

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2006719

# 空间 TOF 相机大视场光学镜头结构优化设计<sup>\*</sup>

魏加立<sup>1</sup>, 曲慧东<sup>1</sup>, 王永宪<sup>2</sup>, 朱俊青<sup>2</sup>, 关英俊<sup>1</sup>

(1. 长春工业大学机电工程学院 长春 130012; 2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

**摘 要:** 为使某航天设备上所搭载的小型空间( TOF) 相机在宽温度工作范围以及复杂动力学环境下能够较好成像, 对空间 TOF 相机大视场光学镜头开展了优化设计。首先, 根据镜头的设计指标要求采用近远心光路设计了光学系统, 并对系统进行了分析; 然后通过对材料性能选取铸钛合金( ZTC4) 作为镜头支撑结构材料; 并探讨了镜座在加工前、后的加工工艺; 随后利用有限元参数化优化和自适应响应面优化算法对镜头关键部件之一的镜筒( 壁厚) 进行了优化设计。优化后镜筒的质量由 75 g 减少至 51.2 g, 减重率达到 31.7%; 最后对整机进行了过载适应性分析、温度适应性分析和模态分析, 并进行了相关测试试验。分析和试验结果表明: 该空间 TOF 相机的各项光机结构性能均满足设计指标要求。

**关键词:** 空间 TOF 相机; 大视场光学镜头; 近远心光路; 优化设计; 有限元分析

**中图分类号:** TH16 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.20

## Structure optimization design of large field of view optical lens for the space TOF camera

Wei Jiali<sup>1</sup>, Qu Huidong<sup>1</sup>, Wang Yongxian<sup>2</sup>, Zhu Junqing<sup>2</sup>, Guan Yingjun<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** The small space time-of-flight( TOF) camera mounted on a certain aerospace device needs to perform imaging in a wide temperature operating range and the complex dynamic environment. To achieve better images, an optimized design of the large-field optical lens of the space TOF camera is carried out. First, according to the lens design index requirements, the optical system is designed and analyzed by using the near-telecentric optical path. Then, by comparing the material properties, the cast titanium alloy ( ZTC4) is selected as the lens support structure material. The processing technic of the lens holder is discussed before and after processing. Thirdly, the lens barrel ( wall thickness) which is one of the key components of the lens is optimized by using the finite element parametric optimization method and the adaptive response surface optimization algorithm. After the optimization, the quality of the lens barrel is reduced from 75 g to 51.2 g, and the weight loss rate reaches 31.7%. Finally, the overload adaptability analysis, temperature adaptability analysis and modal analysis are implemented for the entire camera. Related test experiments are carried out. The analysis and test results show that all the optomechanical structures and performances of this space TOF camera meet the design index requirements.

**Keywords:** space TOF camera; large field of view optical lens; near far optical path; optimized design; finite element ana

## 0 引 言

随着数字成像技术的迅速发展,对于测距式相机提出了越来越高的要求,不仅要求所成图像具有高分辨率、

高帧率、超宽景深以及宽动态范围等,而且要求其在空间探测、超精密测量等重要任务中,要求相机能提供场景的深度信息,这大大促进了深度信息获取技术的发展。深度信息获取技术采用特定的光学测距传感器,从物体表面收集三维坐标数据,以提供有关目标、场景或环境的定

收稿日期: 2020-07-29 Received Date: 2020-07-29

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金( 11803036, 11873007)、中央引导地方科技发展基金( 202002035JC) 项目资助

量信息等<sup>[1]</sup>。

TOF( time-of-flight) 相机作为深度信息获取技术的典型代表之一,其基本工作原理是通过光源向目标物发射调制信号(光信号),到达目标物表面经反射后返回至探测器,经探测器计算出发射与接收信号之间的相移,继而计算出相机与目标之间的距离<sup>[2]</sup>。相较于其他深度测量相机(双目视觉、结构光等),TOF 相机拥有体积小、重量轻、实时性高、光照不敏感等优点<sup>[3-5]</sup>。TOF 相机突出的优点已经逐渐引起了学术界和产业界的极大关注,其结构与研制近年已成为相关科研机构的研究热点,目前在三维重建、手势控制、人机交互、机器人导航以及卫星测距等领域<sup>[6-11]</sup>有着广泛的应用。相信随着技术的不断成熟,对其分辨率和焦距必然会提出更高的要求。这也势必会对 TOF 相机镜头的结构与光学系统设计、制造加工的精确度、环境适应性以及单镜组与镜头的装调提出更高的要求<sup>[12]</sup>。

本文所论述的 TOF 相机大视场光学镜头具有超长视距(20 m)、大视场(72°圆视场)等特点。对于镜头机械结构来说,高刚度、高强度、轻量化及环境适应性向来都是光学镜头的设计重点,镜筒的结构设计关乎以上性能,所以在满足相机镜头使用要求的同时,对 TOF 相机的镜筒进行优化设计成为镜头设计的关键。本文所设计的 TOF 相机将应用于某空间项目,故对优化后的镜头进行了光机集成分析,可为后续结构改进与动力学试验提供有效指导。

## 1 大视场光学镜头的结构方案

### 1.1 镜头光学系统设计指标

本文所研究的空间 TOF 相机大视场光学镜头光学系统设计指标如表 1 所示。

表 1 TOF 相机大视场光学镜头设计指标  
Table 1 Large field of view optical lens design specifications of TOF camera

参数	指标
镜头视场 $2\omega$	$\geq \Phi 72^\circ$
焦距 $f$	5.52 mm
F 数(名义值)	3.0
景深	2 m ~ 20 m
畸变	$< 2.5\%$ (全视野)
MTF	$\geq 0.6$ (全视场下,空间频率为 25 lp/mm,对准物面为 3.5 m 时)
工作波长	840 nm ~ 860 nm
中心波长	850 nm

### 1.2 镜头光学系统设计

根据空间 TOF 相机大视场镜头的测量应用需求,TOF 相机光学设计将采用反远形式,系统为近远心光路系统,其有利于提高测量精度。本文所采用的镜头类型为远心镜头,远心镜头的特点是能够在一定范围物距下,使获得的图像放大倍率不会发生改变,这对被测物不在同一物面上的情况来说是一种非常重要的应用;并且采用远心镜头,即使配合小像素图像传感器,也能生成高分辨率图像。借此运用光学设计软件对选定的初始结构进行优化设计,在优化设计过程中,合理地选择操作数和权重,使各种像差得到有效的控制,并尽可能提高镜头的分辨率。经多次优化,最终采用 7 片光学透镜,光学系统如图 1 所示。

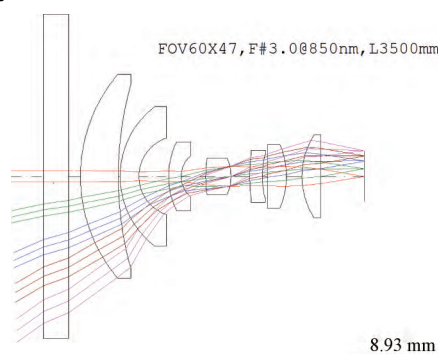


图 1 光学系统结构设计图

Fig. 1 Optical system structure design diagram

### 1.3 镜头光学系统分析

针对选定的光学系统与结构形式进行了详尽的光学系统分析,图 2 仅给出了大视场光学镜头(中心波长)在物距 20 m 处的 MTF 曲线、点列图和畸变的光学系统分析结果。

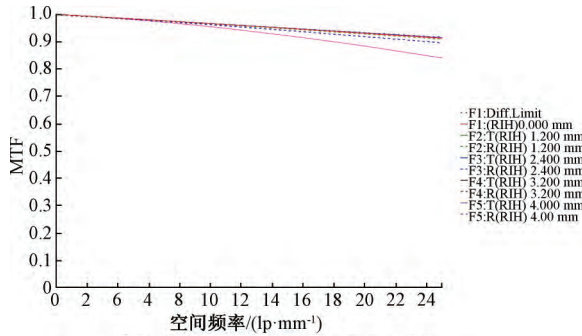
由图 2 分析结果可知,在有效视场角范围内,25 lp/mm 处 MTF 均大于 0.8,可知该系统可以达到理想的成像质量;从点列图分析结果可见,各物距下的 RMS 半径值(几何半径最大值)都小于 3 倍的 GEO 点尺寸(几何半径);由畸变分析数据可以判定,畸变在 2.5% 以内。通过对光学系统在其它物距范围(2 ~ 20 m)下的成像质量分析,验证了该光学系统的可行性。

### 1.4 TOF 相机镜头光机结构设计

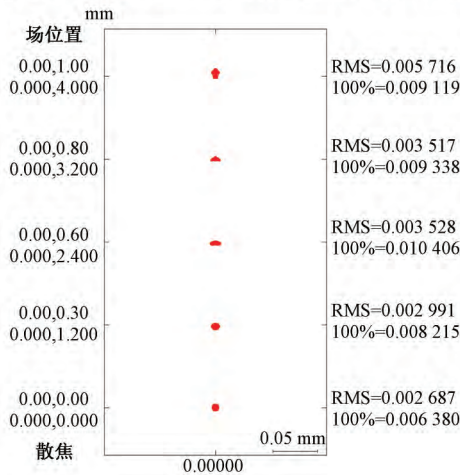
投射系统的镜头结构根据镜头装调方式分为定心车工艺结构和定心调整工艺结构。由于镜头光学设计公差较为严格,拟采用定心车工艺结构,镜片组件采用钛合金材料,镜筒材料可以自由选择。

#### 1) 镜筒结构材料的选取

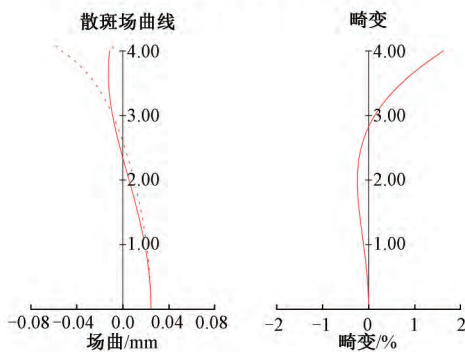
目前国内外空间光学镜头所采用的光机结构材料主要有钛合金、碳纤维复合材料(CFRP)、铝合金(7A09)



(a) 物距 20 m 处光学传递函数 (MTF) 曲线  
(a) Optical transfer function (MTF) curve at object distance 20 m



(b) 物距 20 m 处点列图  
(b) Lens point map at 20 m object distance



(c) 物距 20 m 处的光学畸变曲线  
(c) Distortion curve at 20 m object distance

图 2 镜头在 20 m 物距处的光学系统分析结果

Fig. 2 Analysis results of the optical system of the lens at 20 m object distance

等。其材料性能参数如表 2 所示。

TOF 相机镜头在光学设计时,为满足设计指标,要求镜头结构材料(镜座、镜筒等)性能与透镜的材料性能相适应<sup>[13]</sup>。由于相机的工作温度范围为 $-10\sim 55^{\circ}\text{C}$ ,为保证相机的成像质量就需要镜头结构材料具有较高的热稳定性。热膨胀系数、热导率与比热容是常用的衡量材料热性能的三个物理量,选材要求是高导热、低线胀与低比

表 2 主要结构材料参数表

Table 2 Main structural material parameters

材料	密度 $\rho$ /( $\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}$ )	弹性模量 $E$ /GPa	比刚度 $E/\rho$	热膨胀 系数 $\alpha$ /( $10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$ )	热导 率 $k$ /( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	比热容 /( $\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ )
TC4	4.44	109	2.45	9.1	7.4	611
7A09	2.8	71	2.54	23.6	142	904
CFRP	1.8	纵向 95	5.28	0~1	70	
ZTC4	4.40	114	2.59	8.9	8.8	577
T300B	1.8	横向 31	1.72	铺层工艺确定	8.5	

热容;除要求材料具有良好的热性能外,还需要材料具有良好的力学性能,比刚度是衡量材料力学性能的重要指标,其定义为材料的弹性模量与密度之比,一般希望选材具有高弹性模量与低密度。从表 2 来看,铸钛合金与镜头的光学玻璃的热性能最为接近,钛合金在热真空时效后,其应力释放率可达到 95%,这种方法处理后会使得钛合金有良好的结构稳定性<sup>[14]</sup>。综合考虑选取铸钛合金 ZTC4 作为镜头的结构材料。

## 2) 镜头结构设计

在 TOF 相机中,镜头结构件的功能是确保各光学透镜的球面中心与光轴重叠,并且使各光学透镜之间的间隔满足光学设计要求,这就需要对镜座及其组件进行精密研磨,并通过对单镜组在镜筒内的位置进行精密调节来确保各透镜的间隔与同轴要求<sup>[12]</sup>。为确保镜筒内各个光学折射面的定心精度,可将光学镜筒的定心环节放在最终镜筒总装过程中。这就要求在光学镜头结构设计时要为镜头总装预留调整空间,为每个光学透镜设计各自独立的镜座。为满足镜座的精加工需求,在镜座定心加工前要对镜座外部边缘部分与镜座端面尺寸留有恰当的加工余量。在镜座粗加工时,需对其设计有工艺接口,以便于与空气主轴相连,待精加工完毕后,再利用车刀对工艺接口部位进行切除。

同时,还需对光学镜头结构进行了消热设计,本文选择钛合金(热胀系数为 $9.1\times 10^{-6}/\text{K}$ )作为各透镜之间的机械间隔隔圈材料,并通过分析得知,在 $-10\sim 50^{\circ}\text{C}$ 工作温度范围内,像面产生漂移的最大值为 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ ,调制传递函数下降范围在 5%之内,可以确定本光学系统经消热设计后的成像质量良好。

本空间 TOF 相机大视场光学镜头内含有 7 片光学透镜、压圈、光阑、隔圈、镜座及镜筒等光学结构件,镜头总长为 42.4 mm;各个透镜则通过切向压圈压紧的安装方式,安装在各自独立的镜座内,此种安装方法对镜片的作用应力小,对中性好,耐冲击和振动,能够保持良好的结构稳定性。此种安装方式下,镜筒内部将含有 7 组各自独立的单镜组,各个单镜组通过压圈压紧的方式固定在镜筒内部,镜筒的固定方式则是通过带 4 个 M2.5 螺

钉孔的法兰端面与下端的电箱箱体进行连接。镜筒结构上端部分同样也带有4个M1.5的螺钉孔,其目的是与光源的PCB板连接,进而固定TOF相机的主动光源,镜头具体结构如图3所示。

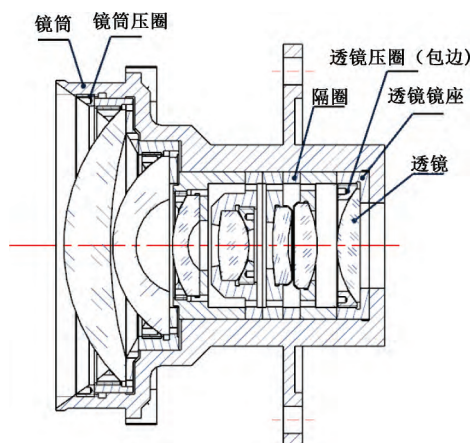


图3 大视场光学镜头结构

Fig. 3 Large-field of view optical lens structure

## 2 TOF 相机镜筒壁厚的优化设计

镜筒作为镜头结构件中的关键零件,其结构稳定性直接关系到镜头的光学性能优劣,在保证镜头结构具有足够刚度与强度的同时,还需考虑的就是镜筒的轻量化问题。在实际的光学镜头设计中,设计者一般是根据经验来确定镜筒的结构尺寸与形状,此时镜筒的壁厚往往会留出较大的余量,在增加镜头的刚度和强度的同时也会导致镜头结构偏重,并且随着壁厚的增大的同时也会降低镜头的环境适应性,导致在透镜发生应力应变时镜筒起不到良好的缓冲作用,镜面面形变差。为实现镜头轻量化设计并提高镜头的环境适应性,本文利用有限元软件 HyperStudy 对镜筒壁厚进行了结构优化设计。

### 2.1 参数优化模型建立

在光学镜头中,镜筒作为镜头的主体结构,其对光学零件起到支撑与保护的作用,对整体光机结构系统影响较大,并且对镜头的光学系统性能也会产生相应的影响,如分辨率、同心度等<sup>[15]</sup>。故本文将镜筒壁厚的变化量作为设计变量具体如图4所示,以材料铸钛合金的屈服应力与镜筒法兰处变形作为约束函数,以镜筒轻量化(质量最轻或体积最小)作为目标函数对镜筒进行优化。式(1)为镜筒的参数优化模型。

$$\begin{aligned} \text{Find } X &= (T1, T2, T3) \\ \text{S. t. } \text{dis} &\leq 0.01 \text{ mm} \ \& \ \text{stress} \leq 700 \text{ MPa} \\ \text{Min } \text{Mass} \end{aligned} \quad (1)$$

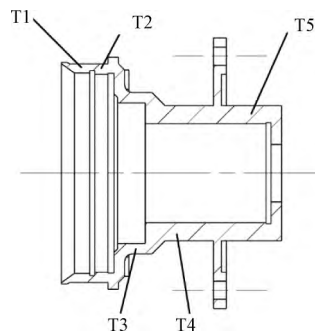


图4 镜筒初始三维模型

Fig. 4 Initial 3D model of lens barre

式中:  $T_i^L \leq T_i \leq T_i^U$  ( $i = 1, \dots, n$ ),  $x_i^U$  为设计变量最大极限;  $x_i^L$  为设计变量最小极限。

通过 HyperStudy 功能下的 HyperMorph 功能对镜筒内壁的节点进行固定,通过移动节点,仿真镜筒的厚度变化。镜筒实体网格模型如图5所示,图5(a)为镜筒参数化模型,图5(b)为优化后镜筒厚度云图。

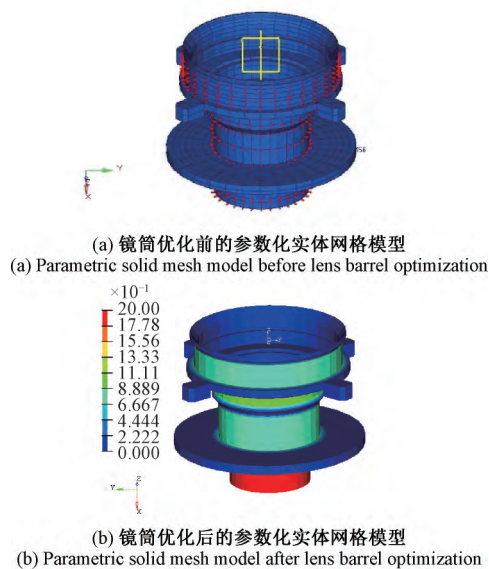


图5 镜筒优化前后的参数化实体网格模型

Fig. 5 Parametric solid mesh model before and after lens barrel optimization

参数优化模型建立之后,再通过 HyperStudy 模块内的自适应响应面法,计算流程如图6所示,对目标函数和约束函数按照以下二阶多项式进行拟合:

$$g_j(x) \approx \hat{g}_j(x) = \alpha_{j0} + \sum_1^n \alpha_{jn} X_n + \sum_1^n \sum_1^n \alpha_{jnm} X_n X_m \quad (j = 1, 2, \dots, m+1) \quad (2)$$

式中:  $m$  表示约束个数;  $n$  表示控制因子个数;  $\alpha_{j0}$ 、 $\alpha_n$ 、 $\alpha_m$  为二次项系数。

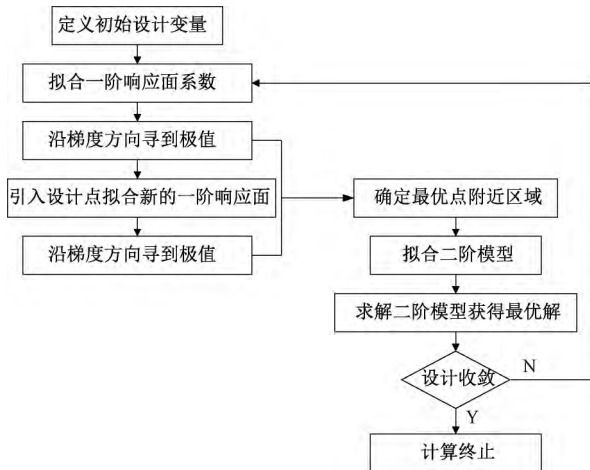


图 6 自适应响应面法计算流程图

Fig. 6 Flow chart of the adaptive response surface method

## 2.2 镜筒结构优化结果

对上述参数化模型进行加载、求解。利用 HyperStudy 优化设计模块进行优化迭代计算,迭代出了最优的设计变量值。如图 7 所示,分别为 5 个尺寸变量的迭代历程图与镜头质量的变化迭代历程图。

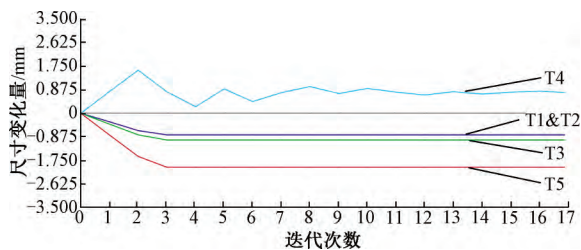


图 7 尺寸变化量迭代图

Fig. 7 Iterative curves of various structural parameters

从图 6 可见,经参数迭代计算,T1、T2、T3 和 T5 的尺寸有大幅减少,T4 尺寸有略微增加,经 17 次迭代均已完全收敛,优化后的有限元网格实体模型如图 5 所示。经优化后镜筒质量由最初的 75 g 减少到 51.2 g,减重率达到 31.7%。考虑结构工艺性与加工要求,还须对优化后的相应尺寸进行相应调整。表 3 为设计变量尺寸优化前后的对比。

表 3 设计变量尺寸优化前后对比

设计变量	T1	T2	T3	T4	T5
初始值	1.8	2.1	2	3.5	3.5
变化范围	±1	±1	±1	±2	±2
最终值	1	1.3	1.14	4.2	1.5

## 3 空间 TOF 相机整机的有限元分析

利用三维设计软件 UG 对相机结构进行实体造型,随后将整机三维实体模型导入有限元软件 HyperMesh 中进行有限元建模,在相机整机与卫星平台接口处设置力学输入,来模拟相机整机力学环境下的镜头响应,整机的有限元模型如图 8 所示。

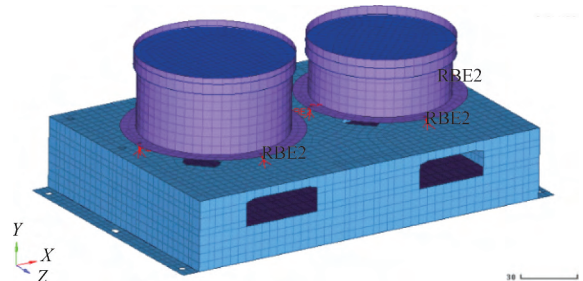


图 8 相机整机的有限元模型

Fig. 8 The finite element model of the camera

### 3.1 过载适应性分析

TOF 相机安装在运载设备上,在运载过程中相机会受到 3 个方向(X、Y、Z)上大小为 16 g 的加速度载荷,该种载荷是相机在运载火箭运载阶段中产生的,可以当作是一个近似于准稳态加速度。在此力学环境下,要求相机零部件不发生破坏或屈服变形,并且还要保证光学性能不降低。过载工况下的应力和变形分析结果如表 4 所示。

表 4 过载适应性分析结果

Table 4 Overload adaptability analysis results

载荷方向	载荷大小/g	应力/MPa	变形/ $\mu\text{m}$
X	16	3.37	8.75
Y	16	7.18	35
Z	16	3.28	12.8

由分析结果可知,相机在 3 个方向上施加过载载荷时,最大的应力发生在 Y 向,最大应力为 7.18 MPa,远小于所用材料的屈服应力,因此可知所设计的结构在过载载荷作用下不会发生屈服变形。虽然 Y 向的最大变形有 35  $\mu\text{m}$ ,发生在电箱分别与镜罩、镜筒连接处,但由于变形量相对较小,经测试不足以影响成像精度。

### 3.2 温度适应性分析

TOF 相机在空间环境下工作时,相机的工作温度会受空间环境温度及自身电子器件工作时产生的热量的影响而发生变化,所以需要在温变载荷作用下来考察相机的热应力与热应变。本文将对整机在 -10~55℃ 温度载荷工况下进行温度适应性分析,分析结果云图如图 9 所示。

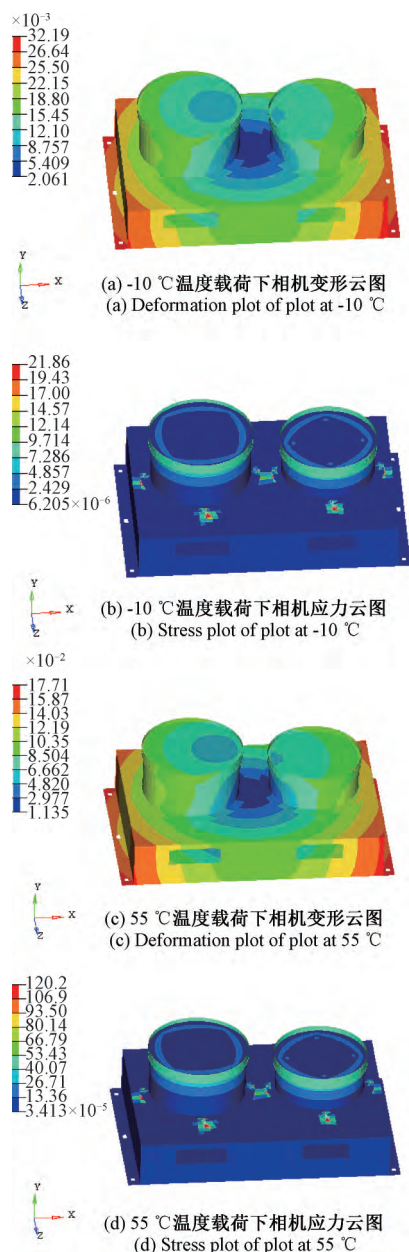


图9 TOF 相机温度适应性分析结果

Fig. 9 TOF camera temperature adaptability analysis results

从图9分析结果可以看出,在55℃温度载荷的作用下,相机出现最大应力为120 MPa,最大变形为177 μm。该应力发生在镜罩与电箱的接口处,属于应力集中现象。同时镜罩与电箱均采用铝合金材料,该应力小于铝合金的屈服极限,所以结构不会发生屈服变形,但是考虑到空间工作状态下过大的热应力和热变形易对电子元器件的正常工作造成不良影响,所以还需提前做好热控措施。

### 3.3 模态分析

模态分析的目的是为了考察结构系统的动态刚

度<sup>[16]</sup>。本文提取了相机整机的前3阶模态。其分析结果如图10所示。

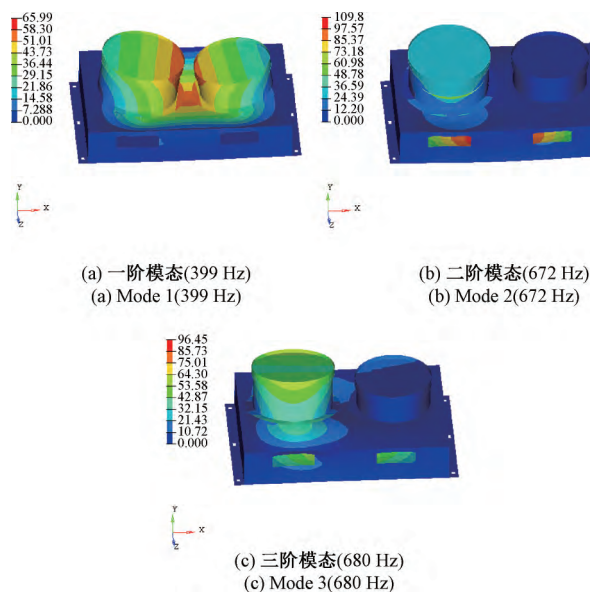


图10 模态分析结果

Fig. 10 Modal analysis results

由模态分析结果可知,相机的一阶固有频率为399 Hz。从振型上看,一阶的振型为Y向振动模态,二阶与三阶均为大视场镜头绕X轴转动模态。分析其原因是由于电箱的结构刚度较弱,但相机基频较高,能够满足动态刚度要求。

## 4 镜头加工与检测

依据优化后的镜筒结构参数成功加工出镜筒,针对项目要求对镜头进行定心安装,最终装配完毕后的相机镜头实物如图11所示。

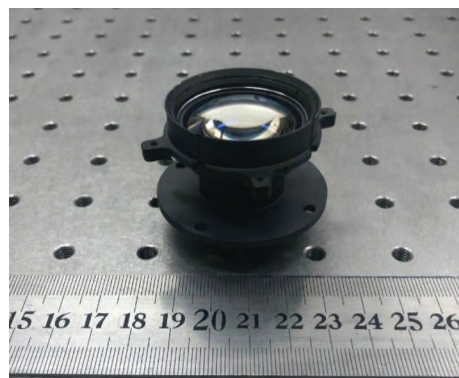


图11 空间TOF相机大视场光学镜头

Fig. 11 Large TOF optical lens of space TOF camera

通过 ZYGO 干涉仪检测镜头内各光学透镜的面形偏差, 本文仅给出了第 1 片透镜的干涉检测结果图。检测结果如图 12 所示。(球面) 透镜 1 曲率半径为  $R_1 = 24.6 \text{ mm}$  面的面形  $PV = 0.103\lambda$ ,  $RMS = 0.015\lambda$ ; 曲率半径为  $R_2 = 53.21 \text{ mm}$  面的面形  $PV = 0.223\lambda$ ,  $RMS = 0.025\lambda$ , 均满足光学设计指标要求, 同样经检测其余 6 片光学透镜的检测结果均满足设计指标要求。并对安装后的镜头进行了光学检测, 经检测整个光学镜头的各项指标均满足设计要求, 详细检测结果如表 5 所示。

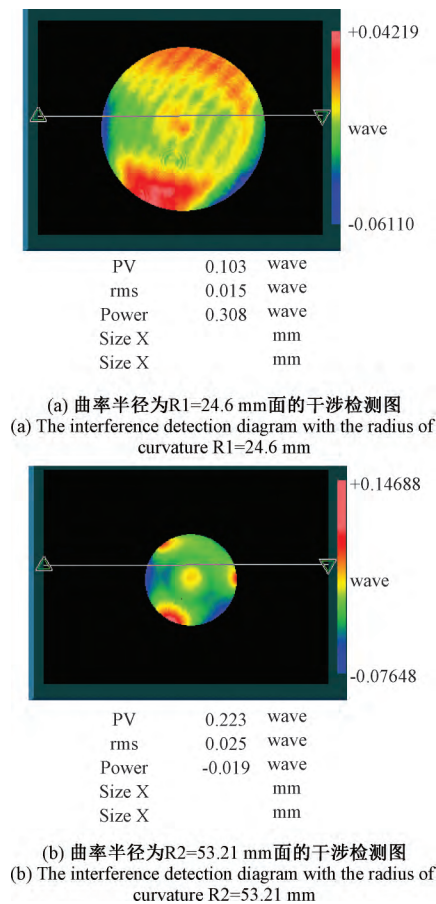


图 12 (球面) 透镜 1 的干涉检测结果

Fig. 12 (Spherical) lens 1 interference detection result

表 5 光学镜头检测结果

Table 5 Optical lens test results

检测项目	技术指标	检测结果
镜头视场 $2\omega$	$\geq 72^\circ$	$72^\circ$
焦距 $f$	$5.52 \text{ mm}$	$5.56 \text{ mm}$
F 数(名义值)	3.0	3.07
畸变	$< 2.5\%$ (全视野)	2.3%
MTF	$\geq 0.6$ (全视场下, 空间频率为 $25 \text{ lp/mm}$ , 对准物面为 $3.5 \text{ m}$ 时)	0.7

## 5 结 论

本文针对某空间 TOF 相机的大视场光学镜头开展了结构优化设计, 并对其进行了光学系统成像性能分析和有限元分析。利用自适应响应面法优化了镜筒结构, 优化后的镜筒减重率达到 31.7%。对优化后的整机进行了过载适应性、温度适应性及模态分析, 分析结果表明, 该空间 TOF 相机的光机结构能满足设计指标要求。试制了相机镜头, 并对相机镜头进行了光学检测, 检测结果表明, 镜头的各项指标均满足设计要求并能较好成像。鉴于该类相机在我国空间近距离目标探测领域处于初步应用尝试阶段, 对其应用还需进一步研究。相信随着 TOF 相机研制技术的不断提升, 未来有望成为我国航天领域近距离目标探测中的一种有效测量手段。

## 参考文献

- [1] MASSA J S, BULLER G S, WALKER A C, et al. Time-of-flight optical ranging system based on time-correlated single-photon counting [J]. Applied Optics, 1998, 37(31): 7298-304.
- [2] 梁斌, 何英, 邹瑜, 等. TOF 相机在空间非合作目标近距离测量中的应用 [J]. 宇航学报, 2016, 37(9): 1080-1088.  
LIANG B, HE Y, ZOU Y, et al. Application of TOF camera in close-range measurement of non-cooperative targets in space [J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(9): 1080-1088.
- [3] 宋玉志, 卢纯青, 王立. 3D-TOF 相机在空间近距离目标探测中的应用研究 [J]. 空间控制技术与应用, 2019, 45(1): 56-62.  
SONG Y ZH, LU CH Q, WANG L. Research on the application of 3D-TOF camera in space close-range target detection [J]. Space Control Technology and Application, 2019, 45(1): 56-62.
- [4] 丁津津, 张旭东, 高隼, 等. 基于 TOF 技术的 3D 相机应用研究综述 [C]. 中国仪器仪表学会第十二届青年学术会议论文集, 2010: 76-79.  
DING J J, ZHANG X D, GAO J, et al. Overview of 3D camera application research based on TOF technology [C]. Proceedings of the 12th Youth Academic Conference of Chinese Society of Instrumentation, 2010: 76-79.
- [5] LI L, LIU H, XU Y, et al. Measurement linearity and accuracy optimization for time-of-flight range imaging cameras [C]. 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). IEEE, 2020: 520-524.

- [6] HE Y, CHEN SH Y, et al. Recent advances in 3D data acquisition and processing by time-of-flight camera [J]. IEEE Access, 2019, 7: 12495-12510.
- [7] DRUML N, EHRENHOEFER C, Bell W, et al. A fast and flexible HW/SW co-processing framework for time-of-flight 3D imaging [J]. Microelectronics & Reliability, 2018, 81: 64-76.
- [8] 陆熊, 陈晓丽, 孙浩浩, 等. 面向自然人机交互的力触觉再现方法综述 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10): 2391-2399.
- LU X, CHEN X L, SUN H H, et al. Summarization of force-tactile reproduction methods for natural human-computer interaction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10): 2391-2399.
- [9] GALL M, GARN H, KOHN B, et al. Automated detection of movements during sleep using a 3D time-of-flight camera: Design and experimental evaluation [J]. IEEE Access, 2020(99): 1-1.
- [10] TSUJI S, KOHAMA T. Proximity skin sensor using time-of-flight sensor for human collaborative robot [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(14): 5859-5864.
- [11] UNO K, BURTZ L J, et al. Qualification of a time-of-flight camera as a Hazard detection and avoidance sensor for a moon exploration microrover [J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical & Space Sciences Aerospace Technology Japan, 2018, 16(7): 619-627.
- [12] 王智, 张立平, 姚惠. 三线阵立体测绘相机光学镜头的设计 [J]. 光子学报, 2010, 39(2): 227-232.
- WANG ZH, ZHANG L P, YAO H. Design of optical lens of three-line array stereo mapping camera [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(2): 227-232.
- [13] 孟祥月, 王洋, 张磊, 等. 大相对孔径宽光谱星敏感器光学镜头设计 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(7): 190-197.
- MENG X Y, WANG Y, ZHANG L, et al. Optical lens design of wide relative aperture wide-spectrum star sensor [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(7): 190-197.
- [14] 苗健宇, 张立平, 吴清文, 等. 测绘相机光学镜筒设计、加工及装配 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1648-1653.
- MIAO J Y, ZHANG L P, WU Q W, et al. Design, processing and assembly of surveying camera optical lens barrel [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(9): 1648-1653.
- [15] 杨洪波. 空间遥感相机镜筒主要参数工程分析与计算 [J]. 光学精密工程, 1994, 2(2): 23-28.
- YANG H B. Engineering analysis and calculation of main parameters of space remote sensing camera lens barrel [J]. Optical Precision Engineering, 1994, 2(2): 23-28.
- [16] 杨利伟, 李志来, 辛宏伟, 等. 小型红外相机结构设计与分析 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3025-3031.
- YANG L W, L ZH L, XIN H W, et al. Structural design and analysis of small infrared cameras [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(10): 3025-3031.

### 作者简介



魏加立, 2018 年于长春大学获得学士学位, 现为长春工业大学硕士研究生, 主要研究方向为空间光学仪器光机结构优化设计。  
E-mail: 1569750701@qq.com

**Wei Jiali** received his B.Sc. degree from Changchun University in 2018. He is currently a M.Sc. student at Changchun University of Technology. His main research interest is the optimal design of optical and mechanical structure of space optical instrument.



关英俊(通信作者), 分别在 2001 年和 2004 年于长春工业大学获得学士学位和硕士学位, 2007 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 现为长春工业大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为空间光学仪器光机结构优化设计。

E-mail: guanyingjun@ccut.edu.cn

**Guan Yingjun** (Corresponding author) received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from Changchun University of Technology in 2001 and 2004, and received his Ph.D. degree from CIOMP in 2007. He is currently a professor and a Ph.D. advisor at Changchun University of Technology. His main research interest is the optimal design of optical and mechanical structure of space optical instrument.