

引用格式:吴斌,王谭,张卫国,等.耦合场作用下光机系统成像质量分析研究[J].电光与控制,2018,25(9):71-74,92. WU B, WANG T, ZHANG W G, et al. Imaging quality analysis of an opto-mechanical system under coupled fields[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(9):71-74, 92.

耦合场作用下光机系统成像质量分析研究

吴斌¹, 王谭², 张卫国², 袁屹杰², 郭冰涛²

(1.海装西安局,西安 710068; 2.西安应用光学研究所,西安 710065)

摘要:精确的光机分析是实现系统优化设计的前提。针对耦合场作用导致光机系统中光学元件面形发生非回转对称的变化,提出了Zernike拟合的三维接口模型,以提高光机分析数据转换精度,实现耦合场作用下光机系统的高精密分析。对某光机系统进行重力和温度场耦合集成分析,提取各光学面形变化的非对称分布,并借助该三维接口模型在光学设计平台中对系统成像质量进行分析,用于后期系统优化设计。结果表明该接口模型可应用于实际多场作用下的光机系统分析。

关键词:光机系统; 成像质量; 耦合场; Zernike拟合; 有限元分析

中图分类号: TN20 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.09.015

Imaging Quality Analysis of an Opto-Mechanical System Under Coupled Fields

WU Bin¹, WANG Tan², ZHANG Wei-guo², YUAN Yi-jie², GUO Bing-tao²

(1. Military Representative Bureau of Navy in Xi'an, Xi'an 710068, China;

2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The precise opto-mechanical analysis plays a key role in optimization design of the system. In actual conditions, the optical components of opto-mechanical system may have asymmetric changes due to the effect of coupled fields. To solve the problem, a 3D interface model based on Zernike polynomials fitting was built to improve the data transferring precision of opto-mechanical analysis. Thus the high-precision analysis under coupled fields was realized. To make an optimization design of a certain opto-mechanical system, we made an integrated analysis of the gravity field and the temperature field, extracted the asymmetric distribution of optical surface changes, and made an analysis to the imaging quality of the system by using the 3D interface model. The results indicate that the interface model can be used in the actual condition of coupled fields for opto-mechanical analysis.

Key words: opto-mechanical system; imaging quality; coupled field; Zernike polynomials fitting; finite element analysis

0 引言

随着光机系统的广泛应用,其使用环境也变得更加苛刻,驱使其生产制造的指标不断增多且日益严格,例如,重力、温度变化、冲击力和振动等因素所影响的指标,这些因素给光机结构集成分析^[1-4]带来了巨大的挑战。

光机集成分析的一般过程可分为3步^[2]:首先,基

于系统的结构分析,获得光学元件的变化;然后,将结构变化数据转换为光学分析能够识别的数据形式;最后,通过光学手段分析系统的成像质量变化。为实现光机的结构形变分析,文献[5-6]基于CODE V热分析和有限元的方法,获得了光学成像元件在温度载荷作用下表面的曲率变化;进一步,为了将机械形变量转化为光学能够识别的数据并分析,文献[7-10]基于回转对称的二维模型实现了面形变化的Zernike拟合,并成功地应用于光学设计平台CODE V和Zemax软件中进行分析。然而,在实际使用过程中,系统处于多物理场集成作用下,因此结构变化形式不仅局限于相对于光轴的回转对称分布,而且在三维方向上也存在矢

收稿日期:2017-10-13

修回日期:2018-07-31

基金项目:国家自然科学基金青年基金(61705181)

作者简介:吴斌(1980—),男,陕西西安人,学士,研究方向为光电产品设计与质量研究。

量形变,因此需要对模型进一步修正。

本文基于耦合场作用下光机结构的变化,对成像质量进行分析。首先对某光机系统多场耦合作用下结构变化进行仿真分析;其次,结合耦合场作用下非对称的形变量,提出了基于 Zernike 拟合的三维接口模型;最后,借助于该三维接口模型,根据实际系统变量分析了在多场耦合作用下系统成像质量的变化,并基于 Zernike 分析及 CODE V 光学平台对成像质量进行评价。

1 多场耦合作用下系统结构形变分析

某光学系统中的部分组成结构如图 1a 所示,其安装结构形式的支撑基面及重力方向如图 1b 所示。

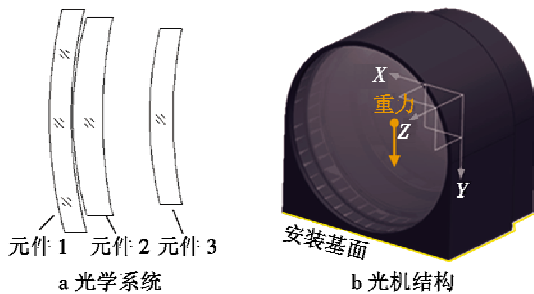


图1 某光学系统及其光机结构

Fig. 1 Optical system and its opto-mechanical structure

结构由3片式球面光学玻璃材料组成,元件1和元件3材料为微晶材料,元件2为石英材料,具体材料参数以及结构参数如表1所示。

表1 光学系统结构参数

Table 1 The structure parameters of the optical system

元件编号	表面类型	球面半径/mm	中心距/mm	材料	口径/mm
1	球面	285.4749	14	微晶玻璃	136
		281.6951	1		
2	球面	228.4855	19	石英玻璃	126
		308.4592	30		
3	球面	239.1151	15	微晶玻璃	112
		282.2977	40		

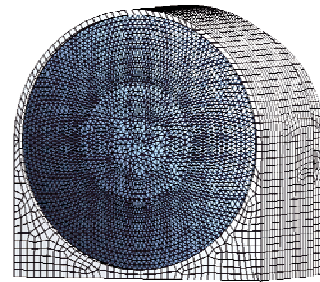
系统中,上述3片光学元件单独固定使用,因此需要提供适合的固定支撑部件。实际中采取图1b所示安装结构形式对光学组件进行支撑固定。光学元件使用了低线胀系数的石英玻璃($0.58 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)和微晶玻璃($0.05 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),支撑材料选取钛合金材料支架,具体材料属性见表2结构。

表2 材料属性

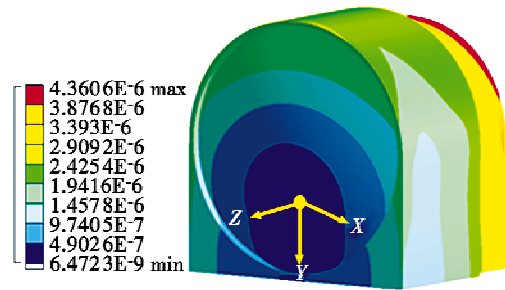
Table 2 Material property

材料	杨氏模量 E/GPa	泊松比 ν	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{mm}^{-3})$	导热率 $k/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	线胀系数 $\alpha/(\text{10}^{-6} \cdot (^{\circ}\text{C})^{-1})$
微晶玻璃	90.6	0.25	2.53	1.64	0.05
石英玻璃	73	0.17	2.205	1.37	0.58
钛合金	114	0.3	4.43	7.4	9.1

网格大小和形状划分将影响分析时的正确性、高效性以及经济性。由于各镜片的光学面形要求比较高,且设置要求高,因此对光学镜片的网格划分最大尺寸为3 mm,而用于支撑的钛合金结构设置网格的最大尺寸为4 mm。最终划分网格结果如图2a所示,其中,节点数为410 617,体单元数为245 040。



a 光机系统分网结构



b 有限元仿真总形变

图2 光机系统分网结构及有限元仿真总形变

Fig. 2 Meshing of the opto-mechanical structure

model and the deformation by FEM

上述系统结构实际约束条件来自于底部的支撑,考虑到安装基面也存在由于温度载荷的影响而导致的各向同性的膨胀,因此对底面的Y轴向进行有效约束,同时限制其各向旋转自由度。重力为Y轴向的 mg (m 为系统质量, g 为重力加速度 9.8 N/kg),温度载荷为 30°C (初始温度为 22°C)。结合有限元方法,最终的仿真如图2b所示。结果显示,在重力及温度载荷的作用下,光机系统材料属性的差异以及结构形状限制,使系统结构总体发生了拱形的非均匀形变,在靠近元件1前表面的下侧形变量最小,而在系统的Z轴向最小端的上侧形变量最大。

细化各光学表面的形变结果,见图3(面1和面2为元件1的前后表面,面3和面4为元件2的前后表面,面5和面6为元件3的前后表面)。由温度载荷的作用,系统基于元件1的前表面发生膨胀,从表面1(元件1的前表面)依次到表面6(元件3的后表面)的形变量逐渐增大。另外,由于重力和结构支撑的不对称分布,导致表面的形状变化不再发生相对于Z轴向的旋转对称分部,且这种不对称性随口径的增大而增加(对比元件1和元件3)。

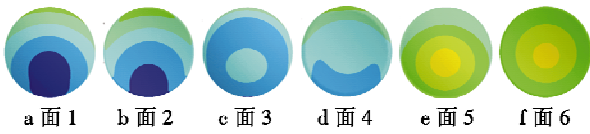


图3 光学元件组各面总形变云图

Fig.3 The distribution of deformation for each surface of lens

2 基于 Zernike 拟合的三维接口模型

光学元件面形变化将直接导致系统成像质量的变化,因此需要借助有效的方法对变形数据量进行处理以满足光学分析的需求。采用数据接口^[7-8]能够直接将因耦合作用导致的面形变化数据转化为光学设计软件(例如 CODE V 和 Zemax)能够识别的形式,此过程中需要进行面形变化数据的提取和基于 Zernike 的面形拟合。

光学设计与分析平台能够识别的面形变化有两种形式:基于矢量高度(Sag Based)的形变和基于表面法向(Surfacenormal Based)的形变,如图4所示。图4a为基于矢量高度的形变,表示面形变化前后相对于初始表面在平行于光轴方向的位移;图4b为基于表面法向的形变,表示初始表面在其法向方向的形变位移。下文采用基于矢量高度形变的方式进行研究。

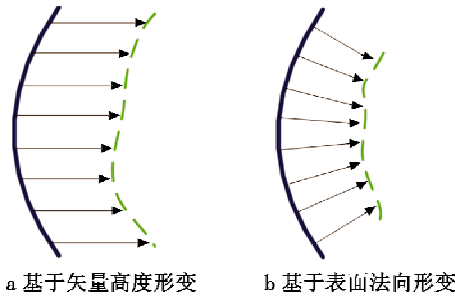


图4 光学两种面形变化表述方式

Fig.4 The two models of optical surface deformation

在耦合场的作用下,面形变化的位移不仅在光轴 Z 轴向存在分量 dz,而且在垂直于光轴的两个正交方向也存在分量,即 dx 和 dy;因此对于面形的变化提取不能局限于在二维剖平面进行^[7-8],需要拓展到三维平面内,见图5a。

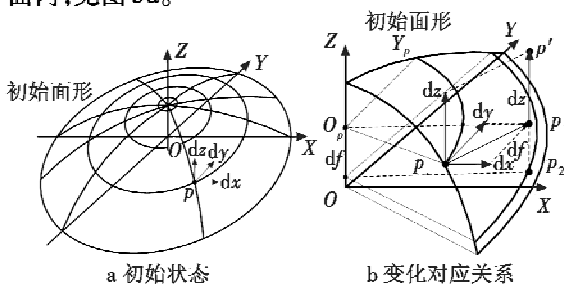


图5 基于矢量高度形变位移模型

Fig.5 The model with sagittal deformation

对于表面上的任意一点 $p(x_p, y_p, z_p)$,由于耦合场的作用发生位移,移动矢量为 (dx, dy, dz) ,最终位置为 p' 点。若沿 Z 轴向提取基于矢量高度的形变时,形变量不再为 pp' ,而是 p' 沿 Z 轴向到初始表面的等效距离 $p'p_2$,如图5b所示。这部分距离是由两部分组成:一部分为实际变化沿 Z 轴向的投影距离,可由结构分析仿真获得;另一部分是面形上 p_2 点与 p 点在 Z 轴向上的矢量高度差,可由面形分布形式获得。

在垂直于光轴且过 p 点的截面内,由于 dx 和 dy 的影响, p 点将变化到 p_1 点的位置,即

$$\vec{O_p p} + \vec{pp_1} = \vec{O_p p_1} \quad (1)$$

则有

$$\vec{O_p p} = (p_x, p_y) \quad (2)$$

由于 $\vec{pp_1} = (dx, dy)$,即可获得

$$|\vec{O_p p_1}| = \sqrt{(p_x + dx)^2 + (p_y + dy)^2} \quad (3)$$

根据一般面形的数学表达方式^[10],即

$$f(x, y) = \frac{c \cdot (x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1 + k) \cdot c^2 \cdot (x^2 + y^2)}} + \sum_{j=1}^{66} C_{j+1} Z_j \quad (4)$$

式中: c 为表面的顶点曲率半径的倒数; k 为二次项曲面系数; Z_j 为第 j 阶的 Zernike 项; C_{j+1} 为对应项的 Zernike 多项式系数。因此, $p_1 p_2$ 的距离 df 表示为

$$df = f(p) - f(p_2) \quad (5)$$

因此,可获得变化后面形相对于形变前沿光轴的等效移动距离,在 $p_2(x_{p_2}, y_{p_2})$ 点的等效位移距离为

$$p'p_2 = p'p_1 + p_1 p_2 = dz + df \quad (6)$$

根据仿真结果,依次计算所有移动节点对应位置的等效移动距离,即可求出形变后面形分布形式。

Zernike 多项式是互为正交、线性不相关的,其每一项均有固定的物理意义,分别对应于某种像差项,与赛德尔像差系数很容易建立起联系,其极坐标表达式为^[11]

$$W(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^k \sum_{m=0}^n A_{nm} U_{nm} = \sum_{n=0}^k \sum_{m=0}^n A_{nm} R_n^{n-2m}(\rho) \begin{cases} \sin(n-2m)\theta \\ \cos(n-2m)\theta \end{cases} \quad (7)$$

$$R_n^{n-2m}(\rho) = \sum_{s=0}^m (-1)^s \frac{(n-s)!}{s!(m-s)!(n-m-s)!} \rho^{n-2s} \quad (8)$$

式中: A_{nm} 为 Zernike 系数; $R_n^{n-2m}(\rho)$ 为径向多项式。基于光轴方向的变化量,结合最小二乘方法,即可通过式(7)和式(8)获得 Zernike 多项式对应的系数 A_{nm} ,用于光学软件(如 CODE V 光学仿真平台)的评价。

CODE V 光学仿真平台中对光学面形的一种表述方式为

$$Z = \frac{c \cdot r^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K) \cdot c^2 \cdot r^2}} + \sum_{j=1}^n C_{j+1} U_j \quad (9)$$

式中: Z 为曲面沿光轴方向的矢量高度; c 为曲面的曲率半径的倒数; K 为锥度系数; U_j 为 j 项 Zernike 多项式(U_j 与式(7)中 U_{nm} 一一对应); C_{j+1} 为 Zernike 多项式系数。因此受耦合场作用后, 最终的形变面形方程可表示为

$$Z = \frac{c \cdot r^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K) \cdot c^2 \cdot r^2}} + \sum_{j=1}^n (C_{j+1} + A_{nm}) U_j \quad (10)$$

据此, 能够在 CODE V 光学仿真平台中获取形变后的面形分布, 实现系统光学质量评价。

3 多场耦合作用面形仿真分析

依据有限元分析结果(图3), 提取各面形的 X 轴向、 Y 轴向和 Z 轴向的形变分量, 通过式(8)所述的理论模型, 获得每个面形变量的前 36 阶 Zernike 系数, 并计算出耦合场作用下光学面形的非均匀形变量。对面形变化在三维空间进行拟合, 获得的结果如图6所示。图6a为回转对称的初始表面形貌, 从上至下沿光轴分布。在温度载荷及重力作用下, 系统发生形变, 图6b为结构中光学元件面形变化量的 Zernike 分布。由于耦合场、几何形状分布及边界条件的综合作用, 系统面形的分布呈不对称分布。

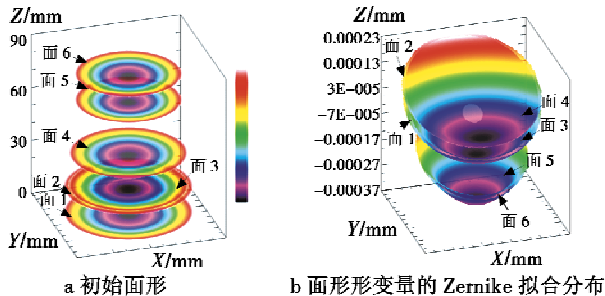


图6 基于 Zernike 拟合的面形变化

Fig. 6 The surface distribution by Zernike polynomials fitting

提取各面形的分布形式如图7所示。

表3为各面形变化后的 Zernike 拟合分布, 根据拟合结果表明: 在耦合场的作用下, 系统表面发生了非回转对称分布的形变, 且随着面编号的增大, 系统面形变化的均方根(RMS)越大(面6变化 71 nm)。另外, 在耦合场的作用下, 系统光学元件不仅产生了离焦和平移现象, 而且还表现出较为明显的倾斜。

表3 变化后面形 Zernike 拟合分布

Table 3 The distribution of Zernike polynomials fitting nm

面编号	1	2	3	4	5	6
RMS	63.24	62.68	69.59	62.00	70.38	71.00

依托于式(10)所述三维接口模型, 将数据转换为 CODE V 识别的数据, 并对载荷作用下的系统进行光

学性能分析, 以光学传递函数作为评价指标, 分析结果见图8。图8a为施加载荷前整个系统的 MTF 曲线; 图8b为给研究部分施加载荷后整个系统 MTF 曲线。结果表明, 由于温度载荷和重力载荷的综合作用, 导致光学系统成像质量变差, 致使成像恶化; 在耦合场的作用下, 频率为 14 cycle/mm 时, MTF 由 57% 降低至 15% 以下, 严重影响光学系统的成像质量。

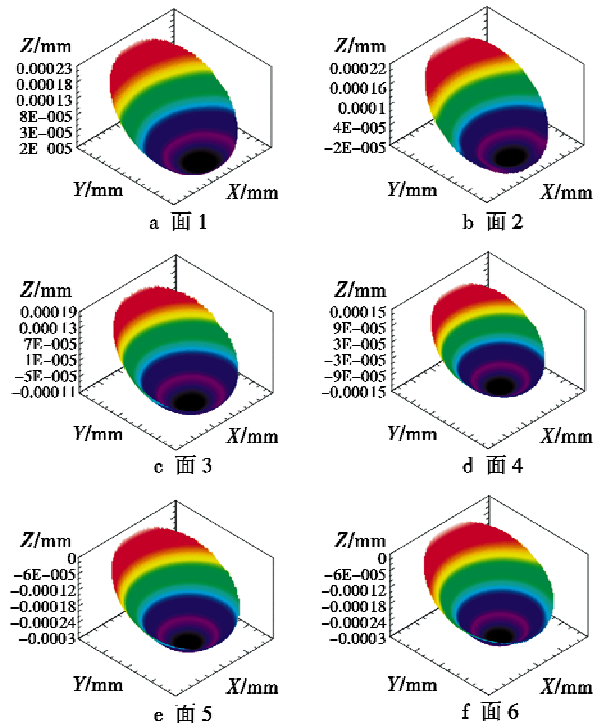


图7 光学元件组各面形变

Fig. 7 The distribution of deformation of each surface

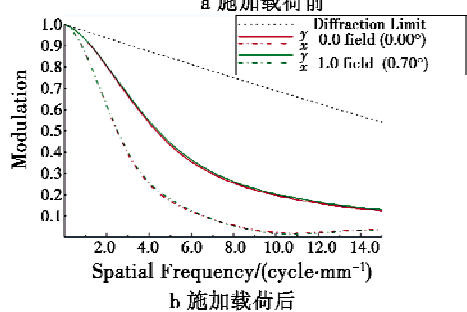
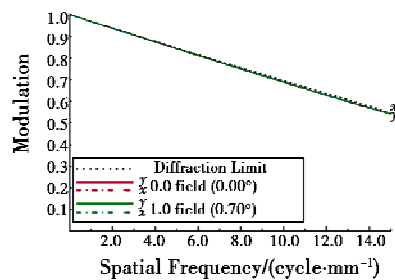


图8 基于 CODE V 软件平台的 MTF 系统分析

Fig. 8 The analysis result of MTF by CODE V

(下转第 92 页)

- [5] 张金槐. 多元正态总体分布参数的 Bayes 序贯后加权检验及估计[J]. 飞行器测控学报, 2002, 21(4): 65-69.
- [6] 黄寒砚, 王正明. 成败型试验的 Bayes 序贯网图检验法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(12): 2429-2433.
- [7] 刘琦, 冯文哲, 王囡. Bayes 序贯试验方法中风险的选择与计算[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(1): 223-229.
- [8] ZIELIŃSKI R. Sequential methods in statistics[M]. London: Chapman and Hall, 1986.
- [9] 王正明, 卢芳云, 段晓君. 导弹试验的设计与评估[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [10] 国防科学技术工业委员会. GJB2899-1997 飞航导弹飞行试验精度分析和命中精度评定方法[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 1997.
- [11] 国防科学技术工业委员会. GJB6289-2008 地地弹道式导弹命中精度评定方法[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2008.
- [12] 张宗梅, 宋维军, 李双喜, 等. 一种融合验前信息的特小子样精度评估方法[J]. 航天控制, 2011, 29(6): 49-53.
- [13] 赵喜春. 导弹命中精度综合鉴定方法研究[J]. 现代防御技术, 2008, 36(3): 27-30.
- [14] ORHAN U, ERDOGMUS D, ROARK B, et al. Improved accuracy using recursive Bayesian estimation based language model fusion in ERP-based BCI typing systems [C]//Engineering in Medicine and Biology Society, IEEE, 2012: 2497.
- [15] 唐雪梅, 蔡洪, 杨华波, 等. 导弹武器精度分析与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [16] 郭齐胜, 罗小明, 潘高田. 武器装备试验理论与检验方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [17] XING Y Y, JIANG P, CHENG Z J. The determination method on products sample size under the condition of Bayesian sequential testing[C]//International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEE, 2016. doi:10.1109/IEEM.2016.7798154.
- [18] 申绪润, 戚宗锋, 汪连栋, 等. 正态分布未知参数的联合序贯后加权检验方法[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(6): 744-746, 805.
- [19] 刘云南. Bayes 递推估计法在导弹落点精度和密集度评估中的应用[J]. 战术导弹技术, 2008(2): 9-12.
- [20] BERGMAN N. Recursive Bayesian estimation: navigation and tracking applications[D]. Linköping: Linköping University, 1999.
- [21] KÁRNÝM. Approximate Bayesian recursive estimation[J]. Information Sciences, 2014(285): 100-111.

(上接第 74 页)

4 结论

本文采用光机集成分析手段对耦合场作用下光机结构的变化进行了研究。针对系统中部分光机系统的结构, 分析了其在多场耦合作用下发生的形变, 结果表明结构中光学元件面形呈非对称状分布。据此, 提出了基于 Zernike 面形拟合的三维接口模型, 并借助于计算机编程建立了数据转化接口, 实现了从机械形变到光学设计平台的有效转换。借助于此接口, 对光机系统光学元件面形的变化进行转换。分析结果表明耦合场的作用下, 系统面形分布不仅存在明显的离焦和平移, 而且包含有较大的倾斜, 在光学设计平台 CODE V 中对系统最终成像质量进行评价, 由于热载荷和重力载荷作用, 使光学元件的面形发生变化, 导致光学系统的 MTF 发生恶化, 成像质量下降。以此为依据, 能够实现对于光机系统具有针对性的优化设计。

参 考 文 献

- [1] JAMIESON T H. Athermalization of optical instruments from the optomechanical viewpoint [J]. Proceeding of SPIE, 1992 (10265): 131-159.
- [2] 冯树龙. 地基望远镜力学、温度场特性对光学性能影响研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
- [3] 韩冰, 武雁熊, 陈晓苹, 等. 激光及可见光双模导引头结构设计[J]. 发光学报, 2014, 35(11): 1382-1387.
- [4] 焦明印. 光学系统实现热补偿的通用条件[J]. 应用光学, 2006, 27(3): 195-197.
- [5] 岑兆丰, 李晓彤. 红外成像系统无热化设计[J]. 航空科学技术, 2009(5): 32-36.
- [6] REITMAYER F, SCHROEDER H. Effect of temperature gradients on the wave aberration in athermal optical glasses [J]. Applied Optics, 1975, 14(3): 5-16.
- [7] 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: 自然科学版, 2007, 27(5): 427-431.
- [8] 杨恽, 张伟, 陈时锦. 光机热集成分析中数据转换接口的研究[J]. 宇航学报, 2005, 26(2): 201-205.
- [9] CORONATO P A, JUERGENS R C. Transferring FEA results to optics codes with Zernike: a review of techniques [J]. Proceeding of SPIE, 2003(5176): 128-136.
- [10] 罗传伟. 基于有限元分析的热光学仿真与计算方法[D]. 西安: 应用光学研究所, 2007.
- [11] 徐荣伟, 刘立人, 刘宏展, 等. 大型干涉仪镜子的支承设计与温度变形分析[J]. 光学学报, 2005, 25(6): 809-815.