

长景深阵列光学组件缺陷检测系统设计

刘钦晓¹, 王 方^{2*}, 王渊承²

¹重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 400054;

²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 介绍了神光-III 中阵列光学组件缺陷的长景深检测系统的基本组成。利用在系统光阑处进行的相位调制, 可以实现景深的延拓效果, 从而可以实现在 3~13 m 物距范围内的大景深成像探测。进一步论述了光学检测系统的设计指标、设计思想、设计结果及其仿真评价。模拟结果显示该系统可以实现 3~13 m 纵向范围内阵列光学组件缺陷的同时检测。

关键词 光学设计; 缺陷检测; 波前编码

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0322002

Design of Long Depth of Field Array Optical Components Defect Detection System

Liu Qinxiao¹, Wang Fang², Wang Yuancheng²

¹School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

²Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract This paper introduces the basic structure of a long depth of field array optical components defect detection system used in SG-III. The phase modulation used on the system aperture can realize the depth of field extension effect, which can achieve large depth of field imaging detection from 3~13 m object distance. The performance index, design ideas, design result and simulation evaluation of the optical detection system are expounded. It can achieve the defect simultaneous detection of the array optical components in longitudinal range of 3~13 m by using proposed system.

Key words optical design; defect detection; wavefront coding

OCIS codes 220.3620; 110.2970; 110.7348; 080.3620

1 引 言

神光-III 主机装置是我国在建的最大规模的高功率固体激光装置,由前端、预放大、主放大、靶场、光束控制与参数测量、计算机集中控制等 6 大系统组成^[1]。作为神光-III 的主要功能性光学部件,主放大系统中的阵列钨玻璃放大片组对表面质量有着很高要求。阵列片组表面疵病的高效检出技术是提升系统稳定性和安全性的有益补充。目前国内外对于阵列组件的检测通常有两种方式,一种是把镜片拆装后通过强照明光下人眼观测,这种方式耗时耗力,并且对系统进行的二次拆装,带来相当大的不确定性风险。第二种是系统中按装检测相机,通过成像的方式,进行缺陷探测,但由于传统镜头景深较小,无法实现大景深完全信息的获取,需要对每个镜片分别对焦成像,耗费时间,且对焦精度在暗场下并不理想。针对系统本身的特性,本文提出了一种基于波前编码技术的大视场长景深光学组件缺陷检测装置,以解决缺陷检测系统在横向上大视场和在纵向上长景深两个方面的关键问题,用于一次性拍照检出长景深范围内大面阵表面的缺陷。

收稿日期: 2016-09-26; **收到修改稿日期:** 2016-11-18

基金项目: 重庆理工大学星火计划项目(2014XH06)

作者简介: 刘钦晓(1981—),男,博士,讲师,主要从事光学系统设计和图像处理方面的研究。

E-mail: liuqinxiao@cqut.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: shilan_wang@126.com

2 波前编码技术原理

2.1 大景深成像原理

波前编码系统^[2-3]是非相干成像领域中一种新的景深扩展方法,利用光学设计与数字图像处理相结合的方法来实现景深延拓的目的,通过在光阑面上放置一块精心设计的相位型非球面光学编码板,实现对光学系统的编码操作,使得传统意义上的对焦位置和离焦位置同时变得模糊,并且其模糊程度在一定范围内保持一致,导致系统的点扩展函数(PSF)在相当长景深范围内保持一致,进而在像面上得到一个与相当长景深范围内模糊程度一样的中间像,然后再利用系统的 PSF 进行反卷积去模糊解码操作^[4-5],得到一个相当长景深范围内清晰的输出像。

如图 1 所示,波前编码光数混合系统是一种包含光学编码和数字解码的两步成像系统,通过在光学系统的光瞳面上引入一块相位板,在像面上得到一幅对景深不敏感的中间模糊像,该图像被 CCD 或 互补金属氧化物半导体(CMOS)等光电探测器件捕获,从而实现波前编码图像的编码处理,处理后的图像对景深不敏感,在空间域表现为编码系统的 PSF 在相当长的景深范围内保持一致,在频域上表现为系统的传递函数在相当长的景深范围内保持不变。接下来通过解码算法,将捕获的模糊图像进行反卷积和去噪处理,得到一幅清晰的输出图像。

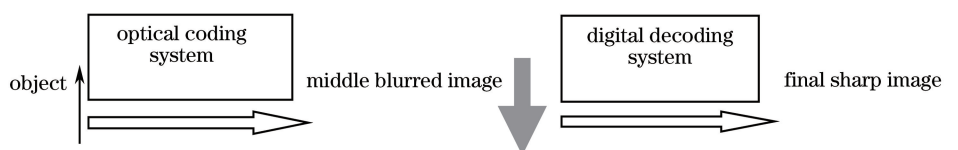


图 1 波前编码解码系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of a wavefront coding and decoding system

2.2 相位板参数优化原理

采用三次相位掩膜(CPM)可以获得超大景深,并且可以在一定程度上抑制球差、色差、匹兹凡像面弯曲、彗差、像散等像差,减小由温度及安装引起的误差^[6-9]。三次相位掩膜又包括纯三次相位掩膜,即 $z(x,y) = \alpha(x^3 + y^3)$, 广义三次相位掩膜,即 $z(x,y) = \alpha(x^3 + y^3) + \beta(x^2y + xy^2)$, 其中 x, y 为光瞳坐标, α, β 为相位掩膜的参数, z 为相位掩膜的厚度。这两种三次相位掩膜在景深延拓上没有明显的区别。

波前编码系统是以成像质量对物距变化的不敏感性为设计目标的,因此不能利用光学软件自带的像质评价函数直接优化得到波前编码系统的完整结构。作为波前编码系统最为重要的指标,不同物距下调制传递函数(MTF)的一致性 or PSF 的一致性为相位板参数优化的入手点,兼顾考虑系统成像质量,用软件自带的宏功能设计适合波前编码模块的系统性能评价函数,从而优化得到符合设计要求的相位掩膜参数 α, β 。

3 长景深阵列光学组件缺陷检测系统设计

3.1 设计指标

根据技术要求,需要对 3~13 m 范围内,一系列光学钽玻璃板上的缺陷进行成像检出,其中钽玻璃板的对角线长度为 425 mm。其示意图如图 2 所示。



图 2 阵列光学组件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of an array optical components

3.2 设计思想

根据设计指标,利用波前编码技术进行光学检测系统的设计,通常波前编码系统的光学设计步骤为:第一步,初始结构,给定光学检测系统的基本参数,包括有效焦距、光圈数、视场角等,选定或构建系统的

初始结构。

第二步,初始优化,在光阑处预留出相位板的位置,并用厚度和材料相同的平板代替相位板,去除系统的渐晕,用普通光学系统的设计思路进行初始优化设计。

第三步,整体优化,将平板换成待优化的相位板,编写自定义的波前编码系统的评价函数,引入景深和视场相关的惩罚项,整体优化得到符合要求的实际波前编码系统。

第四步,容差分析,利用光学设计软件进行容差分析。

第五步,出图加工。

经过上述设计步骤可以得到一个理想的波前编码系统,完成整个系统的第一步,物平面上的信息通过该编码系统经探测器得到的图像是一幅模糊的图像。

3.3 设计结果

本方案采用制冷 CCD,像素数为 6×10^6 ,像面大小为 1 in(1 in=2.54 cm)(14.6 mm×12.8 mm),曝光时间为 0.22~3600 ms,由于要实现在 3 m 物距下,423 mm 视场范围内的成像要求,结合制冷 CCD 像面的大小,可以计算得到系统的焦距应该为 100 mm。为保证测量的准确性,要求系统的畸变小于 0.5%,并且采用像方远心,以确保系统的光场均匀性。优化设计后,得到如表 1 所示的长景深阵列光学组件缺陷检测系统的参数。

表 1 长景深阵列光学组件缺陷检测系统设计参数表

Table 1 Parameters of the long depth of field array optical components defect detection system

Surface	Surface type	Y radius /mm	Thickness /mm	Glass
Object	Sphere	Infinity	4500	
1	Sphere	Infinity	4	HZF2
2	Sphere	43.73	5	HZBAF21
3	Sphere	Infinity	0.7878	
4	Sphere	36.64	5.5	HZK6
5	Sphere	-36.64	3	HLAK10
6	Sphere	179.5	0.197	
7	Sphere	Infinity	3	PMMAO
Stop	XY polynomial	Infinity	4.9111	
9	Sphere	52.35	5	HK9L
10	Sphere	-52.35	1.4203	
11	Sphere	-47.62	4.5	HF4
12	Sphere	14.27	5	HZBAF21
13	Sphere	41.81	23.3731	
14	Sphere	-15	4	HQK3L
15	Sphere	Infinity	14.3107	
16	Sphere	27.81	6	HLEAF3A
17	Sphere	Infinity	10	
Image	Sphere	Infinity	0	

表中,光阑面采用的三次相位掩膜为 $z(x,y) = \alpha(x^3 + y^3)$, 其中 $\alpha = 1.5 \times 10^{-5}$ 。图 3 给出了长景深阵列光学组件缺陷检测系统的光学结构图。

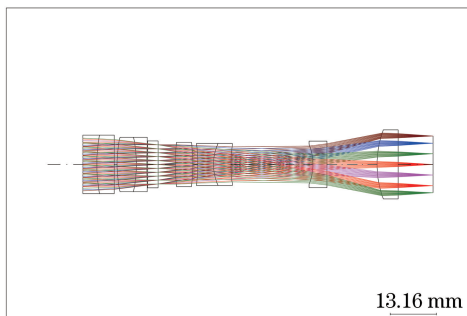


图 3 长景深阵列光学组件缺陷检测系统的光学结构图

Fig. 3 Optical structure diagram of the long depth of field array optical components defect detection system

4 分析与讨论

4.1 视场分析

根据设计结果,该光学检测系统在 3 m 处的光学放大率为 0.0335,由于成像面大小为 16 mm,因此该系统在 3 m 处可以对 $16 \text{ mm}/0.0335=450.7 \text{ mm}$ 的视场成像,满足系统设计指标中对视场大于 425 mm 的要求。

4.2 景深分析

根据设计指标,系统应保证在 3~13 m 纵向景深范围内的图像清晰成像,为验证系统的景深性能,利用仿真软件分析系统,得出 3~13 m 处传统系统与长景深系统的 MTF 分别如图 4 和图 5 所示,作为对比,传统系统的对焦面处于物距为 4.5 m 的位置。

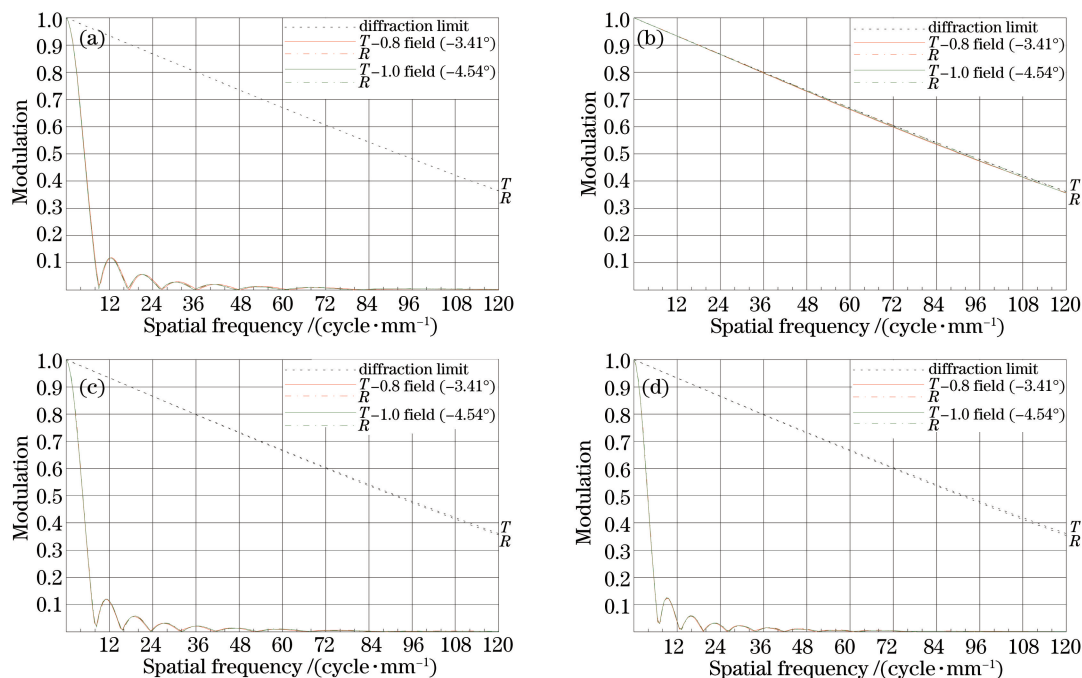


图 4 传统系统的 MTF。(a)景深为 3 m;(b)景深为 4.5 m;(c)景深为 10 m;(d)景深为 13 m

Fig. 4 MTF of the traditional system. (a) Depth of field is 3 m; (b) depth of field is 4.5 m; (c) depth of field is 10 m; (d) depth of field is 13 m

从图 4 可以看到,当系统对 4.5 m 对焦时,传统系统对焦外位置 3,10,13 m 的 MTF 下降严重,说明该系统的景深较浅,无法满足 3~13 m 的长景深成像。

从图 5 可以看到,长景深阵列光学组件缺陷检测系统的 MTF 从 3~13 m 保持基本一致,说明该系统在 10 m 长的景深处成像性能一致。

4.3 成像仿真分析

光学系统成像相当于一个低通滤波的过程,像面上所成的像是物平面的信息和光学系统本身的 PSF 卷积的结果,如果要精确地获取物平面的信息,理论上需要去除光学系统本身的影响,也就是说要进行反卷积恢复,而反卷积恢复的前提是要求光学系统对成像范围内物的成像性能保持一致。图 6 给出了系统解码用的 PSF,从图中可以看到,系统在 3~13 m 范围内,PSF 保持一致。即系统在成像过程中,不同物距下得到的成像模糊程度一致,这使得利用同一个 PSF 进行反卷积图像恢复成像成为可能。

从图 6 中可以看到 3~13 m 范围内系统的 PSF 保持一致,使用 4.5 m 处的 PSF 进行最终图像的复原实验,利用成像设计软件仿真了 3 m 和 13 m 两个极限位置的中间模糊图像并利用图 6 中的 PSF 进行去卷积复原,仿真结果如图 7 所示。从仿真中间图可以看到,利用长景深阵列光学组件缺陷检测系统成像检测时,对于 3 m 和 13 m 纵向景深,成像模糊程度一致,利用系统本身的 PSF 进行图像复原,可以得到 10 m 长景深的清晰图像输出,说明系统在 3~13 m 景深范围内成像清晰度保持一致。

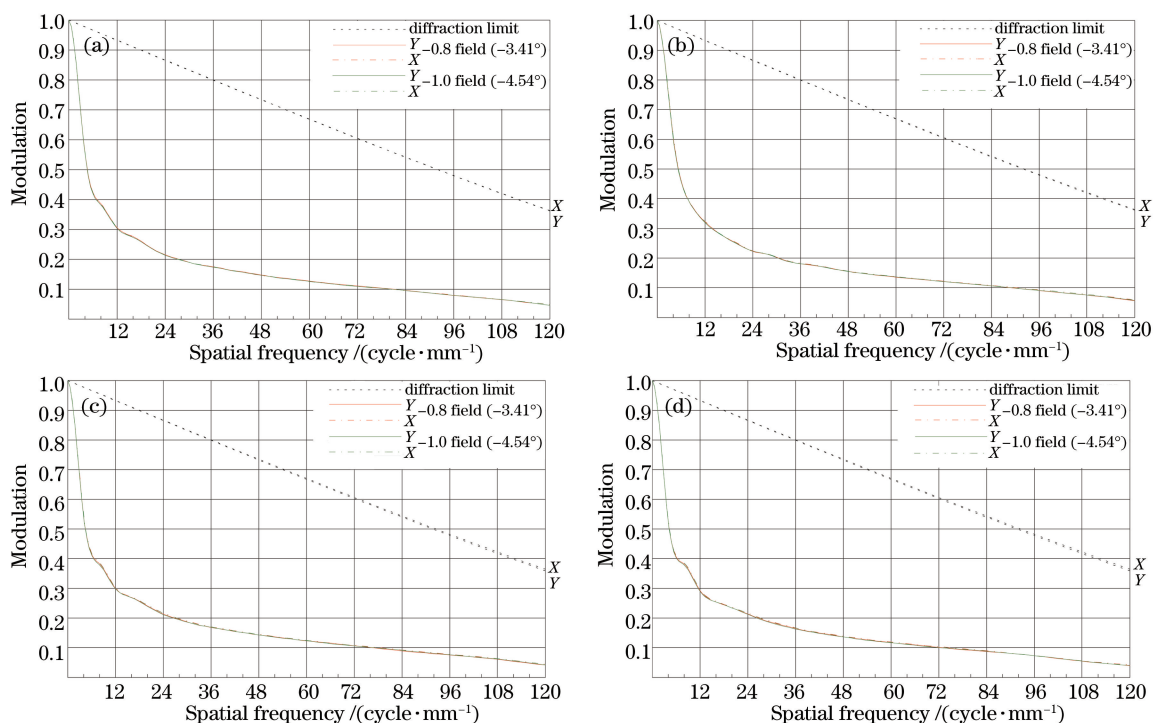


图 5 长景深阵列光学组件缺陷检测系统的 MTF。(a)景深为 3 m;(b)景深为 4.5 m;(c)景深为 10 m;(d)景深为 13 m
 Fig. 5 MTF of the long depth of field array optical components defect detection system. (a) Depth of field is 3 m;
 (b) depth of field is 4.5 m; (c) depth of field is 10 m; (d) depth of field is 13 m

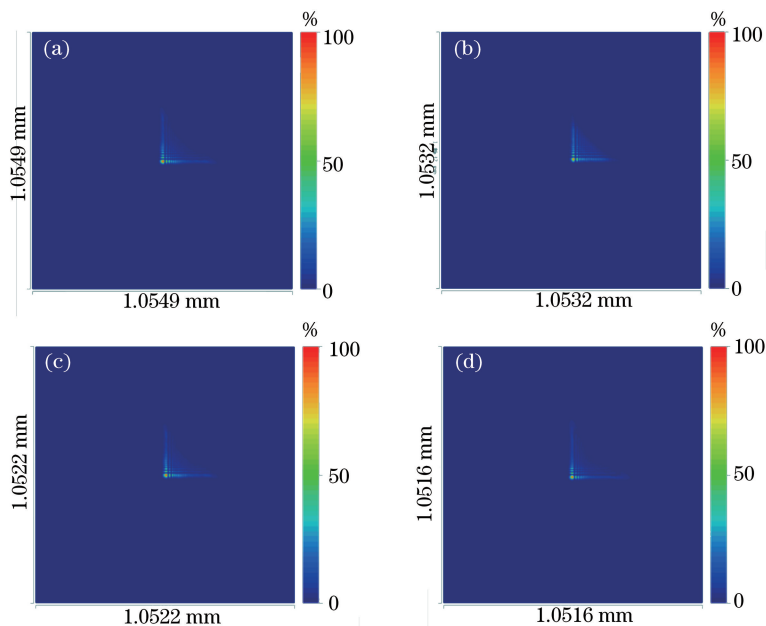


图 6 长景深阵列光学组件缺陷检测系统的 PSF。(a)景深为 3 m;(b)景深为 4.5 m;(c)景深为 10 m;(d)景深为 13 m
 Fig. 6 PSF of the long depth of field array optical components defect detection system. (a) Depth of field is 3 m;
 (b) depth of field is 4.5 m; (c) depth of field is 10 m; (d) depth of field is 13 m

5 结 论

本文针对神光-III系统的阵列型光学组件,设计了长景深阵列光学组件缺陷检测系统,能够通过一次拍照实现 425 mm 视场、3 m 物距下,3~13 m 纵向景深范围内同时清晰成像的目的,为接下来利用该系统进行长景深范围内缺陷的检测提供了理论保证。证明了该系统在特定大视场情况下,实现长景深成像的可能性。

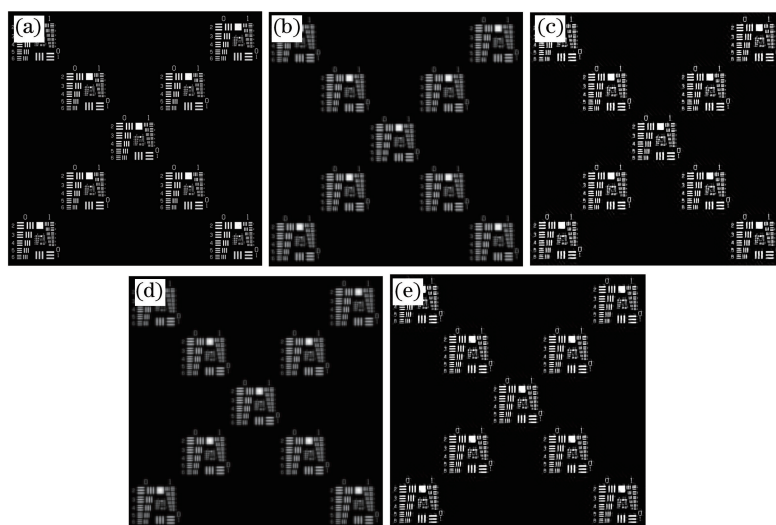


图 7 长景深阵列光学组件缺陷检测系统的仿真成像和解码复原图。(a)原始图;(b)3 m 中间模糊图;
(c)3 m 复原图;(d)13 m 中间模糊图;(e)13 m 复原图

Fig. 7 Simulation image and decoding restored image of the long depth of field array optical components defect detection system. (a) Original image; (b) 3 m middle blurred image; (c) 3 m restored image; (d) 13 m middle blurred image; (e) 13 m restored image

参 考 文 献

- [1] Zheng Wanguo, Deng Ying, Zhou Wei, *et al.* Development of laser technology in research center of laser fusion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(12): 3082-3090.
郑万国, 邓颖, 周维, 等. 激光聚变研究中心激光技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(12): 3082-3090.
- [2] Dowski E R, Cathey W T. Extended depth of field through wavefront coding[J]. Applied Optics, 1995, 34(11): 1859-1866.
- [3] Liu Qinxiao, Yu Feihong. Design and research of wavefront coding microscope system based on traditional microscope system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0322004.
刘钦晓, 余飞鸿. 基于传统显微系统的波前编码显微系统设计研究[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0322004.
- [4] Liu Qinxiao, Zhao Tingyu, Zhang Wenzhi, *et al.* Iteration algorithm for color image restoration of wavefront coding system with cubic phase mask[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2738-2743.
刘钦晓, 赵廷玉, 张文字, 等. 三次相位板波前编码系统彩色图像恢复的迭代算法[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2738-2743.
- [5] Liu Qinxiao, Zhao Tingyu, Zhang Wenzhi, *et al.* Image restoration based on generalized minimal residual methods with antireflective boundary conditions in a wavefront coding system[J]. Optical Engineering, 2008, 47(12): 127005.
- [6] Zhao Tingyu, Zhang Wenzhi, Ye Zi, *et al.* Design of wavefront coding system based on evaluation function of Fisher information[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(6): 1096-1101.
赵廷玉, 张文字, 叶子, 等. 应用费希尔信息量评价函数的波前编码系统设计[J]. 光学学报, 2007, 27(6): 1096-1101.
- [7] Guo Xiaohu, Zhao Yuejin, Dong Liquan, *et al.* Analysis of effect of phase plate decenter on wavefront coding imaging [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0809002.
郭小虎, 赵跃进, 董立泉, 等. 相位板偏心对波前编码系统的成像影响分析[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0809002.
- [8] Yan Feng. Optimization technique of wavefront coding system based on modulation transfer function invariance[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0411004.
闫锋. 基于调制传递函数相似度的波前编码系统优化技术[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0411004.
- [9] An Ning, Zhang Binglong, Jin Jianguo, *et al.* Applying wavefront coding technology on enhancing robustness of space camera[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0911002
安宁, 张秉隆, 金建高, 等. 应用波前编码技术提高空间相机的稳健性[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0911002