

激光与光电子学进展

某长波红外光学镜头冲击仿真分析与优化

陈龙, 张宇*, 谢康, 刘治, 周慎敏

昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650500

摘要 红外光学镜头的工作环境复杂,常受到外部载荷冲击。针对某款长波红外光学镜头建立了 ANSYS 有限元分析模型,对其进行峰值加速度为 100g、持续时间为 6 ms 的半正弦冲击仿真分析。对提取的数据进行刚体位移、峰谷值(PV)和均方根值(RMS)的计算,并运用泽尼克多项式对冲击之后的透镜面形进行拟合,求解泽尼克多项式系数,分析冲击对红外光学镜头性能的影响。基于响应面法对红外光学镜头进行优化,对优化之后的模型进行冲击仿真,并进行对比分析。分析结果表明:对红外光学镜头进行优化,冲击之后透镜的最大变形量与最大等效应力有所降低,表征透镜面形变化的 PV、RMS 也有所下降;对结构进行优化,能够在一定程度上降低冲击对其造成的影响。

关键词 长波红外光学镜头; 半正弦冲击; 泽尼克多项式; 响应面优化

中图分类号 TH164

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222924

Impact Simulation Analysis and Optimization of a Long-Wave Infrared Optical Lens

Chen Long, Zhang Yu*, Xie Kang, Liu Zhi, Zhou Shenmin

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China

Abstract The working environment of an infrared optical lens is complicated and often affected by external loads. A finite element analysis model is established in ANSYS for a long-wave infrared optical lens, and half-sine impact simulation analysis with a peak acceleration of 100g and duration of 6 ms is conducted. The rigid-body displacement, peak to valley (PV), and root mean square (RMS) values of the extracted data are calculated, and the Zernike polynomial is used to fit the lens surface shape after impact to estimate the Zernike coefficient. Correspondingly, the impact on the performance of the infrared optical lens is analyzed. Based on the response surface method, the infrared optical lens is optimized, simulations on the impact of the optimized model are conducted, and comparative analysis is performed. The results show that the maximum deformation and the maximum equivalent stress of the lens after impact are reduced due to the optimization of the infrared optical lens; additionally, the PV and RMS values, which represent the changes in the surface shape of the lens, decrease. Thus, optimizing the structure can reduce the impact to a certain extent.

Key words long-wave infrared optical lens; half sinusoidal shock; Zernike polynomial; response surface optimization

1 引言

红外光学镜头的工作环境复杂,常受到外部环境的影响,比如温度、湿度、外部因素引起的振动冲击等^[1-2]。在很强的力学冲击环境下,光学透镜形变会改变透镜面形精度,影响光学系统的成像质量,透镜应力可能导致透镜发生裂纹,严重时会使透镜碎裂,因此对透镜形变的分析是研究光学系统抗冲击性能的关键。在光学系统受到冲击时,其中光学透镜就会受到冲击

的影响,从而引起红外光学镜头性能的变化。

由于冲击环境试验的不确定因素较多,产品极易损坏,并且对试验所得的数据进行收集与处理有较大的难度^[3]。运用计算机技术进行冲击仿真,可以降低冲击试验的成本,同时能更好地收集和处理数据。

本文以某款长波红外光学镜头为例,利用 ANSYS 有限元软件对镜头受到外部冲击载荷的结构以及透镜的变形与应力进行分析。在 Matlab 中利用泽尼克多项式对受到冲击之后的镜面面形进行拟合以

收稿日期: 2022-10-31; 修回日期: 2022-12-22; 录用日期: 2023-01-12; 网络首发日期: 2023-01-22

通信作者: *498380267@qq.com

及计算面形变化,得出其面形变化的峰谷值(PV)、均方根值(RMS)、泽尼克系数等^[4-6]。对红外光学镜头进行参数化建模后,利用 ANSYS 软件对红外光学镜头的零部件进行结构优化,降低冲击对红外光学镜头的影响,提高综合性能。

2 冲击理论分析

冲击是指结构受到持续时间极短的载荷,同时也可看作能量从外界传递到结构的短暂过程。冲击的核心是随着时间变化的作用力和作用时间,包括加速度、运动时间、速度、行程、振动频率等^[7]。

根据冲击运动及其影响可以分为脉冲型冲击、阶跃型冲击、复杂冲击三大类^[8]。在实际工况中,光学元件的冲击振动中包含系统传递特性,所受激励波形十分复杂,属于复杂振荡型。在软件中难以将其真实的情况模拟出来,通常根据对象受到冲击载荷的特点将其简化为理想的冲击。由于研究对象的工作环境多为车载或机载,根据《光《学与光学仪器 环境试验标准》^[9],在分析过程中加载峰值为 100g,持续时间为 6 ms 的半正弦加速度载荷,载荷方程为

$$f(t) = 1 \times 10^3 \sin(\pi t/6), 0 \leq t \leq 6, \quad (1)$$

在有限元分析中,常将整个系统离散为有限个单元,然后进行分析求解。将整个红外光学镜头系统共分为 n 个单元, e 为单元数($e=1,2,\dots,n$)。根据有限元理论和虚功原理,单元的动力学分析方程为

$$[M]^e \{\ddot{x}^e(t)\} + [C]^e \{\dot{x}^e(t)\} + [K]^e \{x^e(t)\} = \{f^e(t)\}, \quad (2)$$

式中: $[M]^e$ 为质量矩阵; $[C]^e$ 为阻尼矩阵; $[K]^e$ 为刚度矩阵; $x^e(t)$ 为节点位移; $f^e(t)$ 为外部载荷。

由于整个系统由 n 个单元组成,故整个系统的动力学方程可表示为

$$\sum_{e=1}^n \left\{ [M]^e \{\ddot{x}^e(t)\} + [C]^e \{\dot{x}^e(t)\} + [K]^e \{x^e(t)\} \right\} = \sum_{e=1}^n \{f^e(t)\}. \quad (3)$$

将冲击载荷方程代入红外光学镜头的系统动力学方程,可以求出红外光学镜头在受到外部冲击之后系统的应力与应变。

3 红外光学镜头冲击有限元分析

3.1 有限元仿真

以某款长波红外光学镜头为研究对象,分析外部冲击载荷对透镜光学性能的影响。该红外光学镜头的光学系统由三片透镜组成,其光学技术指标如表 1 所示。根据透镜的直径,从大到小依次命名为透镜 1、透镜 2、透镜 3。在进行相关分析前,先建立光学镜头的三维模型。红外光学镜头是一个较为复杂的结构,在进行分析之前首先要对模型进行相应的简化,如:倒

表 1 红外光学镜头性能技术指标

Table 1 Technical index of infrared optical lens

Spectral response / μm	Focal length / mm	F	Field of view / $(^\circ) \times (^\circ)$	Operating temperature / $^\circ\text{C}$
8-12	90	1.0	8.5×6.4	-40-60

角、调焦电机等。虽然 ANSYS Workbench 软件中有自带的建模工具,但对复杂的模型而言,专业的三维建模软件操作更为方便。因此,本文采用 Solid Works 对研究对象进行几何建模,红外镜头三维模型如图 1 所示。

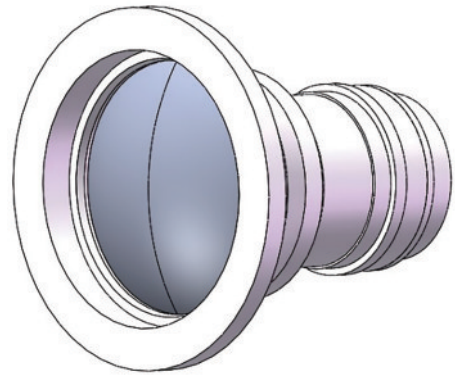


图 1 红外镜头三维模型

Fig. 1 3D model of infrared lens

然后将几何模型导入到 ANSYS 中对其进行冲击分析。使用 ANSYS 软件进行冲击分析时,首先对建立的模型进行材料定义,不同的材料在受到冲击时,对结构的影响不同,在所研究的红外光学镜头中,透镜的材料为锗,其余部分的材料均为铝,材料的各项属性参数如表 2 所示。

表 2 红外光学镜头材料属性

Table 2 Infrared optical lens material properties

Material	Density / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Elastic modulus / GPa	Poisson's ratio	Yield limit / MPa
Ge	5320	103	0.28	345
Al	2780	76	0.33	240

对导入 ANSYS 的几何模型进行预处理:网格划分,该结构中共有节点 152564 个左右,单元 37004 个左右。在定义接触类型时,不同材料的零部件之间接触方式不同。为使红外光学镜头模型更接近于实际安装环境,透镜与镜筒和压圈的接触设置为摩擦,摩擦系数为 0.5^[10],其余接触均设置为绑定。在设置约束条件时,根据实际环境实验的要求,将镜头的一端固定,添加半正弦冲击载荷。根据环境试验标准^[9],仿真冲击载荷为峰值 100g(g 取 10 m/s^2)、冲击持续时间为 6 ms 的加速度载荷,冲击方向为 Y 方向。在实际工况中,温度对光机系统的影响也极大,本文仅研究冲击对光学

镜头的影响,为降低温度对分析结果的干扰,故将分析时的环境温度设置为 22 ℃。求解之后得到各透镜的位移云图,如图 2~图 4 所示。

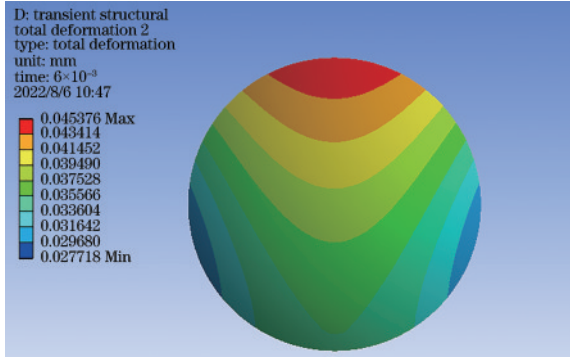


图 2 透镜 1 位移云图

Fig. 2 Lens 1 displacement cloud image

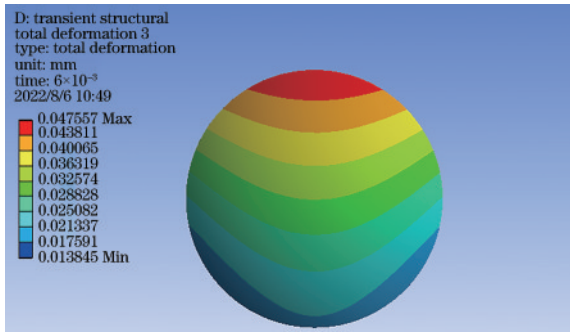


图 3 透镜 2 位移云图

Fig. 3 Lens 2 displacement cloud image

对红外光学镜头的冲击仿真结果进行分析,可以观察得到:在受到冲击后,3片透镜中透镜 1 与透镜 2 的变形量最大,最大变形量为 0.047557 mm,所有透镜中的最大等效应力为 194.74 MPa。对比材料性能参数,透镜与镜头其余结构的最大等效应力均小于其材料本身的屈服极限。因此可以分析得出,在光学镜头受到

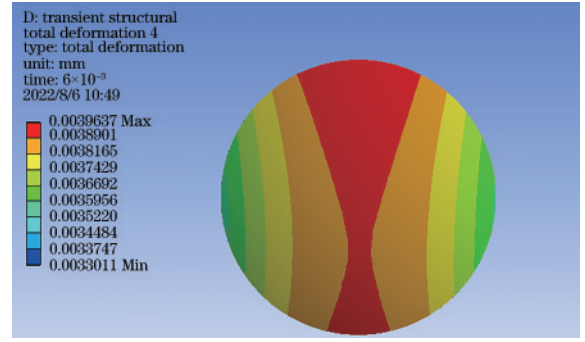


图 4 透镜 3 位移云图

Fig. 4 Lens 3 displacement cloud image

冲击后,从宏观角度看,镜头的透镜以及其余结构并未损坏或破裂。但红外光学镜头属于精密仪器,肉眼难以观测到变化,也可能会对镜头的光学系统产生影响。

3.2 冲击结果分析

红外光学镜头在外部载荷的作用下,光学透镜表面会发生改变,从而对光学性能产生影响和退化。光学表面位置变化的分类主要有 2 种:光学表面刚体误差和光学表面形状变化^[11-12]。刚体位移量主要是沿着所建立坐标系的 x 、 y 、 z 坐标轴的平移量和偏转量,分别用 e 、 f 、 g 和 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 表示。光学表面形状的变化主要通过引入 PV 和 RMS 来描述^[13]。

$$f_{PV} = \max(\Delta W) - \min(\Delta W), \quad (1)$$

式中: f_{PV} 为 PV 值; ΔW 为镜面的节点等效位移。

用变形后表面上各点的等效位移计算 RMS:

$$f_{RMS} = \sqrt{\overline{\Delta W^2} - \overline{\Delta W}^2}, \quad (2)$$

式中: f_{RMS} 为 RMS 值; $\overline{\Delta W^2}$ 、 $\overline{\Delta W}$ 分别为等效节点位移平方和的平均值和等效节点位移的平均值。

对冲击仿真之后的结果进行提取,主要是提取结构中各个透镜表面的变形数据。利用式(1)、式(2)计算出透镜各表面的 PV、RMS,表 3 为红外光学镜头各透镜表面 PV、RMS 的计算结果。

表 3 受冲击后透镜表面的 PV 和 RMS

Table 3 PV and RMS of lens surface after impact

Parameter	Lens 1		Lens 2		Lens 3	
	First side	Second side	First side	Second side	First side	Second side
PV of lens surface / μm	51.4	49.6	53.5	44.5	3.3	2.9
RMS of lens surface / μm	12.8	13.2	13.6	11.4	0.8	0.7

采用节点坐标的齐次变换方法,可以将所有变形节点数据中的镜面刚体位移分离出来,然后通过最小二乘法对镜面的刚体位移数据进行求解^[14-15]。表 4 为红外光学镜头各镜面的刚体位移求解结果。由表 4 可知,在受到冲击之后,沿着坐标轴的平移量,主要体现在 y 轴、 z 轴上,沿着 x 轴的平移量远小于另外 2 个方向。在所有镜面的刚体位移中,透镜绕着 x 轴的偏转量最大,与另外 2 个方向的偏转量存在数量级上的差距。因此可以得出:在受到冲击时,镜面的刚体位移变

化主要是沿着 y 轴、 z 轴的平移量和绕着 x 轴的偏转量。

利用泽尼克多项式对去除刚体位移之后的镜面节点数据进行拟合,得到镜面的面形变化数据和泽尼克系数。泽尼克系数可以反映出在受到冲击之后,光学系统所受到的影响。泽尼克系数能与光学设计中的 Seidel 像差相对应,泽尼克系数数值越大,在光学设计中产生的像差就会越严重,从而影响整个光学系统的成像质量。如图 5 所示,在受到冲击之后,透镜 1 中

表 4 受冲击后镜面的刚体位移
Table 4 Rigid body displacement of mirror after impact

unit: mm

Parameter	Lens 1		Lens 2		Lens 3	
	First side	Second side	First side	Second side	First side	Second side
e	8.10×10^{-5}	-9.68×10^{-5}	1.70×10^{-4}	1.40×10^{-4}	1.01×10^{-5}	9.98×10^{-6}
f	-3.25×10^{-2}	1.69×10^{-2}	2.49×10^{-2}	2.48×10^{-2}	-2.83×10^{-3}	-2.83×10^{-3}
g	-3.38×10^{-2}	7.60×10^{-3}	1.70×10^{-2}	1.71×10^{-2}	7.48×10^{-5}	7.75×10^{-5}
θ_x	1.48×10^{-5}	5.70×10^{-4}	7.50×10^{-4}	7.50×10^{-4}	7.74×10^{-5}	7.74×10^{-5}
θ_y	4.76×10^{-7}	2.38×10^{-6}	-1.97×10^{-6}	-1.52×10^{-6}	3.50×10^{-7}	3.14×10^{-7}
θ_z	-2.20×10^{-7}	1.94×10^{-8}	-3.03×10^{-6}	-3.03×10^{-6}	-4.65×10^{-7}	-4.70×10^{-7}

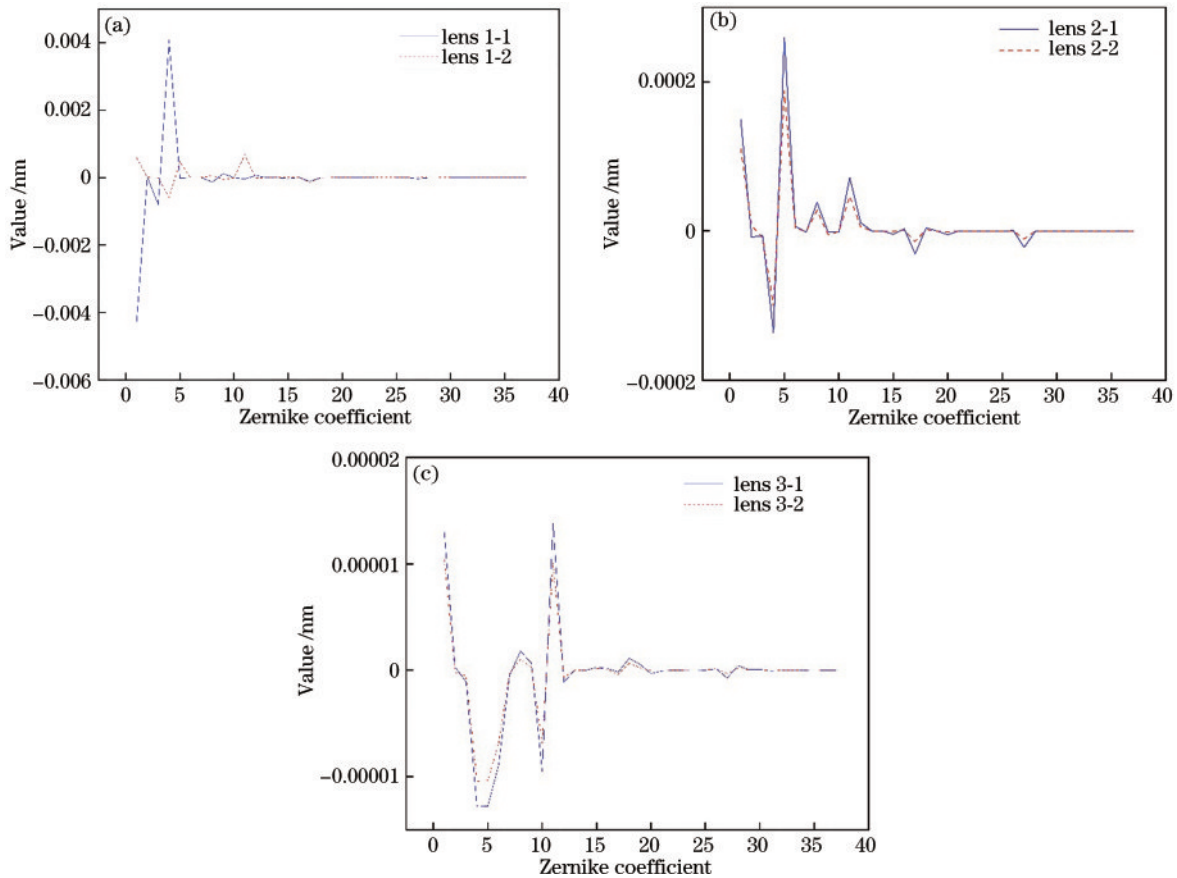


图 5 各透镜表面泽尼克系数。(a)透镜 1;(b)透镜 2;(c)透镜 3
Fig. 5 Zernike coefficient of each lens surface. (a) Lens 1; (b) lens 2; (c) lens 3

2 个表面的泽尼克系数变化最大。从泽尼克系数数值的变化可观察出:第 1 项、第 3 项、第 4 项、第 5 项、第 9 项等变化较大。所以,冲击对红外光学镜头透镜镜面的变形影响主要是平移、y 轴倾斜、离焦、 0° 像散、一阶球差等^[16-17]。泽尼克系数的增大,反映出红外光学系统的光学性能在受到冲击之后有所降低。

4 优化设计与结果分析

4.1 主镜筒优化设计

将红外光学镜头进行参数化建模,选择有限元软件中的优化分析模块对镜头进行优化。优化时按照实际约束和负载,经过多目标参数优化,获取最优设计推荐尺寸,经过修改调整之后选择最佳尺寸,实现优化目

标。ANSYS 有专门的优化设计模块,通过参数化建模,可以设定优化目标^[18]。ANSYS 的优化设计模块提供了方法与途径,红外光学镜头的优化设计选择采用基于响应面法的方法。

在红外光学镜头中,主镜筒是镜头最主要的组成部分,在受到冲击时,对透镜起到主要支撑和保护作用。在整个冲击过程中,对镜头整体的影响最大,因此选择主镜筒作为优化对象。在整个镜头结构中,在红外光学镜头的光学系统不发生改变的情况下,影响主镜筒质量、刚度以及抗冲击性能的主要因素就是主镜筒的壁厚,因此在优化过程中选择壁厚作为设计变量。对红外光学镜头的仿真结果进行分析,选择透镜 1、透镜 2 的最大变形量为目标函数。综上所述,可以

建立红外光学镜头优化的数学模型： $2\text{ mm} \leq P_1 \leq 4\text{ mm}$ 、 $1\text{ mm} \leq P_2 \leq 3\text{ mm}$ 、 $2\text{ mm} \leq P_3 \leq 4\text{ mm}$ 、 $4.5\text{ mm} \leq P_4 \leq 7.5\text{ mm}$ 、 $5.5\text{ mm} \leq P_5 \leq 8\text{ mm}$ ，同时总变形量最小。

4.2 优化结果分析

通过 ANSYS 的优化系统随机生成了 15 组样本设计点，并使用 Kriging 法对样本进行响应面拟合，然后进行多目标优化。将上述设计变量和优化目标导入

ANSYS 的响应面优化模块，在响应面优化过程中，分析系统会自动生成并求解出实验组及结果。对优化迭代求解之后的所有结果进行分析筛选选取了 3 组优化设计点。优化计算的结果表明：3 种优化方案均能减小透镜 1、透镜 2 的最大变形量，降低冲击对红外光学镜头透镜的影响，对应的优化结果如表 5 所示，表 5 中， P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 为优化设计变量参数， P_6 、 P_7 为优化之后透镜 1、透镜 2 的最大变形量。

表 5 优选候选点值
Table 5 Preferred candidate point values

Candidate point	Input parameter					Output parameter	
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
1	2.8667	1.7333	2.7333	6.000	7.4167	0.0371	0.0427
2	2.3333	2.2667	2.4667	5.600	7.2500	0.0381	0.0434
3	3.5333	2.0000	3.2667	7.200	5.9167	0.0374	0.0432

对所选取的 15 组样本设计点进行优化分析，经过有限元软件的计算分析，得到了 3 组优选候选值，如表 5 所示。对表 5 中优化结果数据进行对比分析，第 1 组的优化结果更为显著。优化后的候选点数据中，小数点后位数较多，对红外光学镜头的镜头整体质量、设计要求和生产制造要求进行综合考虑，故对所选择的优化后尺寸进行调整，并在调整后确定优化后的设计变量参数值为： $P_1=2.8$ 、 $P_2=1.7$ 、 $P_3=2.7$ 、 $P_4=6.0$ 、 $P_5=7.4$ 。

表 6 为红外光学镜头模型优化前后的尺寸与质量对比，使用优化后的尺寸对模型进行重建，由于只选择了主镜筒的壁厚进行优化，未改变其他参数，因此，此红外光学镜头的光学系统未发生改变。使用优化后的结构参数对红外光学镜头模型进行重建时，镜筒与其他零部件之间不存在干涉，且不影响原光学系统。

表 6 优化前后模型数据对比

Table 6 Comparison of model data before and after optimization

Condition	P_1 / mm	P_2 / mm	P_3 / mm	P_4 / mm	P_5 / mm	Mass / kg
Before optimization	3.0	1.5	3.0	6.0	6.0	0.99457
After optimization	2.8	1.7	2.7	6.0	7.4	0.97609

根据最终确定优化之后得到的参数，对红外光学镜头的模型进行重建，并对重新生成的新模型进行冲击仿真。优化之后的透镜位移结果，如图 6~图 8 所示。

优化前后透镜的各项结果对比，如表 7 所示。由表 7 可知，优化之后的透镜最大变形量以及最大等效应力均有所降低。与优化之前相比，透镜 1 的最大变形量减小了 20.48%，最大等效应力减小了 18.45%；透镜 2 的最大变形量减小了 11.34%，最大等效应力减小了 19.20%；透镜 3 的最大变形量减小了 23.08%，最大等效应力减小了 6.65%。同时，仿真结果表明：与

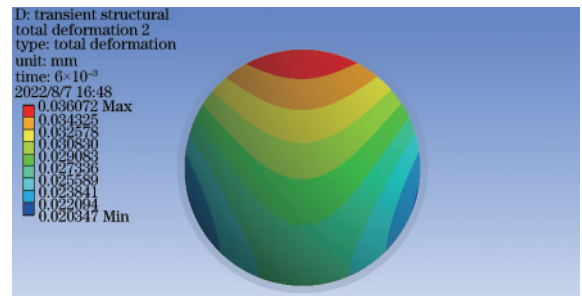


图 6 优化后透镜 1 位移云图

Fig. 6 Lens 1 displacement cloud image after optimization

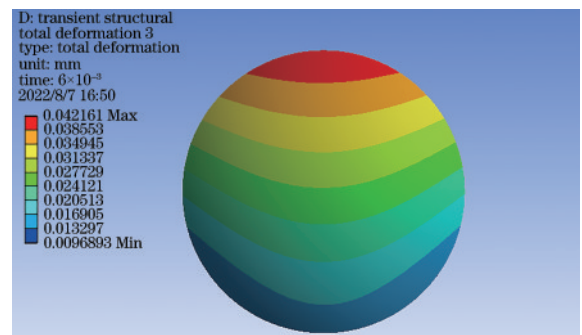


图 7 优化后透镜 2 位移云图

Fig. 7 Lens 2 displacement cloud image after optimization

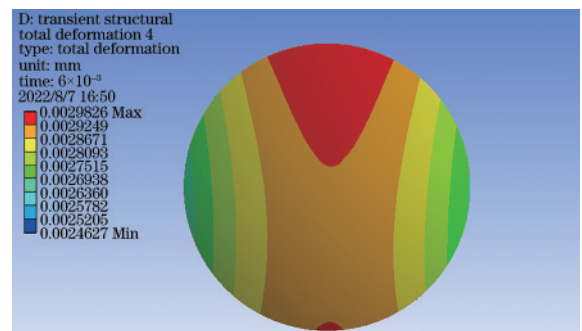


图 8 优化后透镜 3 位移云图

Fig. 8 Lens 3 displacement cloud image after optimization

表7 优化前后结果对比

Condition	Maximum deformation /mm			Maximum equivalent stress /MPa		
	Lens 1	Lens 2	Lens 3	Lens 1	Lens 2	Lens 3
	Before optimization	0.0454	0.0476	0.0039	194.74	125.32
After optimization	0.0361	0.0422	0.0030	158.81	101.26	74.81

优化前的模型相比,优化之后的整机质量略微减小,在保证镜头刚度和质量的前提下,实现了目标优化。

对红外光学镜头优化前后的冲击仿真进行数据提取,通过对透镜表面质量的评估分析,判断冲击对红外光学系统的影响。利用泽尼克多项式对透镜2个表面进行拟合,分别对优化前后的透镜表面PV、RMS进行计算,优化前后的计算结果如图9、图10所示。

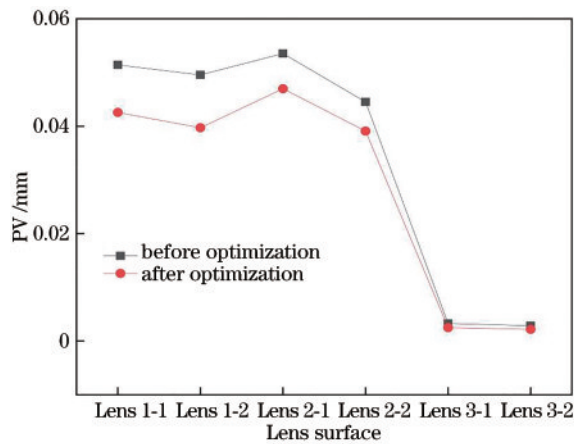


图9 透镜表面优化前后PV

Fig. 9 PV before and after lens surface optimization

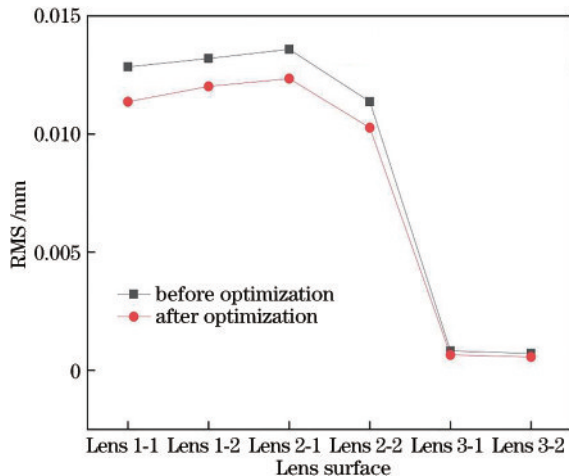


图10 透镜表面优化前后RMS

Fig. 10 RMS before and after lens surface optimization

由图9、图10可知,对优化之后的红外光学镜头进行再次冲击仿真,并计算得出各透镜的表面PV、RMS。透镜3距离红外光学镜头模型的固定支撑部位最近,在进行冲击仿真之后,其受到的影响相对较小,

因此优化前后透镜1、透镜2的表面PV、RMS在数值上均远大于透镜3的数值。同时,对优化后的数据进行计算分析,透镜1、透镜2、透镜3的各个镜面PV分别降低17.33%、19.83%、12.27%、14.42%、23.54%、23.51%;透镜1、透镜2、透镜3的各个镜面RMS分别降低11.53%、8.94%、9.06%、9.67%、20.85%、20.42%。结果表明:对红外光学镜头的主镜筒进行优化后,可以降低冲击对镜头各透镜面形的影响,提高红外光学镜头的抗冲击性能。

5 结 论

运用ANSYS对红外光学镜头进行冲击仿真,分析得到冲击对红外光学镜头的变形、应力影响。红外光学镜头在受到冲击之后,透镜的面形会发生变化,PV、RMS增大,像差增大,从而导致光学性能变差。优化后的镜头受到冲击之后的透镜变形量、最大等效应力、PV、RMS均减小,该优化设计降低了冲击对红外光学镜头所造成的影响,提升了镜头的整体性能。

参 考 文 献

- [1] 董斌, 田海英, 聂品. 环境因素对红外相机成像质量的影响浅析[J]. 红外, 2012, 33(5): 23-26.
Dong B, Tian H Y, Nie P. Effect of temperature and atmospheric pressure changes on image quality of infrared camera[J]. Infrared, 2012, 33(5): 23-26.
- [2] Neil I A. Evolution of zoom lens optical design technology and manufacture[J]. Optical Engineering, 2021, 60(5): 051211.
- [3] 花晓彬. 光机结构参数对光学系统抗冲击性能的影响研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
Hua X B. Study on the influence of optical machine structure parameters on the impact resistance of optical system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [4] 韩路, 田爱玲, 聂凤明, 等. Zernike多项式的条纹反射三维面形重建算法研究[J]. 西安工业大学学报, 2019, 39(2): 137-144.
Han L, Tian A L, Nie F M, et al. Algorithm for three-dimensional surface reconstruction of fringe reflection using Zernike polynomial[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2019, 39(2): 137-144.
- [5] 史燕飞, 张宇, 黄攀, 等. 热环境下红外镜头面形变化对成像质量的影响[J]. 光学技术, 2018, 44(3): 365-370.
Shi Y F, Zhang Y, Huang P, et al. The influence of infrared lens surface change on imaging quality in thermal environment[J]. Optical Technique, 2018, 44(3): 365-370.
- [6] Feng Z X, Cheng D W, Wang Y T. Iterative freeform lens design for optical field control[J]. Photonics Research, 2021, 9(9): 1775-1783.
- [7] 李宗权, 张胜兰, 杨稳. 蜂窝夹层结构冲击试验与仿真研究综述[J]. 复合材料科学与工程, 2022(3): 121-128.
Li Z Q, Zhang S L, Yang W. Research status of impact

- test and simulation of honeycomb sandwich structures[J]. *Composites Science and Engineering*, 2022(3): 121-128.
- [8] 杨仁树, 苏洪, 龚悦, 等. 冲击作用下静止裂纹与运动裂纹相互作用的试验研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(8): 107-112.
- Yang R S, Su H, Gong Y, et al. Experimental study of interaction between stationary crack and moving crack under impact[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(8): 107-112.
- [9] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 光学和光学仪器 环境试验方法 第 3 部分: 机械作用力: GB/T 12085.3—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Optics and optical instruments: environmental test methods: part 3: mechanical stresses: GB/T 12085.3—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [10] 金丽漫, 张宇, 王彩萍, 等. 红外连续变焦镜头凸轮曲线优化及运动学仿真[J]. *红外技术*, 2019, 41(2): 147-152.
- Jin L M, Zhang Y, Wang C P, et al. Cam curve optimization and kinematics simulation of infrared continuous zoom lens[J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(2): 147-152.
- [11] 周平伟, 马宏财. 镜面面形误差统计方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(4): 041201.
- Zhou P W, Ma H C. Research of statistical methods for mirror surface figure error[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(4): 041201.
- [12] Cheng D W, Chen H L, Yang T, et al. Optical design of a compact and high-transmittance compressive sensing imaging system enabled by freeform optics[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(11): 112202.
- [13] 张军强, 董得义, 吴清文, 等. 光学传感器镜面面形误差及刚体位移处理方法[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(6): 242-247.
- Zhang J Q, Dong D Y, Wu Q W, et al. Treatment of surface figure error and rigid body motion for mirror/lens in optical remote sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(6): 242-247.
- [14] 张颖, 丁振敏, 赵慧洁, 等. 光机热集成分析中镜面刚体位移分离[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2763-2767.
- Zhang Y, Ding Z M, Zhao H J, et al. Rigid-body displacement separation of optics in optical-structural thermal integrated analysis[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2763-2767.
- [15] 朱峰, 张宇, 陈骥, 等. 消热差红外镜头热光学特性分析[J]. *激光与红外*, 2017, 47(10): 1299-1304.
- Zhu F, Zhang Y, Chen J, et al. Analysis of thermal optical properties for athermal infrared lens[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(10): 1299-1304.
- [16] 邵晶, 马冬梅, 聂真威. 不同 Zernike 多项式求取环孔径波面像差的研究[J]. *应用光学*, 2010, 31(4): 544-548.
- Shao J, Ma D M, Nie Z W. Aberration analysis for annular pupils by different Zernike polynomials[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(4): 544-548.
- [17] 梁殿明, 王超, 史浩东, 等. 基于 Zernike 模型系数优化的椭球型窗口光学系统像差校正[J]. *物理学报*, 2020, 69(24): 244203.
- Liang D M, Wang C, Shi H D, et al. Aberration correction for ellipsoidal window optical system based on Zernike mode coefficient optimization[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(24): 244203.
- [18] 熊锋, 付杰, 石晓辉, 等. 新型连续梯度变截面薄壁圆管耐撞性多目标优化设计[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2022, 36(1): 105-112.
- Xiong F, Fu J, Shi X H, et al. Crashworthiness multi-objective optimization design of novel thin-walled circular tube with continuous gradient variable cross-section[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2022, 36(1): 105-112.