抛物面,次镜为双曲面,对次镜进行偏心与倾斜操作.系统焦距 30 m,像方线视场 60 mm.表 4 列出系统零视场 12 lp/mm 和 30 lp/mm 的 MTF 值及由于光学窗口形变引起的 MTF 下降.从图 7 和表 4 可以得出以下结论:

(1)光学窗口形变对系统弧矢 MTF 影响比子午 MTF 影响大.

(2)罩外温度低于罩内温度时的 MTF 下降值比罩外温度高于罩内温度时 MTF 下降值要大,这与前面的分析相符.

(3)20 °C 时真空罩内外同温,形变由压差引起.可以看出光学窗口形变主要是压差引起.在引入温差形变后, Δ MTF 数值相对 20 °C 变化不大.

表 4 12 lp/mm 和 30 lp/mm 处不同温度影响下的系统 MTF

零视场	15 °C		18 °C		20 °C		22 °C		25 °C		27 °C	
	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S
设计 MTF	tangential MTF:0.678 517 sagittal MTF:0.678 673											
12 引入形变	0.585	0.616	0.589	0.619	0.592	0.621	0.594	0.623	0.598	0.626	0.600	0.628
	7	1	6	2	1	1	6	1	3	0	8	0
ΔMTF	0.092	0.062	0.088	0.059	0.086	0.057	0.083	0.055	0.080	0.052	0.077	0.050
	8	5	9	5	4	5	8	5	2	6	8	9
设计 MTF	tangential MTF:0.246 507 sagittal MTF:0.246 589											
30 引入形变	0.213	0.233	0.215	0.233	0.216	0.234	0.217	0.234	0.218	0.235	0.219	0.236
	8	1	2	9	2	4	1	8	4	5	3	0
ΔMTF	0.032	0.013	0.031	0.012	0.030	0.012	0.029	0.011	0.028	0.011	0.027	0.010
	7	5	3	7	3	2	4	8	1	1	2	6

4 结 束 语

对于精度要求较高的光学系统,在设计阶段分析环境变化对系统像质的影响是很有必要的.温度梯度分布的形式不同,对于光学元件影响也不同.设计时要充分考虑系统工作环境温度分布,合理选择材料和设计,并进行相关仿真计算,确保系统实际工作正常稳定.

参考文献

[1] 王红,韩昌元.温度对航天相机光学系统影响的研究

[J].光学技术,2003,29(4):452-457.

[2] 王红,田铁印.轴向温差对空间遥感器光学系统成像质量的影响[J].光学精密工程,2007,15(10):1489-1494.

[3] 马克苏托夫.天文光学工艺[M].杨世杰.北京:科学出版社,1986:19-21.

[4] 杨林华.浅谈温度变化对光学镜面的影响[J].航天器环境工程,2003,20(1):4-18.

[5] 张伟,刘剑峰.基于 Zernike 多项式进行波面拟合研究[J].光学技术,2005,31(5):675-678

[6] 刘家国,李林.光机热集成分析中数据转换接口研究[J].北京理工大学学报,2007,27(5):427-431

[7] 李贤辉.光机集成有限元分析光学面形后处理研究与实现[D].长春:中科院长春光机所,2004:12-19.

(上接第 9 页)

气象环境,对气溶胶的浓度进行标定,获得合理的谱分布函数,提高模型的精度.以后的工作是对近地面的斜程传输进行研究,使模型更加完善.

参考文献

[1] [美]E.J.麦卡特尼.大气光学[M].潘乃先,毛节泰,王永生,北京:科学出版社,1988:180.

[2] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等.大气物理学[M].北京:北京大学出版社,2003:26.

[3] 李景镇.光学手册[M].陕西:科学技术出版社,1986:852.

[4] 王莲芬,李正亮,成燕归,等.气溶胶激光散射信号的特征分析[J].光散射学报,2006,18(4):351-354.

[5] 吴健,杨春平,刘建斌.大气中的光传输理论[M].北京:北京邮电大学出版社,2005:33-37.