

光机热集成方法的红外系统应用

吴卫¹, 白瑜², 陈驰³

- (1. 武汉光迅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430205;
2. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;
3. 华中光电技术研究所-武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430223)

摘要: 红外光学系统在军事、航空航天、民用等领域应用越来越广, 系统面临的外界环境复杂多变。只用光学分析软件来评估系统性能的传统方法不仅无法综合考虑不同材料间耦合影响, 也不能较为准确地描述热物理梯度场, 因此对结果的精确性分析略显不足, 而光机热集成分析是综合多物理场作用的有效方法, 涵盖了光学、机械、热学三个方向对系统性能的影响因素。通过研究 Zernike 多项式拟合算法, 编制了学科间的数据转换程序, 实现了分析模块间的数据传输, 并在热不敏红外系统的设计过程中采用光机热集成分析方法得到高低温工况下的光学系统传递函数, 为指导系统设计改进、提高系统性能提供了有力的理论依据。

关键词: 红外系统; 光机热集成分析; Zernike 多项式; 波面拟合; 数据接口

中图分类号: TH744 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0618002

Application of optical, mechanical and thermal integration in infrared system

Wu Wei¹, Bai Yu², Chen Chi³

- (1. Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430205, China;
2. The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy Sciences, Chengdu 610209, China;
3. Huazhong Institute of Electro-Optics-Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430223, China)

Abstract: Infrared optical systems, facing with complex external environment, are widely used in military, aerospace, civil and other fields. The traditional method for evaluating system performance just by Optical Analysis Software should be improved, and thermal/structural/optical (TSO) integrated analysis is an effective method for synthesizing effects of multiple physical fields, which include optics, mechanics and thermology. The data conversion program between disciplines was compiled after researching Zernike polynomial fitting algorithm. The interface problem of data transmission in optical mechanical and thermal program was solved, and the thermal insensitivity optical system design was carried out using the TSO integrated analysis, as an example. The optical transfer function of infrared system under the high and

收稿日期: 2019-02-05; 修订日期: 2019-03-10

作者简介: 吴卫(1985-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事机械结构设计及分析方面的研究。Email: dtt0795@163.com

low temperature environment was obtained by TSO integrated analysis, which provides a theoretical basis for the improvement of system design and performance.

Key words: infrared system; thermal/structural/optical(TSO) integrated analysis; Zernike polynomial; wavefront fitting; data interface

0 引言

红外技术的不断进步使得越来越多的红外系统应用到军事、航空航天与工农业等领域,人们对其成像性能也提出了更高的要求。以红外系统实际工作环境出发,处于空间条件下的红外系统面临的环境最为苛刻,而对于地基红外系统,热环境以及机械结构支撑部件对其成像质量的影响也不容忽视^[1-3]。因此,研究实际工作环境下红外系统的温度场和夹持应力场分布规律,据此分析对系统成像质量的影响,对于提高系统工作性能将会有很大帮助。

对可能影响红外系统成像的因素包括机械支撑结构的变形对光学元件空间位置及面型的改变;温度场相对于装配环境变化对镜片面型的影响;温度变化对红外材料光学特性的变化^[4-6]。运用光机热集成分析方法,先得到系统内部的温度场分布,再计算各种材料在不同温度梯度下的变形量,求得因此造成的应力场和系统形变,最终通过数据处理生成光学设计软件可读取的参数,完成红外系统在实际工作环境下的光学性能评估^[7-8]。

1 Zernike 多项式原理及应用

Zernike 多项式在单位圆域内具有正交性和线性无关性,而且可以唯一的、归一化的描述镜面圆形孔径波前畸变的函数系,分为标准 Zernike(ZRN)和 Fringe Zernike(ZFR)两种形式,其中后者是前者的子集,两者在顺序上也略有差异。因为光学设计中习惯用 Seidel 像差函数来描述光学系统像差体系,而 Zernike 多项式与初级像差又具有一定的对应关系,且大多数主流光学设计软件都提供 Zernike 多项式输入接口,所以光机热集成分析方法中采用 Zernike 多项式对各镜片面型进行拟合。

一般 Zernike 多项式采用极坐标表示,公式如下^[9-10]:

$$Z(r, \theta) = A_{00} + \sum_{n=2}^{\infty} A_n R_n^0(r) +$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^n R_n^m [A_{nm} \cos(n\theta) + B_{nm} \sin(m\theta)] \quad (1)$$

其中

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

式中: A_{nm} 和 B_{nm} 为 Zernike 系数; n 和 m 均为整数,且 $n \geq m$ 。表 1 给出了 Zernike 多项式前几项的表达式和物理意义^[11]。

表 1 Zernike 多项式及其物理意义

Tab.1 Zernike polynomial and physical meaning

| No. | n | m | Expression | Physical meaning |
|-----|-----|-----|---------------------|------------------|
| 1 | 0 | 0 | 1 | Piston |
| 2 | 1 | -1 | $r \cos(\theta)$ | Tilt X |
| 3 | 1 | 1 | $r \sin(\theta)$ | Tilt Y |
| 4 | 2 | -2 | $r^2 \cos(2\theta)$ | Astigmatism X |
| 5 | 2 | 0 | $2r^2 - 1$ | Power |
| 6 | 2 | 2 | $r^2 \sin(2\theta)$ | Astigmatism Y |

利用 Zernike 多项式进行面型拟合分为两个过程:数据处理和多项式拟合。数据处理是多项式拟合的前期准备,保证了多项式拟合的收敛及精度。

1.1 数据处理

所谓数据处理主要是将有限元软件仿真分析得到的镜面离散数据点转化为光学设计软件可识别的表达连续波面函数的数据形式。其中一个重要环节是将结构分析程序在笛卡尔坐标系、球面坐标系或柱面坐标系下得到的结果数据变换成光学分析软件能接受的基于垂度坐标系或基于表面法向坐标系下的数据,换个说法就是将红外光学系统全局坐标系下的数据离散点变为以各个透镜定点为原点的局部坐标系下的数据离散点。

为加快对复杂红外光学系统的数据处理速度,需要先将有限元分析程序得到的各个镜片面型数据格式统一,然后再进行数据归一化以及极坐标判定或转换,最后得到可输入到 Zernike 拟合程序的单位圆域内的密度离散集。上述过程是所有 Zernike 多项式拟合的基本步骤,其中根据拟合目的及采用后端光学设计软件的异同,需要适时选用相对形变值和绝对形变值。相对形变值是指经过有限元分析后,提取的镜片面型离散点坐标要分离出原始面型和刚体位移部分,获得仅包含面型微小形变的数据集,该方法适用于光学分析软件 Zemax,可单独分离像差类型和大小,有利于光学系统的装调和误差分析。绝对形变值则不需要剥离刚体位移,其值是由有限元分析数据提取去除基底函数族的标准面型后所得,该方法适用于光学分析软件 CODEV,虽然无法单独分析某一像差,但减化了数据转换过程,减少了误差环节,且更便于快速观察整个光学系统的像质变化。文中立足于拟合指导设计,采用绝对形变值拟合方案。

1.2 拟合算法

无论是相对形变值还是绝对形变值,区别仅在于用于 Zernike 拟合的原始样本集形态不同,对拟合算法的适用度是相同的。光学系统的波面或镜片表面总是光滑和连续的,对镜片面型的拟合就是选择一个线性无关的基底函数系组合 $Z(x, y)$ 来表示离散波差函数 $z(x, y)$,通过连续的函数形式“串联”离散样本点集,差值补充后获得被拟合镜片表面的连续表征,其拟合精度可通过对比拟合曲线与样本点集的 PV 值和 RMS 值来评判。

采用 n 项 Zernike 多项式表示镜片表面拟合:

$$Z(x, y) = q_1 z_1(x, y) + q_2 z_2(x, y) + \dots + q_n z_n(x, y) = q^T F \quad (3)$$

假设由有限元分析后得到的离散样本点集共有 m 个数据点,记为: $z(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, m$ 。令 $a_{ij} = z_j(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ 。代入公式(3)可得到矛盾方程组:

$$\begin{cases} a_{11}q_1 + a_{12}q_2 + \dots + a_{1n}q_n = z_1 \\ a_{21}q_1 + a_{22}q_2 + \dots + a_{2n}q_n = z_2 \\ \vdots \\ a_{m1}q_1 + a_{m2}q_2 + \dots + a_{mn}q_n = z_m \end{cases} \quad (4)$$

记为: $AQ=Z$ 。其中, $A=a_{ij}$ 是一个 $m \times n$ 的矩阵,其值为离散样本点集通过 Zernike 多项式计算得到; $Q=(q_1, q_2, \dots, q_n)^T$, 是 Zernike 多项式系数; $Z=(z_1, z_2, \dots, z_m)^T$ 。

该矛盾方程组不存在一般意义下的解,通常的办法是导出其线性方程组,利用最小二乘法获得使该矛盾方程具有最小残差时的解。具体实施有三种方法:一、直接采用最小二乘法,该方法在数据量大时可能出现本构矩阵的病态奇异,稳定性不高;二、采用 Householder 变换把求解系数正交三角化,再进行系数求解;三、采用 Gram-Schmidt 变换基底函数系,避免系数矩阵出现病态^[12]。经过对三种方法的对比,由于所分析的红外系统的拟合数据量并不庞大,采用三种方法所得的计算结果相差甚微,因此选用最直接的最小二乘法。通过 Matlab 编制了求解 Zernike 系数的应用程序,经过前期有限元分析后,将数据进行适应性处理,最后得到一系列 Zernike 系数,根据所拟合面型的不同特点,选用相应的拟合阶数,既可保证镜片面型的拟合精度,又可节约计算资源提高效率。

2 应用实例

根据上述理论和实施过程,利用 Matlab 开发出一个有效的光机热集成分析的数据转换接口程序,并将整个分析步骤应用于某热不敏红外系统的光机热集成分析^[13]。在此过程中应用到的软件主要包括: ANSYS(热分析模块和结构分析模块)、Matlab(数据接口程序)、CodeV(光学分析软件)。

图 1 为该热不敏红外系统采用的光机热集成分析流程图,光学系统基础参数描述如下:焦距 $f'=40 \text{ mm}$, $F^\#=1$,视场角 $H \times V=15.49^\circ \times 11.65^\circ$,工作波段 $8 \sim 12 \mu\text{m}$,探测器 $640 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,像元大小为 $17 \mu\text{m}$ 。图 2 和图 3 分别为初始设计的有限元模型和光学设计光路图。图 4 给出了常温条件下红外系统的光学传递函数,可以看出该原始设计符合使用要求。图 3 给出了常温条件下通过有限元数据获得的红外系统光学传递函数,与图 4 对比差别非常小,可以满足工程应用的误差要求,验证了拟合算法的正确性和精度。

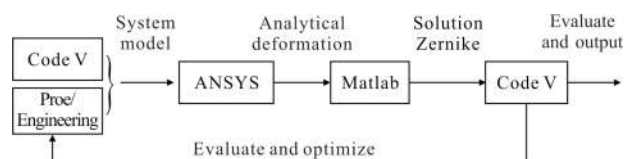


图1 光机热集成分析流程图

Fig.1 Flow chart of thermal/structural/optical

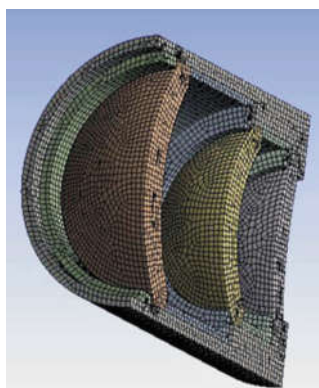


图 2 光学系统有限元模型

Fig.2 Finite element model of optical system

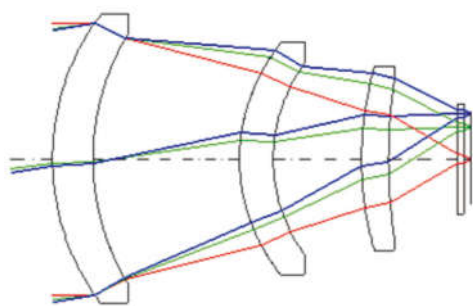


图 3 光学系统光路图

Fig.3 Optical path of system

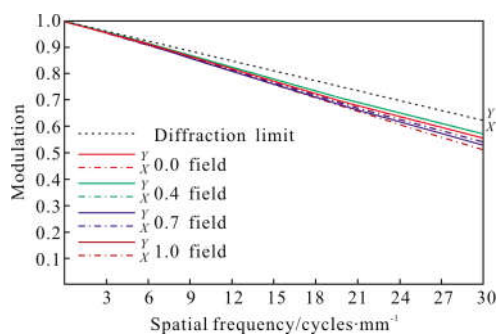


图 4 光学系统 MTF 设计值

Fig.4 MTF of optical system (design value)

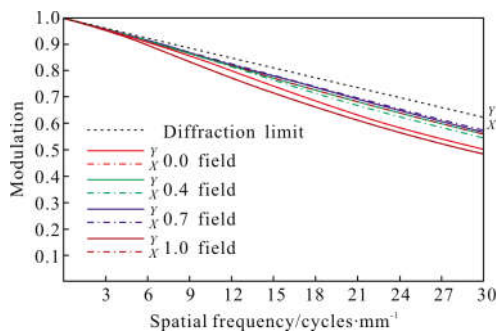


图 5 光学系统 MTF 拟合值

Fig.5 MTF of optical system (fitting value)

在所做的温度环境变化对镜头性能影响的分析中,首先需要分析红外系统在不同工况下的温度场分布,再将温度场结果作为载荷预加载到 ANSYS 的结构分析模块,同时施加固定约束等机械载荷,在所有边界条件的共同作用下得到因结构变形(含光学结构和机械结构)引起的光学元件表面形变值,将得到的各镜面数据代入所编制的数据库转换接口,进行 Zernike 多项式拟合,获得相应的 Zernike 系数,再将 Zernike 系数以及配合的拟合半径输入 CodeV,检查光学系统的性能变化。鉴于篇幅限制,表 2(球面)和表 3(非球面)分别列举了其中两个镜片面型的部分

表 2 某球面的 Zernike 系数(-40 °C)

Tab.2 Zernike polynomial coefficients of a spherical surface(-40 °C)

| No. | Coefficient | No. | Coefficient | No. | Coefficient |
|-----|--------------|-----|-------------|-----|-------------|
| 1 | -0.015 149 1 | 11 | -6.29E-6 | 21 | -6.15E-7 |
| 2 | 9.49E-6 | 12 | 0.000 468 6 | 22 | -2.31E-5 |
| 3 | 7.32E-7 | 13 | -1.96E-6 | 23 | 2.81E-5 |
| 4 | 0.005 997 5 | 14 | 3.25E-6 | 24 | 8.55E-5 |
| 5 | 1.15E-6 | 15 | -2.94E-5 | 25 | -3.63E-5 |
| 6 | -5.85E-6 | 16 | 5.44E-6 | 26 | -5.59E-6 |
| 7 | -1.2E-5 | 17 | -2.85E-6 | 27 | -1.73E-5 |
| 8 | -2.99E-6 | 18 | 4.07E-5 | 28 | -4.22E-6 |
| 9 | -1.99E-6 | 19 | 1.79E-5 | | |
| 10 | -2.88E-6 | 20 | 1.16E-5 | | |

表 3 某非球面的 Zernike 系数(-40 °C)

Tab.3 Zernike polynomial coefficients of an aspheric surface (-40 °C)

| No. | Coefficient | No. | Coefficient | No. | Coefficient |
|-----|--------------|-----|-------------|-----|-------------|
| 1 | -0.020 319 8 | 11 | -1.79E-5 | 21 | -3.06E-7 |
| 2 | -1.22E-5 | 12 | -4.37E-7 | 22 | 6.74E-6 |
| 3 | -1.12E-5 | 13 | 0.006 786 6 | 23 | -1.28E-5 |
| 4 | -4.26E-6 | 14 | 6.18E-6 | 24 | -4.1E-6 |
| 5 | 0.021 641 5 | 15 | 5.83E-6 | 25 | 0.000 781 7 |
| 6 | 1.57E-5 | 16 | 3E-5 | 26 | -6.19E-6 |
| 7 | -1.29E-5 | 17 | 3.46E-6 | 27 | -7.13E-8 |
| 8 | -1.47E-6 | 18 | 1.12E-5 | 28 | -7.9E-6 |
| 9 | -7.44E-7 | 19 | 2.2E-6 | | |
| 10 | 2.06E-5 | 20 | 8.94E-6 | | |

Zernike 系数,从表中可以看出,由于结构件的约束和结构材料与光学材料膨胀性能的不匹配,导致了变形应力,使得原始的球面面型已不再保持球面,这与自由膨胀有所区别,即该分析综合考虑了机械和热的影响,较之光学设计软件的自由状态更加贴合实际情况。

为了提高红外光学系统对高低温环境的适应能力,根据对初始结构的分析,在控制光学元件厚薄比、控制透镜曲率避免透镜过度弯曲、优化隔圈材料减小热应力等方面做了优化,图 6 为优化后的光学设计光路图。图 7 和图 9 分别为在考虑结构件与光学件同时

数据转换程序能够实现光机热各分析模块之间的数据传输,并且整个光机热集成分析的思路及实施是有效的,符合工程应用精度要求的。

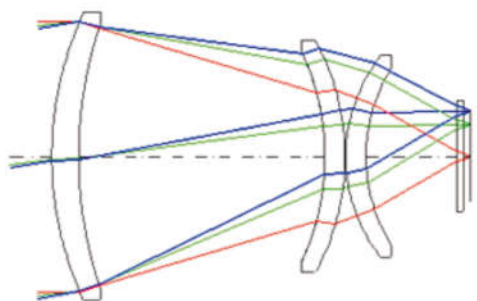


图 6 光学系统光路图(优化后)
Fig.6 Optical path of system (Optimized)

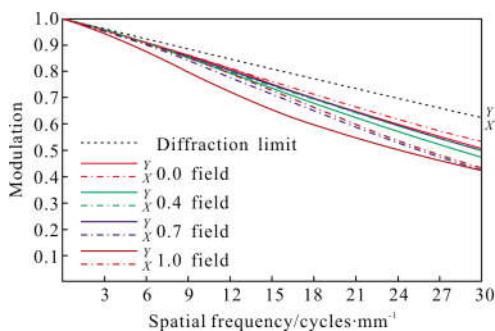


图 7 -40℃条件下光学系统 MTF 拟合值
Fig.7 Fitting MTF of optical system in -40℃ condition

变形条件下的光学系统 MTF 变化,可以看出由于考虑了结构件对光学系统的约束应力,使得镜体在压缩状态(低温工况)或拉伸状态(高温工况)时面型变化更为剧烈,该条件下的光学系统 MTF 与光学分析软件 CodeV 中有较大差异,这种现象已在上文中提到,是更符合实际工况的分析结论。图 8 和图 10 为参考光机热集成分析结果后进行了光学设计优化的 MTF 曲线,再次分析高低温工况时发现该光学系统的 MTF 有了不同程度的改善。通过这个实例证明了所编制的

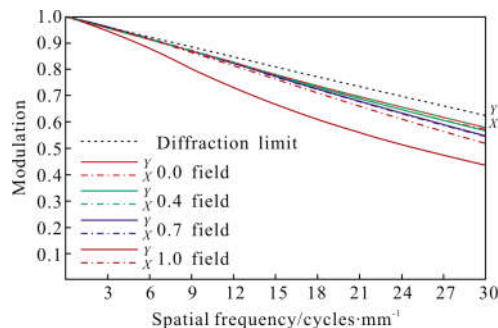


图 8 -40℃条件下光学系统 MTF 优化值
Fig.8 Optimized MTF of optical system in -40℃ condition

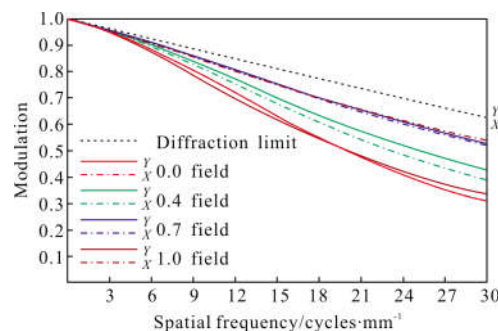


图 9 60℃条件下光学系统 MTF 拟合值
Fig.9 Fitting MTF of optical system in 60℃ condition

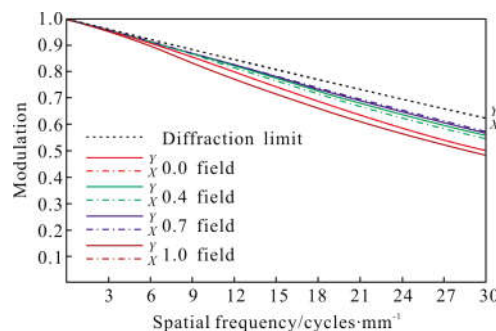


图 10 60℃条件下光学系统 MTF 优化值
Fig.10 Optimized MTF of optical system in 60℃ condition

3 结论

传统分析方法中仅使用光学软件,无法准确地评估多物理场耦合工况,光机热集成分析方法可以综合考虑光学、机械、热学三方面影响因素对红外光学系统性能的改变,只要建立合适的跨学科数据传

输通道,并合理设置分析边界条件,其所得结果更加符合实际状态。

Zernike 多项式的特点决定了它是光机热集成分析中最适宜的接口工具,通过数据处理和拟合算法研究,编制了满足工程实践的数据转换程序,并在某热不敏红外系统设计中得到运用,获得了在不同外载荷作用下光学系统的光学性能变化,这对指导改进系统设计,提高光学系统性能和对环境的适应力能力具有较好的工程价值。

参考文献:

- [1] Vaitekunas D A, Kim Y. IR signature management for the modern navy[C]//Proceedings of SPIE, 2013, 8076: 80760U.
- [2] Goullioud R, Content D A, Kuan G M, et al. Wide Field Infrared Survey Telescope [WFIRST]: Telescope design and simulated performance[C]//Proceedings of SPIE, 2012, 8442: 84421U.
- [3] Gee L A, Legrand A C, Meriaudeau F, et al. Textures from stereo-based IR imaging for industrial tire inspection [C]//Proceedings of SPIE, 2000, 4052: 375-384.
- [4] Li Zekun, Lv Qunbo, Li Weiyan, et al. Design and analysis of a thermally driven focusing structure for space camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(4): 0422004. (in Chinese)
- [5] Luo Gangyin, Wang Bidou, Chen Yuqi, et al. Design of athermal mid-infrared imaging spectrometer based on offner scheme [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 1104004. (in Chinese)
- [6] Fang Yu, Xiang Libin, Lv Qunbo, et al. Design of optical window thickness and influence of its deformation on multi-spectral camera's optical performance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0422007. (in Chinese)
- [7] Zhu Feng, Zhang Yu, Ji Wenchen, et al. Optimization design of infrared tube wall thickness based on ANSYS [J]. *Value Engineering*, 2017, 36(14): 85-88. (in Chinese)
- [8] Liu Ming, Zhang Guoyu, Geng Shubin, et al. Opto-mechanical structure design and thermal optical analysis on zoom lenses of optical-electronic platform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0812003. (in Chinese)
- [9] Feng Jie, Bai Yu, Xing Tingwen, et al. Fitting accuracy of wavefront using Zernike polynomials [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, 26(2): 31-34. (in Chinese)
- [10] Ye Jingfei, Gao Zhishan, Liu Xiaoli, et al. Freeform surfaces reconstruction based on Zernike polynomials and radial basis function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0822003. (in Chinese)
- [11] Wu Tianqi, Xu Xiping, Pan Yue, et al. Opto-mechanical structure design and thermal optical analysis on LWIR projection lenses [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2018, 41(4): 64-67. (in Chinese)
- [12] Yan Jingzhou, Lei Fan, Zhou Bifang, et al. Algorithms for wavefront fitting using Zernike polynomial [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(5): 119-128. (in Chinese)
- [13] Cheng Zhifeng, Liu Fuhe, Xun Xianchao. Opto-mechanical design and analysis of dual-band sharing aperture imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3366-3372. (in Chinese)