

文章编号:1001-5078(2024)11-1688-06

· 激光应用技术 ·

基于单压电变形镜的散斑抑制研究

孙冲,俞历程,鲍凯业,马剑强
(宁波大学 机械工程与力学学院,浙江 宁波 315211)

摘要:针对激光的高相干性产生的散斑严重影响成像质量的问题,提出了一种基于单压电变形镜的散斑抑制方法。搭建了基于61单元压电变形镜的测试系统,研究了面形复杂度、幅值、更新频率对成像散斑对比度的影响。当参与工作的致动器数目为61,面形更新频率为2.6 kHz,波前面形RMS为1.8 μm 时,散斑对比度降低到4%以下,此时散斑被明显抑制。实验结果表明面形复杂度越高、更新频率越快、幅值越大,得到的图像的散斑对比度越小,获得的图像信息越好。

关键词:自适应光学;压电变形镜;散斑叠加;散斑抑制

中图分类号:TN249;O438 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.11.006

Research on speckle suppression based on a single piezoelectric deformable mirror

SUN Chong, YU Li-cheng, BAO Kai-ye, MA Jian-qiang

(Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Aiming at the problem that speckle caused by high coherence of laser seriously affects the imaging quality, a speckle suppression method based on a single piezoelectric deformable mirror is proposed in this paper. A test system based on a 61-element piezoelectric deformable mirror is constructed, and the effects of surface complexity, amplitude and update frequency on imaging speckle contrast are investigated. When the number of actuators involved in the work is 61, the updating frequency of surface shape is 2.6 kHz, and the RMS of wavefront shape is 1.8 μm , the speckle contrast is reduced to less than 4%, at which time the scattering is significantly suppressed. The experimental results show that the higher the surface complexity, the faster the update frequency, and the larger the amplitude, the smaller the speckle contrast of the obtained image and the better the image information.

Keywords: adaptive optics; piezoelectric deformable mirror; speckle superposition; speckle suppression

1 引言

激光相比于普通光源具有更好的分辨率、方向性和效率,以及更好的显示效果和色彩表现能力^[1],被广泛应用于显微成像、军事侦察、医学影

像、地质勘探、工业检测等成像技术领域。然而,由于激光的高相干性使其经过粗糙表面反射或透射后,会形成一个高对比度的、细粒度的颗粒图案,这种粒度被称为散斑^[2]。成像中的散斑条纹会严重

基金项目:浙江省基础公益研究计划项目(No. LGG22E050002);宁波市重大科技攻关项目(No. 2021Z068);浙江省省属高校基本科研业务费专项资金项目(No. SJLY2020002)资助。

作者简介:孙冲(1998-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光显示、变形镜设计与制备。E-mail:15733285034@163.com

通讯作者:马剑强(1983-),男,博士,副教授,主要研究方向为压电器件、变形镜和自适应光学。E-mail:majianqiang@nbu.edu.cn

收稿日期:2024-01-16;**修订日期:**2024-03-14

影响成像质量和测量精度,极大地降低了图像的分辨率和对比度。因此,激光散斑成为激光成像显示技术中亟待解决的问题之一。

近年来,为了抑制成像中的散斑,国内外科研人员提出了许多抑制散斑的方法。目前硬件上的散斑抑制方法可以分为两类:降低光源的时空相干性和通过叠加大量独立的散斑图样来进行散斑抑制^[3]。

由于散斑是散射(反射或透射)光相干叠加而成,因此可以通过降低激光的时空相干性来抑制散斑。对于这种方法,Kuksenkov D V等^[4]采用波长不同的多个激光器来降低光源的时间相干性。Yang T H等^[5]对光源光束进行相位调制,通过改变光源线宽降低空间相干性。但增加光源数量及其配套设备会使系统变得更加复杂,且集成度较低、成本较高。

对于通过叠加大量的独立不相干的散斑图案来抑制散斑的方法,这些独立不相干的散斑图样在积分时间内叠加,可以实现视觉平均的效果,从而减少观察到的散斑。孙鸣捷等^[6]通过在光路中加入旋转混光棒实现角度分集获得多幅独立散斑图样;Chen CY等^[7]在光路中加入旋转散射片并不断增加其转速来抑制散斑;Akram M N^[8]使用微透镜阵列和移动散射片获得多幅独立散斑图样;韩啸等^[9]通过改变光纤长度结合振动光纤获得变化的动态散斑。这几种方法的散斑抑制效果均较好,但在光路中加入旋转元件会造成光路的不稳定,且光路中加入电机等振动元件会使光路集成度降低,从而会影响成像效率。近年来,Tran TK等^[10]提出了利用变形镜进行散斑抑制的方法,该变形镜能以一定频率发生振动,使得经镜面反射后光束中各点的相位发生随机变化,经过目标成像后生成多幅散斑图样,这种方法具有光能利用率高,光路集成度高、稳定可靠等优点^[11]。但该变形镜致动器数目较少,生成的随机面形也较少,且一些重要参数(如面形复杂度、幅值、频率等)尚不明确,因此有待进一步研究。

本文提出了一种基于低成本单压电变形镜的散斑抑制方法,搭建了成像系统,利用单压电变形镜对成像散斑进行了抑制,并研究了面形复杂度、幅值、更新频率对散斑对比度的影响。

2 理论分析

散斑的形成原理如图1所示,当相干性强的光

入射到粗糙物体表面时,经过粗糙表面的反射(或透射)后,经过成像系统的成像面,从而形成了随机的无规则分布的颗粒图案,这种颗粒图案被称为散斑。

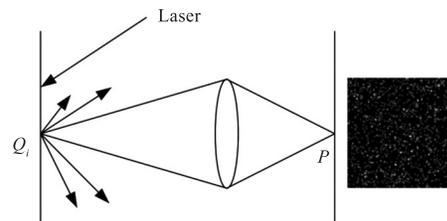


图1 散斑形成原因

Fig. 1 Causes of speckle formation

假设从物体粗糙表面上的一点 Q_i 发出的光在观测面上的复振幅为^[12]:

$$A_i(p) = a_R(x_i, y_i) e^{j\phi(x_i, y_i) \exp[j\phi(r)]} \quad (1)$$

式中, $a_R(x_i, y_i)$ 是散射光的振幅; $\phi(x_i, y_i)$ 是由于散射造成的随机分布的散射光的相位; $\phi(r)$ 是传播相位因子。P 点的振幅为散射面上所有点的叠加:

$$A(p) = \sum_{i=1}^N a_R(x_i, y_i) e^{j\phi(x_i, y_i) \exp[j\phi(r)]} \quad (2)$$

得到 P 点的强度为:

$$I(p) = |A(p)|^2 = \left| \sum_{i=1}^N a_R(x_i, y_i) e^{j\phi(x_i, y_i) \exp[j\phi(r)]} \right|^2 \quad (3)$$

因为振幅和相位是随机的,所以 $A(p)$ 是随机的,因此不同位置的光强是不同的,这就形成了散斑噪声。

在激光投影显示中,通常用散斑对比度来评价散斑的大小^[13]。它定义为散斑图样光强的标准差与平均值之比。当散斑现象严重时,对比度接近 1,反之对比度接近 0。对于 N 个独立散斑模式叠加,总强度的对比度 C 可表示为^[14]:

$$C = C_0 \frac{\sigma_s}{\bar{I}_s} = C_0 \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N \bar{I}_n^2}}{\sum_{n=1}^N \bar{I}_n} \quad (4)$$

其中, C_0 是初始散斑对比度; σ_s 是散斑图样总强度的标准差; \bar{I}_s 是总强度的平均值; \bar{I}_n 是第 n 幅散斑图样的平均强度。当 N 幅散斑图样中的各个分量的平均强度都相等时,其散斑对比度 C 为:

$$C = C_0 \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (5)$$

由上,可以得出,随着独立散斑图像数量 N 的增加,散斑对比度成比例下降且当散斑图像数目足够多时,散斑对比度接近理论值 C_0/\sqrt{N} 。实验得出,当散斑对比度降低到 4% 以下时,人眼几乎无法观测到散斑^[15]。因此,大约需要 $(C_0/0.04)^2$ 个独立不相干的散斑图样相互叠加,可将图像的散斑对比度降低到 4%。

3 实验设计

3.1 实验平台搭建

如图 2 所示,实验平台光路可分为测试成像散斑抑制效果的光路和测试变形镜对光场散斑抑制效果的光路。首先是测试单压电变形镜对成像散斑的抑制光路:实验光路光源采用 Thorlabs 公司的 HLS635 半导体激光器,其输出激光的波长为 635 nm。该激光器通过 FC/PC 光纤接头可以方便的安装到笼式系统中。为了避免相机饱和,在笼式系统中加入了中性密度滤光片,用来吸收激光束的强度。光阑用来限制激光束的直径,从而限制变形镜工作的致动器数目。毛玻璃的尺寸为 50 mm × 50 mm,厚度 3 mm,单面磨砂,其体现出统计平均的散射性质,且毛玻璃表面粗糙度越大,光束散射强度越大,此处采用 280 目的毛玻璃进行实验。实验成像目标采用尺寸为 25 mm × 25 mm,最大分辨率 2281 p/mm 的 USAF 分辨率测试板进行成像实验。物镜采用数值孔径 0.25 的 10 倍物镜。相机的采集帧率为 74 f/s,设置曝光时间为 6000 μ s。激光束通过准直透镜 L1 ($f = 125$ mm) 和光阑后照射到变形镜。经变形镜反射后通过一个聚焦透镜 L2 ($f = 100$ mm) 聚焦于毛玻璃后被散射,被散射后的光通过分辨率测试板,后通过物镜的 10 倍放大成像后,由相机拍照获得散斑图像信息。

图 2 中去除虚线框后光路为测试变形镜对光场散斑的抑制效果光路,相机用来接收光场的分布。激光束通过准直透镜 L1 ($f = 125$ mm) 和光阑后照射到变形镜。经变形镜反射后通过一个聚焦透镜 L2 ($f = 100$ mm) 聚焦于毛玻璃后被散射,利用相机拍照接收。

变形镜通过高频无规则振动获得多幅独立不相干的散斑图样,相机捕获到的图像是在其传感器一个积分时间内这些散斑图样叠加而成的图像。将图像导入计算机,并转化为灰度图后,截取相同区域进行散斑对比度的计算,后续实验实线框部分为散斑

对比度计算区域。

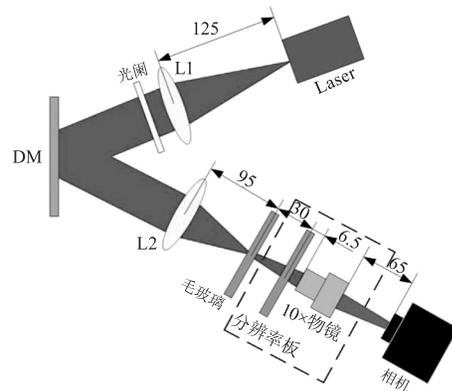


图 2 实验光路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental light path

单压电变形镜采用实验室研制的 61 单元压电变形镜。该变形镜 61 个电极成四圈环形分布,四圈的口径分别为 6.2 mm、12.4 mm、17.2 mm、20 mm,对应的工作的致动器数目分别为 9、21、37、61,其中最外圈电极为边缘驱动。基于逆压电效应,当给单个致动器施加电压时致动器会产生横向伸长,从而带动镜面产生变形,当给所有电极施加一组随机电压时,能够使镜面产生连续的无规则的面形。

为测试变形镜生成随机面形的能力,分别对 4 个口径下的致动器施加幅值 75 V 的 800 组随机电压,镜面产生随机面形,面形幅度可用统计量面形均方根(RMS)表征。如图 3 所示为不同口径下的 800 组随机面形 RMS 及不同口径下的一个随机面形,可见几种口径下的面形 RMS 均在 0.4 μ m 到 3 μ m 间变动,变化范围较大,说明生成散斑图样的随机性较好。

3.2 实验设计

3.2.1 致动器数目对散斑对比度的影响

图 4 为单压电变形镜对激光光场散斑的抑制效果图。图 4(a) 为散斑抑制前相机所接收到的图像,此时可以观测到光场中有大量的颗粒图案即散斑,严重影响了对图像的观测。当给变形镜 61 个致动器施加一组幅值为 75 V 的随机电压时相机所接收到的图像如图 4(b) 所示,散斑对比度明显降低。计算得到散斑抑制前的散斑对比度为 17.2%,抑制后的散斑对比度为 2.8%。图 4(c)、(d) 分别为图 4(a)、(b) 对应的光场强度图,光场更加均匀,强度图整体变化很小,光能量损失小,光能利用率大。

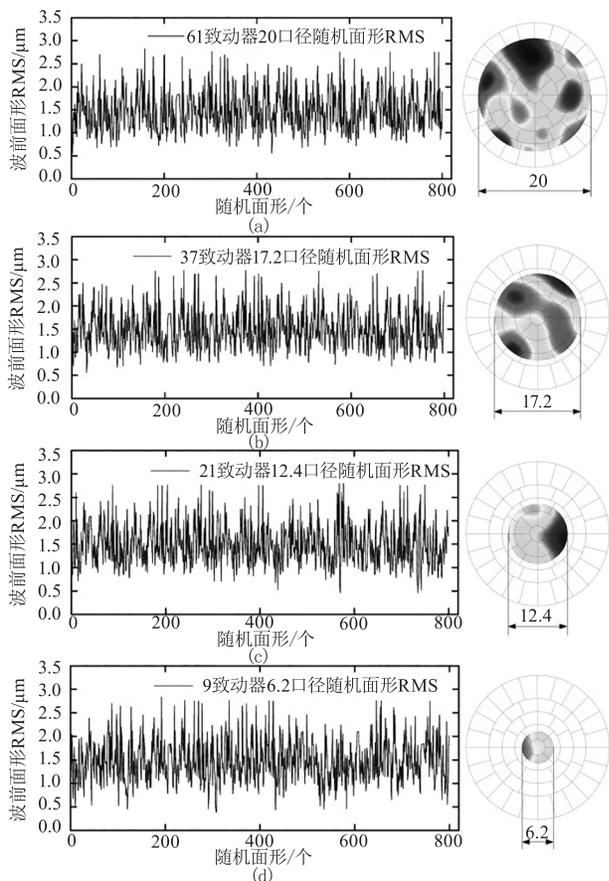


图3 不同口径下随机面形 RMS 曲线

Fig.3 RMS curve of random surface shape under different caliber

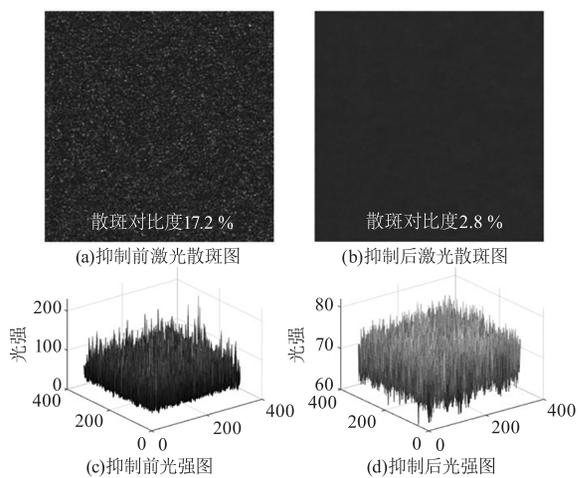


图4 散斑抑制前后光场散斑和光强图

Fig.4 Speckle and intensity map of light field before and after speckle suppression

图5为单压电变形镜对成像散斑的抑制效果图。图5(a)为实验成像所用的 USAF 分辨率测试板;图5(b)为光路中未加入毛玻璃且变形镜未工作时相机所接收的图像,可以看到干涉条纹较为明显;图5(c)为加入毛玻璃但变形镜未工作时图像,此时

图像中仅能看到散斑颗粒;图5(d)为加入毛玻璃且给变形镜61个致动器施加一组幅值75V随机电压时相机接收的图像,此时可以清晰的看到分辨率板的第6组第6线对,其对应的分辨率是4.38 μm,散斑对比度降低到3.9%,图像较为清晰,散斑抑制效果良好。

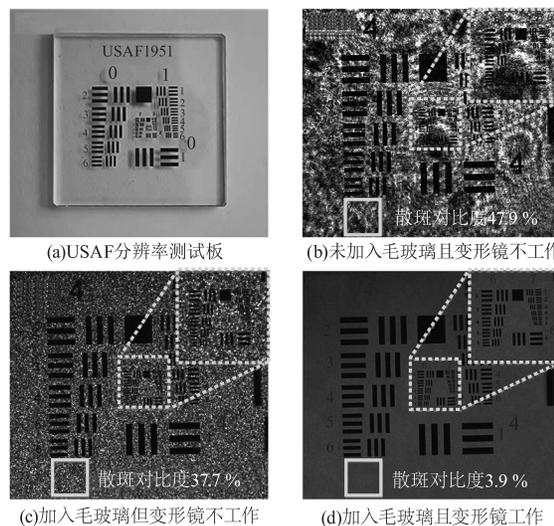


图5 成像散斑抑制前后效果图

Fig.5 Effect diagram before and after speckle suppression of imaging

实验中,通过改变光阑的孔径,得到了不同面形复杂度即不同工作致动器数目下的面形幅值和图像散斑对比度关系曲线,如图6所示。实验结果表明,在相同的面形幅值下,工作的致动器数目越多,散斑对比度越低,所获图像的质量越好。当面形 RMS 为1.8 μm,工作的致动器数目为61时,所得图像的散斑对比度降低到4%以下,此时人眼几乎无法观测到散斑,图像质量得到明显改善。

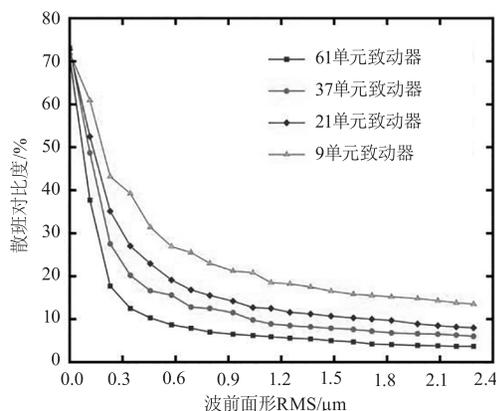


图6 面形复杂度和幅值对散斑对比度的影响

Fig.6 Influence of surface complexity and amplitude on speckle contrast

3.2.2 频率对散斑对比度的影响

实验中,通过改变面形更新频率 f, 图像的散斑

对比度也会发生明显的变化,如图7所示为工作的致动器数目为61,面形RMS为 $1.8\ \mu\text{m}$,面形更新频率分别为 $2.6\ \text{kHz}$ 、 $1.3\ \text{kHz}$ 、 $0.87\ \text{kHz}$ 、 $0.65\ \text{kHz}$ 时相机所接收到的图像。如图8所示,实验得到了不同面形更新频率下面形幅值和散斑对比度的关系曲线。可见在相同的面形幅值下,面形更新频率越高,散斑对比度越小。

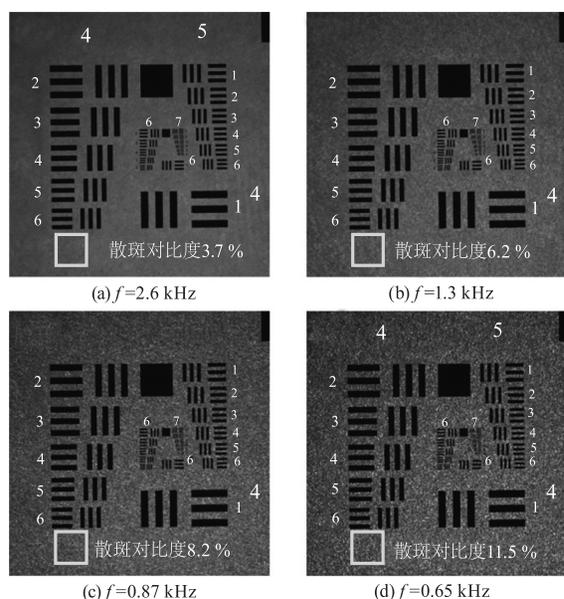


图7 不同电压频率下散斑的抑制效果图

Fig. 7 Speckle suppression effect diagram under different voltage frequencies

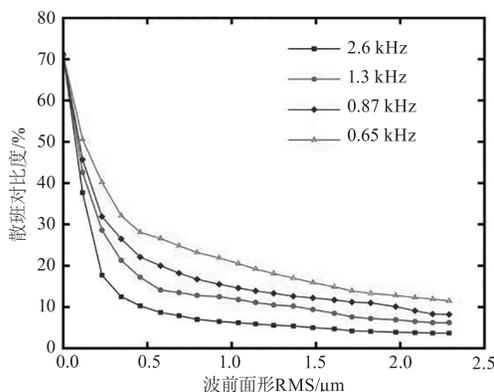


图8 面形幅值和更新频率对散斑对比度的影响

Fig. 8 Influence of surface amplitude and update frequency on speckle contrast

4 结 语

针对激光的高相干性产生的散斑严重影响成像质量的问题,提出了使用单压电变形镜进行散斑抑制的方法。实验对单压电变形镜生成随机面形的能力进行了测试,并搭建了成像光路,对激光光场散斑以及成像散斑抑制效果进行了测试。实验结果表明,该方法可以有效抑制散斑,经过散斑抑制后的散

斑对比度为降低到4%以下。可见,变形镜可以有效的抑制散斑,未来有望应用于激光成像显示领域。

参考文献:

- [1] Xu Zuyan. Laser displays-new display technology for next generation[J]. Laser & Infrared, 2006, 36 (S1): 737 - 741. (in Chinese)
许祖彦. 激光显示——新一代显示技术[J]. 激光与红外, 2006, 36 (S2): 737 - 741.
- [2] Meng Xiangxiang, Liu Weiqi, Wei Zhonglun, et al. Speckle suppression by new diffuser in laser projection display system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, (2): 503 - 507. (in Chinese)
孟祥翔, 刘伟奇, 魏忠伦, 等. 激光投影显示中新型散射体的散斑抑制[J]. 红外与激光工程, 2015, (2): 503 - 507.
- [3] Liu Jingwei. Research on speckle suppression in laser projection display [D]. Ji' nan: Shandong University, 2015. (in Chinese)
[6] 刘敬伟. 激光投影显示散斑抑制方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [4] Kuksenkov D V, Roussev R V, Li S, et al. Multiple-wavelength synthetic green laser source for speckle reduction [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7917: 79170B.
- [5] Yang T H, Chen C W, Jau H C, et al. Liquid-crystal random fiber laser for speckle-free imaging [J]. Applied Physics Letters, 2019, 114 (19): 191105.
- [6] Sun Mingjie, Yu Kanglong, Meng Zhaokui. Speckle suppression method with vibrating light pipe [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40 (10): 69 - 74. (in Chinese)
孙鸣捷, 于康龙, 孟照魁. 一种采用振动混光棒的散斑抑制技术[J]. 中国激光, 2013, 40 (10): 69 - 74.
- [7] Chen C Y, Su W C, Lin C H, et al. Reduction of speckles and distortion in projection system by using a rotating diffuser [J]. Optical Review, 2012, 19 (6): 440 - 443.
- [8] Akram M N, Tong Z, Ouyang G, et al. Laser speckle reduction due to spatial and angular diversity introduced by fast scanning micromirror [J]. Applied Optics, 2010, 49 (17): 3297 - 304.
- [9] Han Xiao, Miao Long, Zhou Huang, et al. Speckle suppression based on PPMgOLN microchip green laser [J]. Laser & Infrared, 2015, 45 (5): 483 - 486. (in Chinese)
韩啸, 缪龙, 周煌等. 基于 PPMgOLN 绿光微片激光器的散斑抑制[J]. 激光与红外, 2015, 45 (5): 483 - 486.
- [10] Tran T K, Chen X, Svensen O, Akram M N. Speckle re-

- duction in laser projection using a dynamic deformable mirror[J]. *Optics Express*, 2014, 22(9):11152-66.
- [11] He Peixin. Research on speckle suppression using chaotic laser in laser display system[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021. (in Chinese)
贺培鑫. 混沌激光在激光显示中的散斑抑制研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- [12] Li Xuan. Research on speckle suppression of digital holographic microscopy imaging based on rotating double diffusers[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020. (in Chinese)
李焯. 基于旋转双散射片的数字全息显微成像散斑抑制研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [13] Qian Liyong, Zhu Xiangbing, Chen Jin, et al. Speckle suppression in laser projection optical path[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2017, 15(5):62-66. (in Chinese)
钱立勇, 朱向冰, 陈瑾, 等. 激光投影光路中的散斑抑制研究[J]. *光学与光电技术*, 2017, 15(5):62-66.
- [14] Guo Yujie, Li Keqiang, Zhang Song, et al. Implementation of a semiconductor laser display system based on a scatter suppression method[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(6):838-845. (in Chinese)
郭宇杰, 李国强, 张嵩, 等. 基于散斑抑制方法的半导体激光显示系统实现[J]. *激光与红外*, 2023, 53(6):838-845.
- [15] Deng Hui, Lai Liping, Zhang Rongzhu. Overview of suppression methods of laser speckle noise[J]. *Journal of Chengdu Technological University*, 2018, 21(3):28-32. (in Chinese)
邓慧, 赖莉萍, 张蓉竹. 激光散斑噪声抑制方法综述[J]. *成都工业学院学报*, 2018, 21(3):28-32.