

文章编号: 1002-2082 (2020) 02-0270-06

机载相机非球面光学系统热光学特性分析

姜东旭¹, 孙宝玉¹, 李迎春¹, 林洁琼¹, 王冬雪¹, 王文攀²

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

摘要: 环境温度是影响非球面光学系统成像质量的主要因素之一, 采用热光学特性分析方法, 对某机载相机非球面光学系统进行热光学特性分析, 通过有限元法分析相机光学系统结构热变形, 并去除镜面表面刚体位移, 将面型数据输入光学软件程序进行 Zernike 多项式拟合, 将拟合结果导入光学设计软件中, 对非球面光学系统成像进行性能评价。分析结果表明: 热光学特性分析方法可以有效地对非球面光学系统的实际工作环境进行仿真, 预测环境温度对光学系统成像质量的影响, 对光学系统设计具有指导意义。

关键词: 非球面光学系统; 热光学特性分析; 刚体位移; Zernike 多项式

中图分类号: TN206; TH744

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0201006

Analysis of thermal optical properties of airborne camera aspheric optical system

JIANG Dongxu¹, SUN Baoyu¹, LI Yingchun¹, LIN Jieqiong¹, WANG Dongxue¹, WANG Wenpan²

(1. Changchun University of Technology, Changchun 130012, China; 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Ambient temperature is one of the main factors affecting the imaging quality of aspheric optical systems. The analysis method of thermal optical properties was used to analyze the thermal optical properties of an airborne camera aspheric optical system. The finite element method was used to analyze the thermal deformation of the camera optical system structure, and the rigid body displacement of the mirror surface was removed. The surface data was input into the optical software program for Zernike polynomial fitting, and the fitting results were imported into the optical design software to evaluate the imaging performance of aspheric optical system. The results show that the analysis method of thermal optical properties can effectively simulate the practical working environment of the aspheric optical system, and predict the influence of ambient temperature on the imaging quality of optical system, which have guiding significance for the optical system design.

Key words: aspheric optical system; thermal optical property analysis; rigid body displacement; Zernike polynomial

引言

随着光学系统设计技术的发展, 纯球面系统已经不能满足使用需求, 因此采用非球面光学系统已经成为光学设计发展的主要趋势^[1-3]。机载相机是现代化空间数据获取的重要手段之一, 因为其拍摄视野广, 拍摄距离远, 适应性强等优点被广泛

应用于工农业和军事领域。机载相机与非球面光学系统的结合不仅可以增强相机适用性, 在一定程度上还可以降低光学系统设计的复杂程度。机载相机工作过程中, 实际环境的温度以及相机的机械结构都会对光学系统产生不可忽略的影响。因此, 对于实际工作环境下的光学系统, 分

收稿日期: 2019-06-24; 修回日期: 2019-09-05

基金项目: 科技部国家重点研发计划项目 (2016YFE0105100)

作者简介: 姜东旭 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事光机系统仿真方面的研究。E-mail: jiangdx0322@163.com

通信作者: 孙宝玉 (1971-), 女, 博士, 教授, 主要从事机械 CAD/CAE, 精密机械微驱动方面的研究。E-mail: wdsby1@163.com

析其温度场以及机械结构应力分布规律对成像质量的影响, 可以更加有效地提高光学系统的成像性能。

光学系统实际工作环境对成像质量的影响因素主要包括相机机械结构变形导致光学元件相对位置和镜面面型的变化, 温度热环境所产生的热应力引起的光学元件面型的变化, 工作环境温度变化对于镜片材料光学特性的影响。本文运用热光学特性分析方法, 利用有限元软件对光学系统机械结构进行分析, 得到不同温度场下的变形量, 以求得温度场下的应力和系统整体形变量。将有限元软件所输出的数据进行数据处理, 最终生成光学软件可以读取识别的参数, 通过光学设计软件可以评价不同温度场光学系统的成像性能^[4-6]。

1 热光学特性分析理论基础

1.1 刚体位移

对于温度场的光机系统, 机械结构和光学元件都会产生一定的变形, 由于光学元件受到机械结构的影响, 光学元件产生整体位移^[7-9], 即称之为光学元件的刚体位移, 包括偏移, 偏心和倾斜, 光学元件变形形式如图 1 所示。

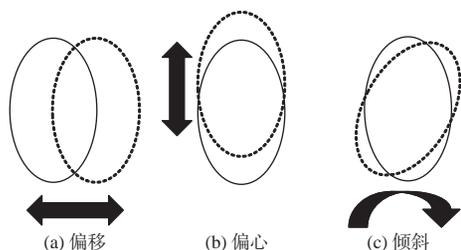


图 1 刚体位移示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rigid body displacement

在空间变换理论中, 利用齐次坐标变换对光学元件镜面的刚体位移进行求解。在笛卡尔坐标系中, 光学元件可以用 6 个方向的自由度进行表示, e, f, g 分别表示 x, y, z 轴平移量, $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 分别表示 x, y, z 轴偏转量, $(x_i, y_i, z_i) (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示光学元件未发生变形之前的原始坐标, n 为节点坐标的节点号, $(x'_i, y'_i, z'_i) (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示光学元件变形之后的节点坐标, $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ 分别表示镜面变形前后节点位移变化量。由文献 [7] 可得目标函数:

$$Q = \sum_{i=0}^n \left[\left(x'_i - x_i + \theta_x y_i - \theta_y z_i - e \right)^2 + \left(y_i - y'_i - \theta_z x_i + \theta_x z_i - f \right)^2 + \left(z'_i - z_i + \theta_y x_i - \theta_x y_i - g \right)^2 \right] \quad (1)$$

通过求解 Q 的极值即可求得刚体位移, 令:

$$\frac{\partial Q}{\partial e} = \frac{\partial Q}{\partial f} = \frac{\partial Q}{\partial g} = \frac{\partial Q}{\partial \theta_x} = \frac{\partial Q}{\partial \theta_y} = \frac{\partial Q}{\partial \theta_z} = 0 \quad (2)$$

通过温度场下光学元件的镜面热变形前后的节点坐标, 即可求得该透镜的表面刚体位移。

1.2 Zernike 多项式

Zernike 多项式^[10-13]在单位圆域内具有正交性、线性无关性, 且是能够归一化地、唯一地描述系统圆形孔径波前畸变的函数, 可以将其分为标准 Zernike (ZRN) 多项式和 Fringe Zernike (ZFR) 多项式两类, 前者包含后者。一般 Zernike 多项式通常采用极坐标形式, 可以用下式表示:

$$Z(\rho, \theta) = \sum_i^n A_i Z_i(\rho, \theta) \quad (3)$$

式中: A_i 为多项式系数; ρ 为归一化半径; θ 为角度; n 为多项式阶数。

通过 Zernike 多项式的线性组合可以表达各种类型的镜面面形。面型数据去除刚体位移之后, 对镜面面型进行拟合, 光学设计者常用 Seidel 像差函数^[14-15]对所设计的光学系统像差进行描述, Zernike 多项式与初级像差具有一定对应关系。本文选择 Fringe Zernike (ZFR) 多项式, 表 1 给出了前 6 项 Fringe Zernike 多项式系数与 Seidel 像差之间的对应关系。

表 1 Fringe Zernike 多项式系数与 Seidel 像差之间的关系
Table 1 Relationship between Fringe Zernike polynomial coefficient and Seidel aberration

No.	n	Polynomial	Name
1	0	1	Piston
2	1	$\rho \cos(\theta)$	A-Tilt
3	1	$\rho \sin(\theta)$	B-Tilt
4	2	$2\rho^2 - 1$	Focus
5	2	$\rho^2 \cos(2\theta)$	Pri Astigmatism-A
6	2	$\rho^2 \sin(2\theta)$	Pri Astigmatism-B

2 机载相机非球面光学系统热光学特性分析

2.1 非球面相机结构与建模

本文所研究的某机载相机光学系统设计原理如图 2 所示。光学系统的基本参数包括焦距 $f' = 80$ mm, 视场角: $H \times V = 28^\circ \times 28^\circ$, 工作波段为可见光, 探测器像元尺寸 $5.5 \mu\text{m}$, 工作环境为 $-40^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 。

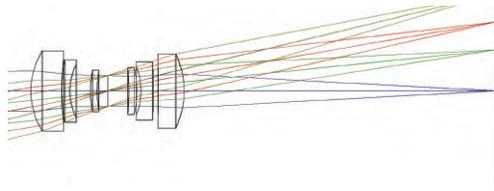


图2 光学系统光路图

Fig. 2 Optical path diagram of optical system

结构三维模型图如图3所示。主要由光学系统、镜筒、镜筒支座、基座和 CCD 等部件组成,各部件通过螺钉连接,以保证整体结构具有足够的刚性。

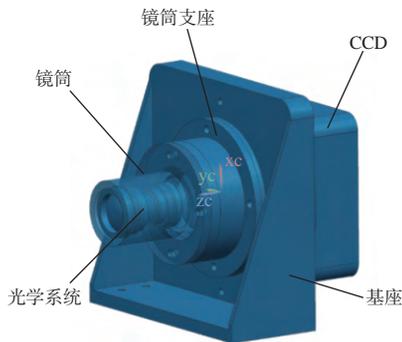


图3 光学系统结构三维图

Fig. 3 3D diagram of optical system structure

本文所研究的相机光学系统为非球面光学系统,由6片透镜组成,其中第2片镜片的第2面为非球面,在一定程度上可以减轻光学系统的质量。本文将针对光学镜头建立有限元模型,如图4所示,镜头有限元模型共有48 720个六面体网格单元,图4即为利用有限元软件建立的镜头有限元模型剖视图。

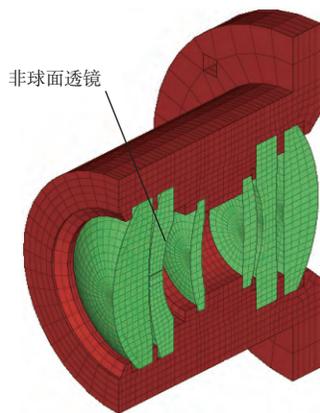


图4 镜头有限元模型

Fig. 4 Lens finite element model

2.2 热光学特性分析流程

机载相机热光学特性分析流程如图5所示。首先进行光学系统设计,然后对相机进行结构设计、有限元建模、不同温度场下镜头热分析。温度会使透镜产生热弹性变形和折射率变化,本文只考虑热弹性变形,将各透镜的折射率看作一个常数,所以提取每个镜片的镜面变形数据,去除其刚体位移,之后导入所编写的接口程序 Zernike 多项式系数进行拟合,将拟合的结果导入光学设计软件中,对温度场下镜面变形对机载相机光学系统成像质量的影响进行评价。

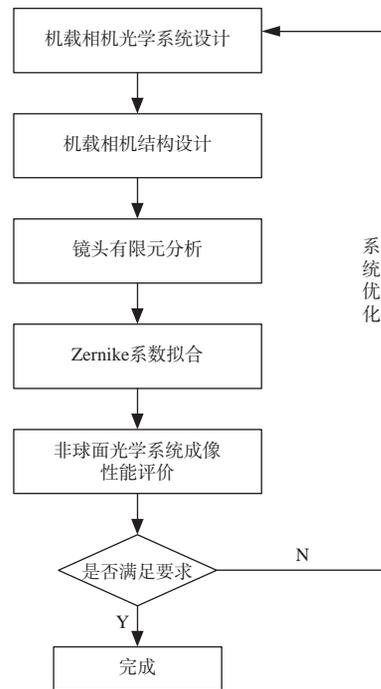


图5 热光学特性分析流程图

Fig. 5 Flow chart of thermal optical property analysis

2.3 仿真结果分析

在 20 ℃ 温度工况下光学系统结构镜面变形云图如图6所示,通过 Zernike 拟合程序拟合出 Zernike 系数导入光学设计软件。图7为光学系统的 MTF 的设计值。图8为光学系统 MTF 拟合值。该非球面光学系统的截止频率为 91 lp/mm,以全视场为例,MTF 设计值为 0.328 8, MTF 拟合值为 0.328 9,两者之间相差不足 1%,满足工程应用的误差要求,验证了热光学特性分析方法的可行性。

对于光学系统所做的不同温度场下非球面光学系统成像质量的影响分析,需要对非球面光学系统结构设定不同的温度工况(-40 ℃ 和 50 ℃),

由于篇幅所限, 表 2 给出了 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 第 1 面球面和第 4 面非球面的刚体位移, 表 3 和表 4 分别给出了 2 个镜面变形的 37 项 Zernike 系数。

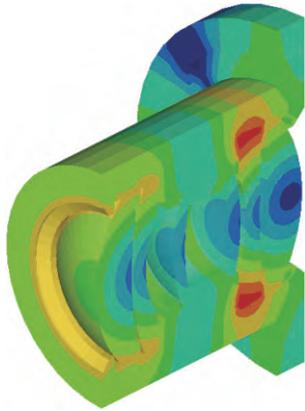


图 6 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 光学系统结构变形分析云图

Fig. 6 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ optical system structural deformation analysis cloud map

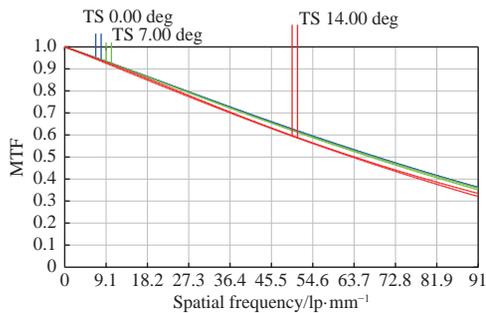


图 7 光学系统 MTF 设计值

Fig. 7 Design value of optical system MTF

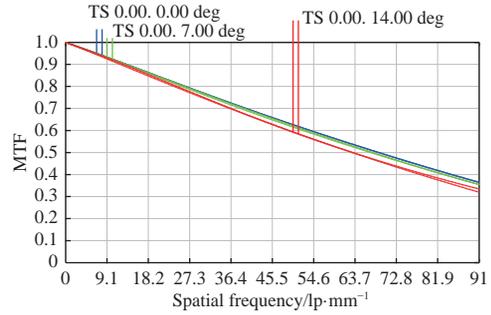


图 8 光学系统 MTF 拟合值($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 8 Fitted value of optical system MTF ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

表 2 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 球面和非球面的刚体位移

Table 2 Rigid body displacement of pherical and aspheric surface at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ mm

	θ_x	θ_y	θ_z	e	f	g
球面	$-1.85\text{E}-08$	$2.14\text{E}-08$	$2.02\text{E}-06$	$-5.85\text{E}-08$	$-1.05\text{E}-07$	$2.73\text{E}-3$
非球面	$1.04\text{E}-08$	$1.06\text{E}-08$	$1.03\text{E}-06$	$-5.37\text{E}-10$	$-2.79\text{E}-10$	$9.19\text{E}-4$

图 9 为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度场的光学系统 MTF, 在全视场空间频率为 91 lp/mm 处, MTF 值为 0.317 , 相比设计值下降了 3% 。图 10 为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度场的光学系统 MTF 拟合值, 在全视场频率为 91 lp/mm 处 MTF 值为 0.312 , 与设计值比较下降了 5% , 虽然满足在工作频段 MTF 值大于 0.3 的要求, 但是无论温度升高或者降低都会降低非球面光学系统的成像质量, 且本文设计的光学系统对于高温环境更加敏感。本文介绍的热光学特性分析方法可以有效对不同温度场下非球面光学系统的成像质量进行评价, 在光学系统设计阶段, 可以有效地预测温度对光学系统成像质量的影响, 对于光学设计具有指导意义。

表 3 球面的 Zernike 系数($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Table 3 Zernike coefficient of spherical surface ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

No.	Coefficient	No.	Coefficient	No.	Coefficient	No.	Coefficient
1	$-1.95\text{E}-4$	11	$-5.57\text{E}-10$	21	$1.72\text{E}-12$	31	$3.94\text{E}-10$
2	$1.28\text{E}-07$	12	$1.43\text{E}-11$	22	$4.83\text{E}-12$	32	$-1.81\text{E}-11$
3	$2.99\text{E}-07$	13	$-1.26\text{E}-11$	23	$-1.04\text{E}-09$	33	$2.14\text{E}-11$
4	$-8.19\text{E}-4$	14	$1.44\text{E}-09$	24	$-7.64\text{E}-10$	34	$-1.50\text{E}-09$
5	$1.12\text{E}-11$	15	$3.75\text{E}-09$	25	$-3.96\text{E}-07$	35	$-1.53\text{E}-09$
6	$-2.12\text{E}-11$	16	$-3.42\text{E}-06$	26	$1.00\text{E}-09$	36	$-4.19\text{E}-08$
7	$1.31\text{E}-08$	17	$2.54\text{E}-09$	27	$1.00\text{E}-09$	37	$3.79\text{E}-08$
8	$3.03\text{E}-08$	18	$-2.42\text{E}-11$	28	$-5.00\text{E}-10$		
9	$-3.94\text{E}-05$	19	$1.72\text{E}-11$	29	$1.35\text{E}-12$		
10	$5.83\text{E}-10$	20	$-3.50\text{E}-11$	30	$-3.81\text{E}-10$		

表4 非球面的 Zernike 系数(-40 ℃)

Table 4 Zernike coefficient of aspheric surface (-40 ℃)

No.	Coefficient	No.	Coefficient	No.	Coefficient	No.	Coefficient
1	-7.92E-05	11	2.75E-11	21	-5.34E-11	31	8.35E-11
2	-1.63E-08	12	7.74E-11	22	-3.31E-12	32	-6.16E-11
3	1.56E-08	13	3.50E-11	23	-2.03E-12	33	-2.69E-11
4	-3.931 7E-4	14	-1.81E-10	24	-3.54E-11	34	6.15E-11
5	7.94E-11	15	2.92E-12	25	-4.01E-08	35	-5.20E-11
6	4.44E-11	16	-5.16E-07	26	3.44E-12	36	6.54E-10
7	-9.10E-10	17	-1.58E-10	27	-1.56E-12	37	2.53E-08
8	8.85E-10	18	-2.30E-11	28	-3.32E-10		
9	-1.06E-05	19	4.05E-11	29	-2.30E-11		
10	-6.64E-11	20	-5.18E-11	30	-7.28E-12		

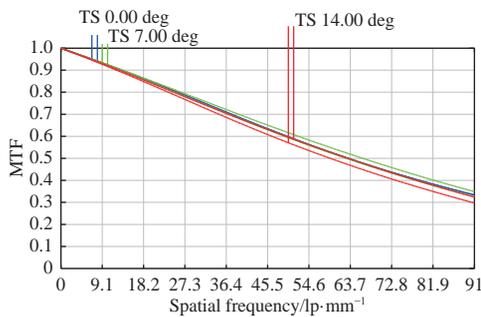


图9 光学系统 MTF 拟合值(-40 ℃)

Fig. 9 Fitted value of optical system MTF (-40 ℃)

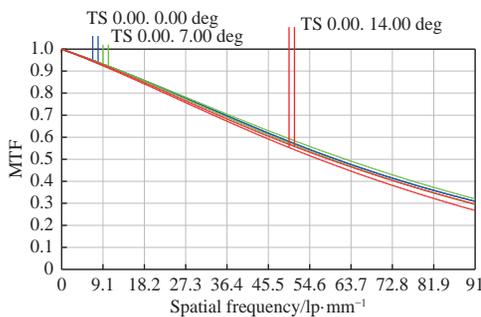


图10 光学系统 MTF 拟合值(50 ℃)

Fig. 10 Fitted value of optical system MTF (50 ℃)

3 结论

本文采用热光学特性分析方法对机载相机非球面光学系统进行分析,介绍了镜面面型的数据处理方法,利用齐次坐标变换去除了镜面变形的刚体位移,选用 Fringe Zernike 多项式作为镜面面型拟合的基底函数,并通过编程软件编写相关程序作为有限元分析与光学软件分析的接口,最后对光学系统结构建立有限元模型,分析不同温度

工况下的光学系统镜面变形,并且利用本文所提出的方法进行光学系统成像质量评价。通过不同工况下光学系统 MTF 拟合值与设计值的比较,说明环境温度的升高和降低都会影响光学系统成像质量,本文的非球面光学系统对于高温对成像质量的影响更加敏感。利用该热光学特性分析方法可以预测温度环境对光学系统成像质量的影响,从而实现光机系统热光一体化设计与分析。

参考文献:

[1] ZHANG Xinting, KANG Lei, YAO Qinghua, et al. Design of dynamic resolution detection system for CCD aerial camera[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(5): 683-686.
张欣婷, 亢磊, 姚清华, 等. CCD航空相机动态分辨率检测系统设计[J]. 应用光学, 2018, 39(5): 683-686.

[2] ZHANG Wei, CUI Enkun, HONG Yongfeng. Infrared dual-band dual-field common optical path optical system[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(2): 395-401.
张葆, 崔恩坤, 洪永丰. 红外双波段双视场共光路光学系统[J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 395-401.

[3] MROZEK F, YU M, HENRY D J. Wide fieldof view monocentric lens system for infrared aerial reconnaissance camera systems, US: 9, 329, 365[P]. 2016-5-3.

[4] LI Zekun, LYU Qunbo, LI Weiyan. Design and analysis of a thermal control focusing mechanism for space cameras[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(4): 22-28.
李泽坤, 吕群波, 李伟艳. 一种空间相机热控调焦机构的设计与分析[J]. 光子学报, 2018, 47(4): 22-28.

- [5] LAN Bin, YANG Hongbo, WU Xiaoxia, et al. Application of interface pre-processing in dynamic analysis and surface optimization of optomechanical systems[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(6): 1557-1566.
兰斌, 杨洪波, 吴小霞, 等. 接口前处理在光机系统动力学分析和面形优化中的应用[J]. 光学精密工程, 2017, 25(6): 1557-1566.
- [6] LIU Ming, ZHANG Guoyu, GENG Shubin, et al. Structural design and thermo-optical analysis of optical lens zoom lens[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 137-143.
柳鸣, 张国玉, 耿树彬, 等. 光电平台变焦镜头光机结构设计及热光学分析[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 137-143.
- [7] GONG Xiaoxue, ZHANG Lei, XUAN Ming. Micro-vibration simulation and ground experiment of optical remote sensing satellite flywheel[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(3): 312004.
龚小雪, 张雷, 宣明. 光学遥感卫星飞轮微振动仿真和地面实验研究[J]. 光子学报, 2019, 48(3): 312004.
- [8] ZHANG Ying, DING Zhenmin, ZHAO Huijie, et al. Displacement of mirror rigid body displacement in optical machine thermal integration analysis[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 47(10): 2763-2767.
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, 47(10): 2763-2767.
- [9] ZHANG Junqiang, DONG Deyi, WU Qingwen, et al. Mirror surface shape error of optical remote sensor and rigid body displacement processing method [C]//The 9th National Conference on information acquisition and processing. Beijing: China Instrument and Control Society, 2011.
张军强, 董得义, 吴清文, 等. 光学遥感器镜面面形误差及刚体位移处理方法[J]//第九届全国信息获取与处理学术会议论文集. 北京: 中国仪器仪表学会, 2011.
- [10] ZHOU Pingwei, MA Hongcai. Research on statistical method of mirror surface error[J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2016, 53(4): 110-117.
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): 110-117.
- [11] SHAN Baozhong, WANG Shuyan, NIU Hanben, et al. Zernike polynomial fitting method and its application[J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(3): 318-323.
单宝忠, 王淑岩, 牛憨笨, 等. Zernike 多项式拟合方法及应用[J]. 光学精密工程, 2002, 10(3): 318-323.
- [12] YANG Jiawen, HUANG Qiaolin, HAN Youmin. Application and simulation of Zernike polynomial in fitting optical surface profile[J]. Space Revolving and Remote Sensing, 2010, 31(5): 49-55.
杨佳文, 黄巧林, 韩友民. Zernike 多项式在拟合光学表面面形中的应用及仿真[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(5): 49-55.
- [13] XIE Sulong. Research on fitting precision and number of sampling points in Zernike polynomial fitting surface[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(6): 943-949.
谢苏隆. Zernike 多项式拟合曲面中拟合精度与采样点数目研究[J]. 应用光学, 2010, 31(6): 943-949.
- [14] TYSON R K. Conversion of Zernike aberration coefficients to Seidel and higher-order power-series aberration coefficients[J]. Optics Letters, 1982, 7(6): 262-264.
- [15] ChENG X, BRADLEY A, RAVIKUMAR S, et al. The visual impact of Zernike and Seidel forms of monochromatic aberrations[J]. Optometry and Vision Science, 2010, 87(5): 300.