

一种采用振动混光棒的散斑抑制技术

孙鸣捷 于康龙* 孟照魁

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要 散斑现象严重影响激光投影的图像质量, 必须加以抑制。在已有研究的基础上, 提出一种基于振动混光棒的散斑抑制方法, 介绍了相关理论, 并通过仿真和实验验证了该方法的有效性。基于两种典型激光光源的实验结果证明, 该方法无需额外整形透镜光学器件即可实现高效整形照明, 缩小了系统尺寸; 所得投影图像的散斑对比度不大于 6%, 满足视觉观察的要求; 消散系统的能量利用率不小于 90%。

关键词 激光光学; 散斑抑制; 振动混光棒; 散斑对比度

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1002013

Speckle Suppression Method with Vibrating Light Pipe

Sun Mingjie Yu Kanglong Meng Zhaokui

(School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract Speckle effect severely affects the laser projection image quality, therefore it needs to be suppressed. A speckle suppression method with a vibrating light pipe is proposed. It is theoretically analyzed, and the effectiveness is verified by simulations and experiments. Experiments are performed with two typical laser sources. The results show that, with the proposed method, no additional reforming lens is necessary for efficient rectangular illumination, which reduces the system size; the vibrating light pipe method can effectively reduce the speckle contrast to less than 6%, which is not recognizable to human eyes; the illumination efficiency of the speckle suppression system is above 90%.

Key words laser optics; speckle suppression; vibrating light pipe; speckle contrast

OCIS codes 110.6150; 110.2960; 110.4280

1 引 言

激光作为新型光源, 与传统光源相比具有色域广、分辨率高、寿命长、亮度高、光学系统紧凑以及光电转换效率高等优势^[1], 在国民经济、军事、科研等领域得到广泛应用^[2]。作为投影光源, 激光可以使投影图像更加生动明亮、色彩丰富。但当激光照射到粗糙的表面(如投影幕布)时, 散射光会相互干涉, 在之后的传播空间内形成随机光强分布。这种光强分布被强度探测器(如人眼)观测到, 即所谓的散斑现象。激光散斑虽然有很多用途^[3], 但在投影系统中严重影响投影图像质量, 这是激光照明应用的瓶颈问题之一。激光投影应用中, 散斑必须加以抑制^[4]。

从发明激光开始, 散斑现象就被广泛关注。近几年, 有许多关于散斑特性^[5-8]和散斑抑制^[9-16]的研究。Wang 等^[10]尝试使用衍射光学元件(DOE)抑制散斑, Trisnadi^[11]推导出了最佳的散斑抑制条件, 并用一个基于 Hadamard 矩阵的散射体来实现散斑抑制。Gao 等^[12]使用一对一维动态相位矩阵替代 Hadamard 矩阵进行散斑抑制。Yurlov 等^[13]在激光扫描仪中使用一个贝克编码的 DOE。Liao 等^[14]将散射体与相位调制器合并达到散斑抑制效果。Egge 等^[15]通过旋转一个正弦光栅让激光散射到不同区域达到降低散斑对比度的目的。Mehta 等^[16]将两个散射体之间的两束激光引进振动的光

收稿日期: 2013-03-25; 收到修改稿日期: 2013-06-09

作者简介: 孙鸣捷(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光纤激光器及红外成像等方面的研究。

E-mail: b10053@buaa.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: yukanglong@126.com

纤环中进行散斑消除。上述这些方法均涉及在光束的传播路径中放置散射体以实现相位调制并抑制散斑。对于激光投影应用,采用散射体的方法会带来照明能量的损失,阻碍了该方法在实用激光投影技术中的应用。孙鸣捷等^[17]对于散射体的运动与散斑对比度之间关系的研究提供了一种新的解决散斑问题的途径,并提出一种采用旋转混光棒实现散斑抑制的方法,以提高照明效率。但在将该方法实用化过程中,由于旋转机制的缘故,照明效率并不能让人满意。

本文提出对激光照明系统中混光棒施加连续作用力,实现混光棒的连续形变从而实现激光散斑抑制并提高激光照明效率。通过理论分析、推导以及仿真、实验验证了该方法的有效性。实验中,该方法将投影图像的散斑对比度抑制到 6% 以下,同时整个系统的照明效率较之前提高了 1.5~2 倍,具体视不同芯片尺寸决定。

2 理论分析

2.1 使用振动混光棒抑制散斑的原理

前述散斑抑制方法得到的无散斑照明光斑通常为圆形,而投影技术中采用的图像芯片[如液晶显示器(LCD)、硅基液晶(LCOS)]多为矩形,照明光斑与图像芯片的形状不匹配将导致系统照明效率的下降。图 1(a)为采用旋转混光棒的方法进行散斑抑制时,圆形照明光斑与矩形图像芯片不匹配的情况。图像芯片部分和无用的边缘部分都被光斑照明。以实验中采用的 Aurora System 公司 ASI5000 LCOS 型图像芯片为例(芯片长宽比为16:9),计算可得最大的照明效

率为 55%,如图 1(b)所示。如要提高效率,则需在散斑抑制系统后放置额外的整形透镜组。这些整形透镜组一方面由于透射率小于 100%而造成能量进一步损耗,另一方面还将增加整个系统的体积和成本。

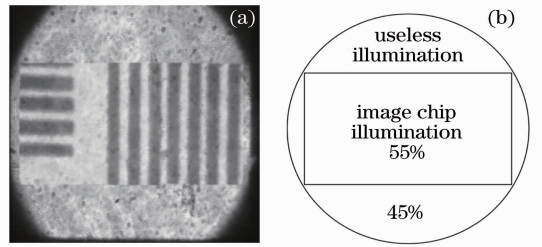


图 1 旋转混光棒散斑抑制技术的(a)实验结果和(b)能量损失示意图

Fig. 1 (a) Experimental result and (b) general configuration of energy losses of rotating pipe illumination

为克服上述问题,在之前的研究基础上提出了一种采用振动混光棒的散斑抑制技术,该系统原理如图 2 所示。Goodman^[19-20]提出在最优条件下将 N 个不同图样的散斑叠加,可将散斑对比度降到 $1/N^{1/2}$ 。该方法中,混光棒输出端面的光斑用于照明图像芯片,然后投影至屏幕,最终被强度探测器观测。如图 3(a)所示,当混光棒的 A 、 B 两端被固定,对混光棒中点施以力 F 时,混光棒会产生 w 的形变偏移。混光棒的形变会改变内部激光的传播光路,输出端面的散斑图样也会相应变化。如果力 F [如图 3(b)所示]进行连续变化,那么混光棒会产生持续形变,并导致散斑图样的连续变化。根据 Goodman^[19]提出的散斑抑制的原理,这些不同的散斑图样在强度探测器观测的积分时间内叠加平均,从而实现散斑的抑制。

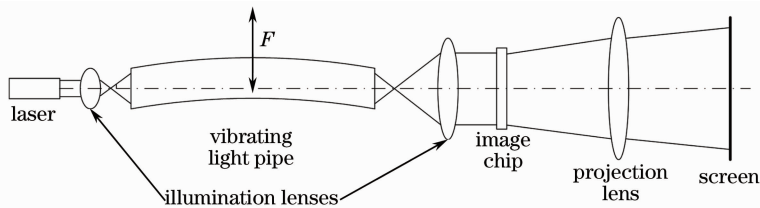


图 2 基于振动混光棒散斑抑制系统示意图

Fig. 2 General configuration of the vibrating light pipe system

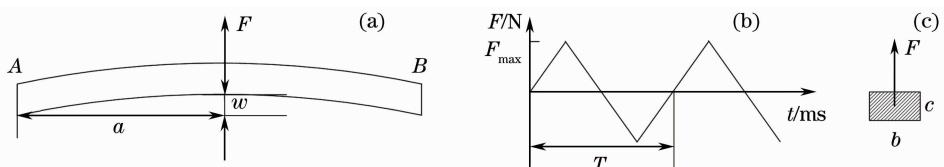


图 3 (a)混光棒的弯曲形变; (b) 持续变化的力; (c) 混光棒的横截面

Fig. 3 (a) Deformation of the light pipe; (b) continuously varying force; (c) light pipe cross-section

为了实现匹配,混光棒横截面的长宽比应与投影图像芯片一致。两者之间使用合适的准直透镜组,即可实现光斑对投影图像芯片 100% 的理论照明效率。

2.2 混光棒的最大弯曲形变

可以预见,混光棒形变越大,散斑图像的变化也越大。但混光棒存在形变极限,即材料力学中的最大弯曲形变,为

$$\omega_{\max} = F_{\max} a^3 / (6EI), \quad (1)$$

式中 F_{\max} 是施加在混光棒中点 F 的峰值, a 是混光棒的半长度, E 是混光棒材料的弹性模量, I 是混光棒横截面的惯性积, 惯性积定义为

$$I = b^3 c / 12, \quad (2)$$

式中 b 和 c 是混光棒横截面尺寸, 如图 3(c) 所示。将(2)式代入(1)式可得

$$\omega_{\max} = 2F_{\max} a^3 / (Eb^3 c). \quad (3)$$

此外,材料断裂的临界条件为

$$K_c = \sigma \sqrt{\pi d}, \quad (4)$$

式中 K_c 是材料的断裂韧性, $\sigma \sqrt{\pi d}$ 是应力强度因子, σ 是混光棒中点的压力, d 是断裂尺寸。在图 3 所示情况中, (4)式变为

$$K_c = F_{\max} \sqrt{\pi b} / b^2. \quad (5)$$

联合(3)式和(5)式, F_{\max} 和 ω_{\max} 计算式为

$$F_{\max} = K_c b^2 / \sqrt{\pi b}, \quad (6)$$

$$\omega_{\max} = 2K_c a^3 / (Ebc \sqrt{\pi b}). \quad (7)$$

F 的变化周期 T 和探测器的积分时间有关,混光棒的形变和出射端面的散斑图样变化均与 F 具有相同的变化周期。换言之, t_1 时刻的散斑与 $t_1 + T$ 时刻的散斑相同。由于只有不同散斑图样的叠加才能实现散斑抑制,因此 F 的变化周期 T 与探测器积分时间一致是合理选择。

3 仿真分析

为实现照明光斑的匹配,混光棒横截面的长宽

比应与图像芯片一致。目前常用的图像芯片包括 16:9 (长宽比) 和 4:3 两类。之后的实验中采用 Aurora System 公司的 ASI5000 LCOS 型(720P)芯片,为实现匹配,仿真和实验中的混光棒横截面长宽比设计为 16:9。仿真中,将散射角为 $25^\circ \times 14^\circ$ 的激光光源置于混光棒入射端面,混光棒材料为 K9 玻璃,尺寸为 $3.2 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$,将一块毛玻璃紧挨混光棒出射端面放置,用于观察散斑。为简单起见,仿真中仅考察毛玻璃上的散斑图样。肉眼(典型的强度探测器)的积分时间为 $10 \sim 20 \text{ ms}$ ^[21],因此周期 T 设为 20 ms ,整个仿真系统如图 4 所示。

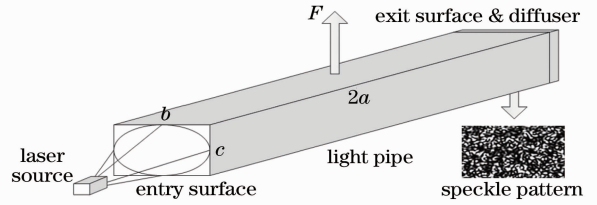


图 4 仿真系统的示意图

Fig. 4 Scheme of the simulation system

K9 玻璃的弹性模量 $E = 79.2 \text{ GPa}$, 静态断裂韧性的统计值 $K_{c,s} = 0.82 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 动态断裂韧性的值一般是静态的 30%, 因此 $K_{c,d} = 0.25 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 代入(6)式,计算出在如图 4 所示的垂直力 F 的作用下混光棒的最大形变量是 $\omega_{\max} = 699.6 \text{ } \mu\text{m}$, 而采用水平力 F 时,最大形变量是 $\omega_{\max} = 932.8 \text{ } \mu\text{m}$ 。

图 5(a) 是出射表面未经抑制的散斑图样。混光棒中点施加持续变化的力 F , 出射端面的散斑图样会发生变化并在探测器 20 ms 的积分时间内进行相互叠加,实现散斑抑制。

在垂直力和水平力作用下散斑抑制图样的仿真结果分别如图 5 和图 6 所示。在最大力作用下,混光棒具有最大的形变,此时强度探测器观测到图样的散斑对比度下降到最小。分别见图 5 和图 6 对应的数据表 1 和表 2。散斑对比度的定义为

$$C = \frac{1}{I_{\text{ave}}} \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_{i,j} - I_{\text{ave}})^2}, \quad (8)$$

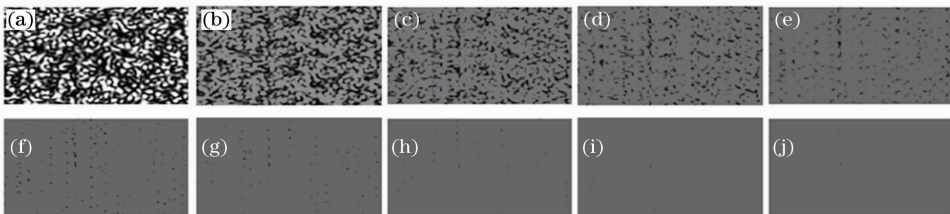


图 5 不同形变程度的垂直振动的散斑仿真图像

Fig. 5 Simulation images of vertical vibrating speckle patterns with different deformations

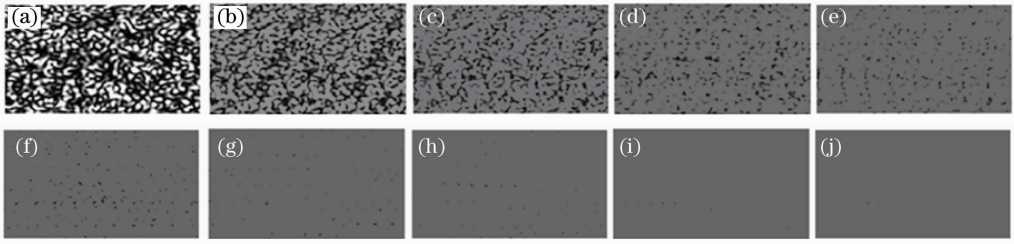


图 6 不同形变程度的水平振动的散斑仿真图像

Fig. 6 Simulation images of horizontal vibrating speckle patterns with different deformations

表 1 垂直仿真图像的参数

Table 1 Parameters of vertical simulation figures

Fig.	5(a)	5(b)	5(c)	5(d)	5(e)	5(f)	5(g)	5(h)	5(i)	5(j)
F_{\max}/N	0	2.8	5.7	8.5	11.3	14.2	17.0	19.8	22.7	25.5
$w_{\max}/\mu\text{m}$	0	77.7	155.5	233.2	310.9	388.7	466.4	544.1	621.9	699.6
Speckle contrast /%	83.7	46.9	28.4	17.1	9.4	5.4	3.3	1.7	0.6	0.4

表 2 水平仿真图像的参数

Table 2 Parameters of horizontal simulation figures

Fig.	6(a)	6(b)	6(c)	6(d)	6(e)	6(f)	6(g)	6(h)	6(i)	6(j)
F_{\max}/N	0	1.2	2.4	3.6	4.8	6.0	7.2	8.4	9.6	10.8
$w_{\max}/\mu\text{m}$	0	103.6	207.3	310.9	414.6	518.2	621.9	725.5	829.2	932.8
Speckle contrast /%	83.7	46.6	28.1	16.6	10.5	6.1	2.9	2.2	0.7	0.4

式中 M, N 分别代表 LCOS 芯片横向与纵向的图像分辨率, $I_{i,j}$ 为第 i 行第 j 列的像元强度值, I_{ave} 为 LCOS 芯片上的平均照射光强。

仿真结果表明,使用振动混光棒的方法理论上可以将散斑的对比度降到 1% 以下,同时对于散斑抑制而言,混光棒的振动方向并不关键。

4 实验研究

验证振动混光棒散斑抑制方法的实验系统如图 7 所示,实验中使用了两种光源,He-Ne 激光器 (632 nm) 和 固态二极管抽运激光器 (DPL, 532 nm)。实验中使用的混光棒由 K9 玻璃制作,尺寸为 $3.2 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。混光棒中部与压电陶瓷相连,以实现连续振动,振动频率设置为

50 Hz,压电陶瓷位置偏置量设为 $600 \mu\text{m}$,略小于上节计算理论的极限值,以确保不会断裂。实验中将 Aurora System 公司的 ASI5000 LCOS (720P) 投影仪作为成像核心,毛玻璃紧挨着 LCOS 后面放置,作为一个投射式屏幕。Sony ICX404AL 型 CCD 和一块焦距 25 mm 的成像透镜一起作为探测器,探测器的积分时间设置为 20 ms,其中,探测器的焦距和积分时间都是按照人眼的积分时间设计的。实验中,LCOS 先被经过振动混光棒的激光光束照明,之后探测器捕获到图像,该图像即在扩散器中传播的被 LCOS 反射的散斑图样。

图 8 为未经振动混光棒和经过振动混光棒的实验结果。散斑抑制系统的照明效率为图 7 所示的照明透镜 B 的出射能量与照明透镜 A 的入射能量的比值。散斑对比度和系统照明效率的计算结果如表

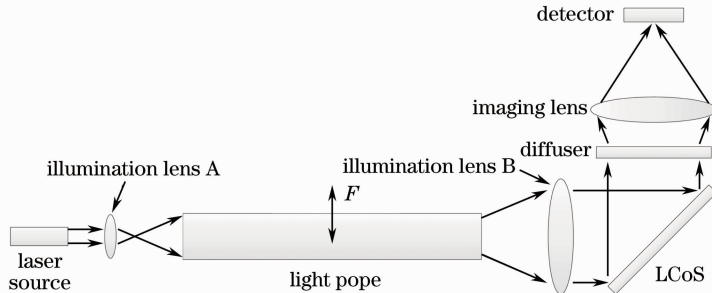


图 7 实验系统的原理图

Fig. 7 Scheme of experimental system

3 所示。

实验结果表明,通过振动混光棒的散斑抑制方法可以将图像的散斑对比度降低到 6% 以下,此时人眼几乎察觉不到散斑的存在^[22]。与此同时,从激光光

源出射进入混光棒的光束被限制成一个与图像宽高比相同的矩形光斑,照明效率高达 90%,损失能量的模块主要是两块照明透镜(图 7 中的 A 和 B)。

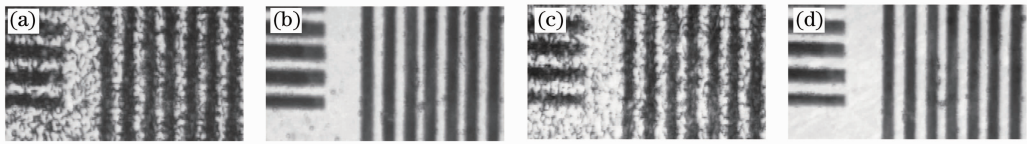


图 8 经过基于振动混光棒的散斑抑制前后的实验图像。(a) He-Ne 光源照明散斑图像; (b) He-Ne 光源照明消散图像; (c) DPL 光源照明散斑图像; (d) DPL 光源照明消散图像

Fig. 8 Experimental results of images before and after speckle suppression using a vibrating light pipe. (a) Speckle image with He-Ne laser; (b) speckle-free image with He-Ne laser; (c) speckle image with DPL; (d) speckle-free image with DPL

表 3 实验图像的参数

Table 3 Parameters of experimental images

	He-Ne		DPL	
	without a light pipe	with a vibrating light pipe	without a light pipe	with a vibrating light pipe
Speckle contrast / %	47.23	5.96	40.62	4.87
Illumination efficiency / %	90.87		90.14	

5 结 论

对基于旋转混光棒的散斑抑制技术的缺点进行了分析,提出一种基于混光棒振动的改进方法,并建立了该方法的理论仿真和实验模型。运用材料力学的方法对混光棒的形变极限进行分析,对该散斑抑制方法进行仿真,仿真实验中运用该方法得到了无散斑图样。实验中针对两种不同光源,采用这种振动混光棒的方法都得到了无散斑图样。实验证明,该方法可以在保持原光束 90% 能量的前提下将图像的散斑对比度抑制到 6% 以下,且无需额外整形透镜光学器件。

参 考 文 献

- Zhang Shengtao, Gao Wenhong, Zhao Pengfei, *et al.*. Laser speckle reduction due to angular diversity introduced by 2D laser diode array[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102005.
张圣涛, 高文宏, 赵鹏飞, 等. 激光阵列光源角度多样性抑制散斑方法[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102005.
- Yu Xiaochen, Hu Jiasheng, Wang Lianbao. New methods for improving the quality of laser beam shaping [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0116002.
于晓晨, 胡家升, 王连宝. 提高激光束整形质量的新方法[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0116002.
- Yang Liu, Hong Wei, Yang Chuan, *et al.*. Flow velocity measurement based on speckle in optical coherence tomography [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0504002.
杨柳, 洪威, 杨川, 等. 基于光学相干层析散斑的流速测量方法[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0504002.
- P H Yao, C H Chen, C H Chen. Low speckle laser illuminated projection system with a vibrating diffractive beam shaper[J].

Opt Express, 2012, 39(5): 16552-16566.

- O Carvalho, B Clairac, M Benderitter, *et al.*. Statistical speckle study to characterize scattering media: use of two complementary approaches[J]. Opt Express, 2012, 15(21): 13817-13831.
- S Ulyanov. Statistical properties of dynamic small-N speckles within highly scattering media[J]. J Opt Soc Am A, 2008, 25(25): 2207-2214.
- N A Chang, N George. Speckle in the 4F optical system[J]. Appl Opt, 2008, 47(4): A13-A20.
- S V Egge, U Osterberg, A Arksnes. Speckle contrast of the sum of N partially correlated speckle patterns[J]. J Opt Soc Am A, 2012, 29(6): 1188-1198.
- Shen Tingmei, Gu Ying, Wang Tianshi, *et al.*. Speckle reduction in optical coherence tomography[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(9): 1437-1440.
沈婷梅, 顾瑛, 王天时, 等. 光学相干层析成像中散斑噪声减小算法[J]. 中国激光, 2008, 35(9): 1437-1440.
- L Wang, T Tschudi, T Halldorsson, *et al.*. Speckle reduction in laser projection systems by diffractive optical elements[J]. Appl Opt, 1998, 37(10): 1770-1775.
- J I Trisnadi. Hadamard speckle contrast reduction[J]. Opt Lett, 2004, 15(1): 11-13.
- W Gao, Z Tong, V Kartashov, *et al.*. Replacing two-dimensional binary phase matrix by a pair of one-dimensional dynamic phase matrices for laser speckle reduction[J]. J Display Technology, 2012, 8(5): 291-295.
- V Yurlov, A Lapchuk, S Yun, *et al.*. Speckle suppression in scanning laser display[J]. Appl Opt, 2008, 47(2): 179-187.
- Z Liao, T Xing, G Chen, *et al.*. Speckle reduction in laser projection display by modulating illumination light[C]. SPIE, 2008, 6622: 662229.
- S V Egge, M N Akram, V Kartashov, *et al.*. Sinusoidal rotating grating for speckle reduction in laser projection: feasibility study [J]. Opt Eng, 2011, 50(8): 083202.
- D S Mehta, D N Naik, R K Singh, *et al.*. Laser speckle reduction by multimode optical fiber bundle with combined

- temporal, spatial, and angular diversity[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(12): 1894–1904.
- 17 Sun Mingjie, Lu Zukang. Study of speckle suppression by a moving diffuser in liquid crystal on silicon based laser projection system[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(3): 718–721.
孙鸣捷, 陆祖康. 硅基液晶激光投影中散射体散斑抑制作用的研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(3): 718–721.
- 18 Sun Mingjie, Lu Zukang. Speckle suppression with a rotating light pipe[J]. *Opt Eng*, 2010, 49(2): 024202.
- 19 J W Goodman. *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* [M]. Roberts & Company Publishers, 2010, 45–48.
- 20 J W Goodman. Some fundamental properties of speckle[J]. *J Opt Soc Am*, 1976, 66(11): 1145–1150.
- 21 A Valberg. *Light Vision Color*[M]. John Wiley & Sons, 2005, 165–167.
- 22 Sun Mingjie. *Mixed Sources Illumination and Laser Speckle Suppression in Micro Projection System*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. 88–98.
孙鸣捷. 微型投影显示系统中混合光源照明技术和激光散斑消除技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. 88–98.

栏目编辑: 张 腾