

# 激光投影显示屏表面粗糙度的测量

徐美芳<sup>1</sup> 石云波<sup>1</sup> 高文宏<sup>1,2</sup> 陈海洋<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室和电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051)

<sup>2</sup> 山西傲维光视光电股份有限公司, 山西 太原 030032

**摘要** 显示屏是激光投影显示系统的一部分,其表面粗糙度直接影响着基于角度多样性的激光散斑抑制效果。在角度多样性散斑抑制原理的基础上,建立了被测显示屏表面粗糙度与散斑图样之间的相关性之间的联系。对显示屏表面粗糙度对照射角度和角度变化的敏感程度权衡,实验中将入射角和角度变化量分别固定在 $1^\circ$ 和 $0.0038^\circ$ 。为避免外界微扰和测试屏表面不平度对测试结果的影响,通过对被测显示屏 $5\text{ cm}\times 5\text{ cm}$ 测试区域中选择9个子区域的测试结果进行平均,有效提高了测试精度。运用提出的方法确定4种材质显示屏的表面粗糙度分别为 $235.80, 209.57, 132.24$ 和 $137.60\ \mu\text{m}$ ,为设计有效降低激光散斑的投影显示屏提供了参考。

**关键词** 测量; 激光投影; 角度多样性; 散斑相关性; 表面粗糙度

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0108005

## Surface Roughness Measurement of Screen for Laser Projection Display

Xu Meifang<sup>1</sup> Shi Yunbo<sup>1</sup> Gao Wenhong<sup>1,2</sup> Chen Haiyang<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China  
<sup>2</sup> Shanxi Ovision Optronics LTD, Taiyuan, Shanxi 030032, China)

**Abstract** Display screen is an integral part of laser projection system. The surface roughness of screen directly affects speckle suppression based on angle diversity. The relation between speckle correlation and the surface roughness of measured screen is established by analyzing the speckle suppression method based on angle diversity. In the experiment, the incident angle is fixed to  $1^\circ$  and the angle increment is set to  $0.0038^\circ$ , which is a compromise between the sensitivities of surface roughness of the measured screen to those two factors. To avoid the effects of external perturbation and surface flatness on measured results, nine sub-regions are chosen in  $5\text{ cm}\times 5\text{ cm}$  measured screen areas and measured results from these sub-regions are averaged, which effectively improves the measurement accuracy. The surface roughness for four screens determined by the proposed method are  $235.80, 209.57, 132.24$  and  $137.60\ \mu\text{m}$ , respectively, which provides a basis to design a projection display screen applied to effectively reduce laser speckle.

**Key words** measurement; laser projection; angular diversity; speckle correlation; surface roughness

**OCIS codes** 140.7300; 120.3180; 120.6150

收稿日期: 2013-07-12; 收到修改稿日期: 2013-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(61078036)、山西省重大专项(20111101045)、山西省自然科学基金(2011101015-2)、中北大学 2011 年校青年科学基金

作者简介: 徐美芳(1974—),女,博士研究生,讲师,主要从事激光投影显示与激光散斑抑制等方面的研究。

E-mail: xmf0129@nuc.edu.cn

导师简介: 陈旭远(1962—),男,博士,教授,主要从事微电子机械传感器件及系统的研发、半导体材料与器件的表征与技术等方面的研究。E-mail: chenxy@online.no

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

# 1 引 言

在实际应用中,人们一般对投影显示屏的增益、视场角和尺寸较为关心,随着激光在投影显示技术中的应用,屏幕的表面粗糙度开始受到关注<sup>[1-2]</sup>。因为激光具有高度的空间和时间相干性,当它照射到具有一定粗糙度的屏幕上时,粗糙面上多种多样的微小面积对观察到的总场会产生随机相位基元,这些基元互相干涉就会产生强弱不同的光强,其在空间呈现细微尺寸的颗粒结构即散斑。这些散斑会携带屏幕表面的重要信息。在激光显示系统中,衡量散斑的主要参数是散斑对比度,它定义为均匀照明屏幕上光强的标准方差与均值的比值,即  $C = \sigma_I / \langle I \rangle$ <sup>[3]</sup>。激光散斑对比度  $C$  对屏幕表面高度涨落  $h(\alpha, \beta)$  的标准方差  $\sigma_h$  (即屏幕表面粗糙度) 存在一定的依赖关系,屏幕表面高度涨落的标准方差  $\sigma_h$  远小于照射波波长,该屏幕表面可视为光学光滑面,不产生散斑,  $C$  值接近零; 否则, 屏幕表面为光学粗糙面, 会产生比较明显的散斑,  $C$  值接近 1。

当激光束经屏幕反射或透射后,其初始相位会随屏幕粗糙度发生线性变化,即相位变化  $\sigma_\phi \propto \sigma_h$ , 基于散射片或屏幕运动、角度多样性以及波长多样性的激光散斑抑制方法正是利用了这一点。而一般情况下,无法明确正在使用的投影显示屏的粗糙度, 这为测试或研发这些激光散斑抑制器件增加了不确定因素。为此测量投影显示屏的粗糙度势在必行。

表面粗糙度测量最常用的有针描法,其精度能达纳米级,但表面粗糙度参数的分辨率取决于仪器的测量针尖的直径,还受仪器稳定性影响,并且仪器对被测屏幕会产生不同程度的损坏。作为该方法的补偿,光技术法是一种非接触式、非破坏性的、高效的测量表面粗糙度方法。很多研究人员在这方面做了大量工作,有采用散斑法<sup>[3-6]</sup>,光散射法<sup>[7-8]</sup>,干涉法<sup>[9]</sup>等。其中散斑法中基于静态散斑对比度分析法测量表面粗糙度的范围较窄,因为完全散射散斑图样的对比度在  $\sigma_h \approx \lambda/4$  处就达到饱和,即  $C = 1$ <sup>[10]</sup>, 这样对于大于  $\lambda/4$  的屏幕粗糙度就很难用该方法正确测试,采用角度散斑相关法<sup>[11-12]</sup>能很好地解决这个难题。

本文利用角度多样性原理来测量显示屏的表面粗糙度,通过改变照射被测屏幕的照明方向,使被测屏幕的表面高度涨落带来散射波的随机相移,导致观察面上散斑图像发生内在变化。随着照射角度变化的增加,相邻两帧散斑图样的相关程度减弱。而屏幕粗糙度越大,所需改变的角度越小;反之角度变

化就越大。对相同被测屏幕,在自由空间中采用两个不同角度照明,通过对这两个角度获得的散斑图样的退相关程度分析<sup>[13]</sup>,从而获得显示屏表面粗糙度的信息,为设计能有效降低激光散斑的投影显示屏提供参考。

## 2 屏幕表面粗糙度测量原理

### 2.1 屏幕表面散射特性

激光束照射到一平的粗糙显示屏上,经显示屏反射或透射散射后,由距离屏幕  $z$  处且平行于显示屏的观察面观察,光路如图 1 所示。当光束投射到粗糙显示屏表面上,然后经显示屏透射或反射散射后,在粗糙界面上发生的相移为  $\phi(\alpha, \beta)$ , 从表面散射所形成的散射波复振幅  $a(\alpha, \beta)$  为

$$a(\alpha, \beta) = rS(\alpha, \beta) \exp[j\phi(\alpha, \beta)], \quad (1)$$

式中

$$\phi(\alpha, \beta) = \frac{2\pi}{\lambda} (-\mathbf{i} \cdot \mathbf{z} + \mathbf{o} \cdot \mathbf{z}) h(\alpha, \beta) = [(-\mathbf{k}_i + \mathbf{k}_o) \cdot \mathbf{z}] h(\alpha, \beta), \quad (2)$$

式中  $r$  为显示屏表面平均振幅反射率,  $S(\alpha, \beta)$  代表整个散射光斑上照明的复振幅,  $\mathbf{k}_i$  和  $\mathbf{k}_o$  分别表示照明光束和观察方向的平均波矢,其长度为  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为入射光波长,它们的方向分别为  $\mathbf{i}$  和  $\mathbf{o}$ ,  $\mathbf{z}$  是表面向外的法线方向的单位矢量,  $h(\alpha, \beta)$  为粗糙显示屏表面高度涨落函数。散射矢量为

$$\mathbf{q} = \mathbf{k}_o - \mathbf{k}_i = \mathbf{q}_t + \mathbf{q}_z \mathbf{z}, \quad (3)$$

$q_t$  和  $q_z$  分别是  $\mathbf{q}$  横向分量和法向分量大小,其大小分别为

$$q_t = k |\sin \theta_o - \sin \theta_i|, \quad q_z = k (\cos \theta_o + \sin \theta_i), \quad (4)$$

$\theta_i$  和  $\theta_o$  分别是  $\mathbf{k}_i$  和  $\mathbf{k}_o$  对  $z$  轴所张的角。屏幕粗糙度  $\sigma_h$  为

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [h_i(\alpha, \beta) - \langle h(\alpha, \beta) \rangle]^2}, \quad (5)$$

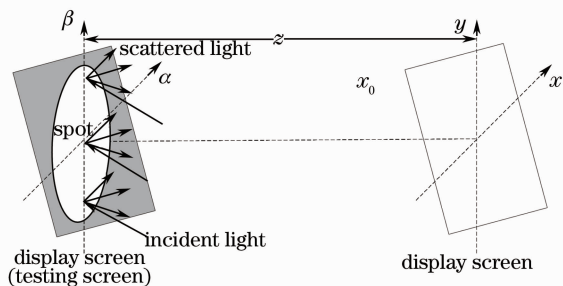


图 1 表面粗糙度测试原理光路

Fig. 1 Geometry for surface roughness measurement of the screen

式中  $n$  为采样数,  $\langle h(\alpha, \beta) \rangle$  是采样面积范围内屏幕表面高度起伏  $h_i(\alpha, \beta)$  的平均高度。

一般情况下因为电荷耦合器件(CCD)或互补金属氧化物半导体(CMOS)探测器在观察面上探测到

的是光强, 而很难直接通过实验得到显示屏表面光场的情况。这里可通过菲涅耳衍射积分将显示屏表面光的复振幅  $a(\alpha, \beta)$  和观察面上光的复振幅  $A(x, y)$  相联系:

$$A(x, y) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left[j \frac{k}{2z}(x^2 + y^2)\right] \iint_{-\infty}^{\infty} a(\alpha, \beta) \exp\left[j \frac{k}{2z}(\alpha^2 + \beta^2)\right] \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda z}(x\alpha + y\beta)\right] d\alpha d\beta, \quad (6)$$

则散斑场  $A(x, y)$  在两点  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$  上的自相关函数  $\Gamma_A$  为

$$\Gamma_A = \overline{A(x_1, y_1)A^*(x_2, y_2)}, \quad (7)$$

将(6)式代入(7)式中, 整理得

$$\Gamma_A(x_1, y_1; x_2, y_2) = \frac{1}{\lambda^2 z^2} \exp\left[j \frac{k}{2z}(x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2)\right] \iint_{-\infty}^{\infty} \iint_{-\infty}^{\infty} \Gamma_a(\alpha_1, \beta_1; \alpha_2, \beta_2) \times \exp\left[j \frac{k}{2z}(\alpha_1^2 + \beta_1^2 - \alpha_2^2 - \beta_2^2)\right] \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda z}(x_1\alpha_1 + y_1\beta_1 - x_2\alpha_2 - y_2\beta_2)\right] d\alpha_1 d\beta_1 d\alpha_2 d\beta_2. \quad (8)$$

式中

$$\Gamma_a(\alpha_1, \beta_1; \alpha_2, \beta_2) = \overline{a(\alpha_1, \beta_1)a^*(\alpha_2, \beta_2)}, \quad (9)$$

是显示屏表面上光场的相关函数, 它由表面高度特性和入射到散射面积上的强度  $I$  决定。由于显示屏表面光场  $a(\alpha, \beta)$  的相关函数显著不为零的区间都很小, 小到这个相关可以用一个  $\delta$  函数来恰当表示:

$$\Gamma_a(\alpha_1, \beta_1; \alpha_2, \beta_2) = |r|^2 I(\alpha_1, \beta_1) \delta(\alpha_1 - \beta_1, \alpha_2 - \beta_2), \quad (10)$$

将(10)式代入(8)式中, 并利用  $\delta$  函数的筛选性质, 则散斑场的归一化振幅相关函数为

$$\mu_A(\Delta x, \Delta y) = \frac{\Gamma_A(\Delta x, \Delta y)}{\Gamma_A(0, 0)} = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} I(\alpha, \beta) \exp\{-j[2\pi/(\lambda z)](\alpha\Delta x + \beta\Delta y)\} d\alpha d\beta}{\iint_{-\infty}^{\infty} I(\alpha, \beta) d\alpha d\beta}. \quad (11)$$

观察面上探测到的散斑图样中强度分布的自相关函数为

$$\Gamma_I(\Delta x, \Delta y) = \overline{I(x_1, y_1)I(x_2, y_2)} = \overline{A(x_1, y_1)A^*(x'_1, y'_1)A(x_2, y_2)A^*(x'_2, y'_2)}, \quad (12)$$

将(6)式和(11)式代入到(12)式中, 整理得

$$\Gamma_I(\Delta x, \Delta y) = \bar{I}^2 [1 + |\mu_A(\Delta x, \Delta y)|^2], \quad (13)$$

式中  $\bar{I}$  是散斑图样的平均强度。

散斑强度的归一化协方差函数与自相关函数的关系为

$$\mu_I(\Delta x, \Delta y) = \frac{\Gamma_I(\Delta x, \Delta y) - \bar{I}^2}{\bar{I}^2}, \quad (14)$$

故

$$\mu_I(\Delta x, \Delta y) = |\mu_A(\Delta x, \Delta y)|^2. \quad (15)$$

## 2.2 角度多样性引入散斑图样退相关程度与屏幕表面粗糙度的关系

观察面上散斑图样强度的变化取决于观察屏上有效表面粗糙度受照明光方向的变化。当照明角度改变  $\Delta\theta_i$  时, 在观察屏上获得的两个散斑场的归一化的交叉相关函数为<sup>[3]</sup>

$$|\mu_A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)|^2 = |M_h(\Delta q_z)|^2 |\psi(\Delta \mathbf{q}_t)|^2, \quad (16)$$

式中  $M_h(\Delta q_z)$  是表面高度涨落  $h$  的一阶特征函数,

取决于表面高度涨落的均方根与波长之比,  $\psi(\Delta \mathbf{q}_t)$  表示入射角或观察角变化时散斑图样的平移。

在自由空间传播透射光路中,  $\psi(\Delta \mathbf{q}_t)$  表示为

$$\psi(\Delta \mathbf{q}_t) = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} I(\alpha, \beta) \exp(-j\Delta \mathbf{q}_t \cdot \boldsymbol{\alpha}_t) d\alpha d\beta}{\iint_{-\infty}^{\infty} |I(\alpha, \beta)|^2 d\alpha d\beta}, \quad (17)$$

式中  $I(\alpha, \beta)$  是散射光斑上的强度分布,  $\boldsymbol{\alpha}_t = (\alpha, \beta)$  表示散射表面上的横坐标,  $\Delta \mathbf{q}_t$  表示散射矢量差的横向分量,  $\Delta q_z$  是同一矢量差的法向分量的大小, 探测器固定在同一方向观察的情况下, 其大小可表示为

$$\Delta q_t = k[\sin(\theta_i + \Delta\theta_i) - \sin \theta_i], \quad (18)$$

$$\Delta q_z = k \left| \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta_i + \Delta\theta_i)} - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i} \right|,$$

式中  $n$  为显示屏材料的折射率,  $\Delta\theta_i$  为入射至显示屏表面照明角的改变。

对一个高度涨落  $h$  为高斯分布的散射表面:

$$|M_h(\Delta q_z)|^2 = \exp(-\sigma_h^2 \Delta q_z^2). \quad (19)$$

若散射光斑是直径为  $D$  的亮度均匀的圆,那么(2)式简化为

$$|\psi(\Delta \mathbf{q}_i)|^2 = \left[ 2 \frac{J_1(D\Delta q_i/2)}{D\Delta q_i/2} \right]^2, \quad (20)$$

式中  $J_1$  是一阶阶次为 1 的贝塞尔函数。将(19)式和(20)式代入(16)式中,发现归一化散斑场的协方差  $\mu_A$  主要取决于两个散斑图样的平移因子  $|\Psi|^2$ 。若去掉两个散斑图样之间的平移分量之后使它们相关,那么两个散斑场的相关为

$$|\mu_A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)|^2 = |M_h(\Delta q_z)|^2 = \exp\{-\{2\pi \frac{\sigma_h}{\lambda} [\sqrt{n^2 - \sin^2(\theta_i + \Delta\theta_i)} - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}]\}^2\}. \quad (21)$$

散斑相关性对入射角的变化相当敏感,对于很小的  $\Delta\theta_i$ , (21)式中散斑场的相关近似为

$$|\mu_A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)|^2 \approx \exp\left[-\left(2\pi \frac{\sigma_h}{\lambda} \Delta\theta_i \frac{\sin \theta_i}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}}\right)^2\right]. \quad (22)$$

在自由空间传播反射光路中,有

$$\Delta q_z = k |\cos(\theta_i + \Delta\theta_i) - \cos \theta_i| \approx -k \Delta\theta_i \sin \theta_i, \quad (23)$$

将(23)式代入到(19)式和(16)式中,有

$$|\mu_A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)|^2 \approx \exp\left[-\left(2\pi \frac{\sigma_h}{\lambda} \Delta\theta_i \sin \theta_i\right)^2\right]. \quad (24)$$

将(22)式或(24)式代入(15)式中整理后可知,当激光以初始角  $\theta_i$  照射屏幕,照明角度改变  $\Delta\theta_i$  时,由 CCD 探测器捕获角度改变前后屏幕上的两个散斑图样,通过计算不同角度改变量  $\Delta\theta_i$  所对应的这两个散斑图样的归一化协方差函数,得到它们之间的函数关系,由此可知显示屏幕表面的粗糙度  $\sigma_h$ :

$$\mu_I \approx \exp\left[-\left(2\pi \frac{\sigma_h}{\lambda} \frac{\sin \theta_i}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta_i}} \Delta\theta_i\right)^2\right], \mu_T \approx \exp\left\{-\left[\left(2\pi \frac{\sigma_h}{\lambda} \sin \theta_i\right) \Delta\theta_i\right]^2\right\}. \quad (25)$$

设定入射光波长  $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$ , 被测显示屏上的入射光束角度变化步长为  $\Delta\theta_i = 0.01^\circ$ , 屏幕材料的折射率  $n = 1.56$ , 选择了 3 种表面粗糙度  $\sigma_h$  分别为 10, 30 和 50  $\mu\text{m}$ , 入射角度  $\theta_i = 1^\circ$  和  $5^\circ$ , 分别在反射和透射两种情况下,根据(25)式进行了仿真,结果如图 2 所示。图 2 中实线对应显示屏反射情况,虚线对应显示屏透射情况。图 2 中的仿真结果表明:在各参数完全相同的情况下,反射的显示屏对入射角的变化比透射的显示屏更敏感(见图 2 中实线与虚线);表面粗糙度越小,这种敏感程度体现越明显(见图 2 中对应于  $\sigma_h = 10 \mu\text{m}$  的黑色实线与虚线);

在反射或透射情况下,要使两个散斑图样退相关,较大表面粗糙度的显示屏要求的入射角变化较小,也就是表面粗糙度大的显示屏更容易实现激光图样的退相关。比较图 2(a)和(b)的结果可知,初始入射角较大的情况能以更小的角度变化实现散斑图样的退相关。但过大的入射角对角度变化的敏感会使测试过程中采样数据大幅度减少,影响表面粗糙度的测试精度,而入射角过小,一定量的采样数据能保证,但它对角度变化的迟钝又会大大增加测试工作量。

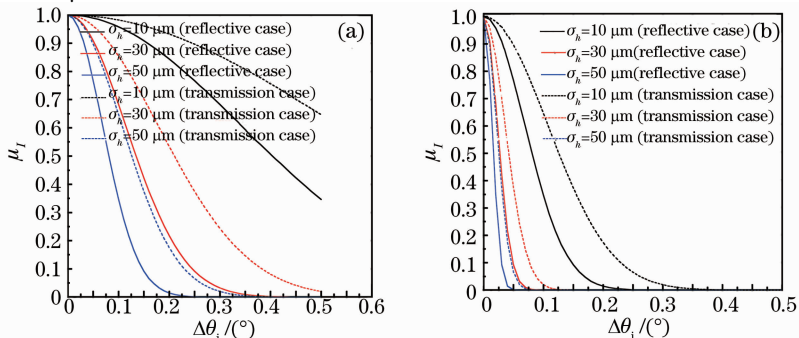


图 2 散斑图样的强度相关  $\mu_I$  作为照明角变化  $\Delta\theta_i$  和表面粗糙度的函数。(a)  $\theta_i = 1^\circ$  的情况; (b)  $\theta_i = 5^\circ$  的情况

Fig. 2 Speckle intensity covariance  $\mu_I$  versus angle change  $\Delta\theta_i$  for different surface roughnesses. (a)  $\theta_i = 1^\circ$ ; (b)  $\theta_i = 5^\circ$

### 3 测试平台

根据投影屏幕表面粗糙度测量原理搭建的实验平台如图 3 所示。光源采用的是功率为 32 mW、波长为 532 nm 的固态绿色激光器,经扩束镜扩束后的光束由光阑将其在反射镜上的光斑直径控制在 5 mm,光束被旋转平台上的反射镜改变方向后通过焦距为 30 cm 的透镜收集。调整透镜使反射镜上的光斑在透镜的前焦面上,光斑的发射光束垂直通过透镜的中心,根据权衡各种参数对屏幕表面粗糙度测试的影响,实验中采用  $\theta_i = 1^\circ$  的入射角照射后焦平面上的被测显示屏,经被测显示屏散射的光在自由空间中传播,由距离被测屏 30 cm 处的空间分辨率为  $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 、单个像素大小为  $5.6 \mu\text{m} \times 5.6 \mu\text{m}$  的 CCD (Texas Instruments DMK-21BU04) 探测面接收。实验平台中采用旋转反射镜的方式进而改变照射到屏幕表面的入射角,这样可以保证观察角度基本不变。测试距离 30 cm,可保证 CCD 上散斑大小能清晰识别,因为散斑颗粒的平均大小为  $S_{\text{speckle}} = 1.22\lambda z/D = 1.22 \times 0.532 \times 300/5 = 38.94 \mu\text{m}$ ,即  $38.94/5.6 \approx 10 \text{ pixel}$ 。

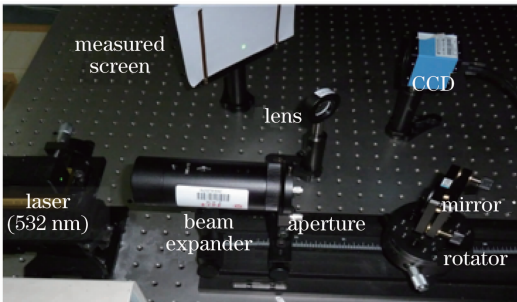


图 3 表面粗糙度测量平台

Fig. 3 Experimental setup of surface roughness measurement

### 4 结果分析与讨论

实验中对常用做投影显示屏或用于测试消散斑器件的屏幕,包括普通打印纸、PVC 树脂屏、PMMA 散射屏和玻璃散射屏等 4 种材质的屏幕进行了测试。其中前两种屏幕是在反射条件下进行测试的,后两种屏幕是在透射条件下进行测试的。反射镜在旋转平台的带动下使照射被测屏的入射角以  $0.0038^\circ$  在变化,角度每改变一次,CCD 就捕获一帧散斑图样,在改变  $0.12^\circ$  的范围内,CCD 共捕获 30 帧散斑图样。对这 4 种测试屏幕所对应的第一帧散斑图样与其他各帧散斑图样之间的相关性进行了计算,屏上照射角度变化与相关系数之间关系如

图 4 中虚点所示。

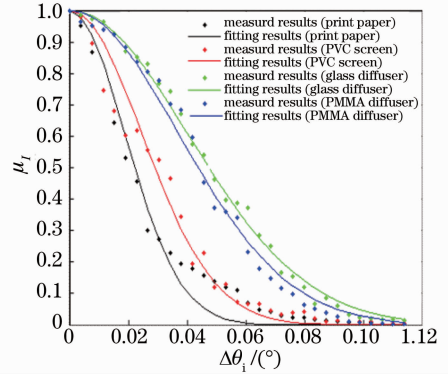


图 4 对于不同被测屏幕,照明角变化  $\Delta\theta_i$  与散斑图样的强度相关  $\mu_I$  的函数关系 ( $\theta_i = 1^\circ, \Delta\theta_i = 0.0038^\circ$ )

Fig. 4 Dependence of speckle intensity covariance  $\mu_I$  on angle change  $\Delta\theta_i$  for different measured screens ( $\theta_i = 1^\circ, \Delta\theta_i = 0.0038^\circ$ )

利用图 4 中的实验结果运用式:  $\mu_I = \exp(-\alpha^2 \Delta\theta_i^2)$  进行样条插值拟合,拟合结果增加在图 4 中实线部分,拟合误差由  $\mu_{\text{Error}} = \text{argmin} \|\mu_{\text{Im}} - \mu_{\text{If}}\|_2$  优化得到,分别为 0.05616、0.05545、0.0225 和 0.03436,其中  $\mu_{\text{Im}}$  和  $\mu_{\text{If}}$  分别为测试结果和相对应的拟合值,  $\|\cdot\|_2$  为 2 范数。由此可得普通打印纸、PVC 树脂屏、玻璃散射屏和 PMMA 散射屏等 4 种材质的最优拟合参数  $\alpha$  分别为:52.59、44.16、19.01 和 17.56,根据 (25) 式,前两个屏幕的粗糙度可由  $\alpha = 2\pi\sigma_n \sin \theta_i / \lambda$  计算得到,而后两个屏幕折射率分别为 1.5 和 1.56,粗糙度由  $\alpha = 2\pi\sigma_n \sin \theta_i / (\lambda \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i})$  得到,即这 4 种材质屏幕的表面粗糙度分别为 255.16、214.24、132.89 和 138.33  $\mu\text{m}$ 。误差结果表明,相对比较薄和软的测试屏幕(打印纸屏和 PVC 树脂屏)的表面粗糙度的测量误差相对大一些,这主要是它们更容易受外界因素的微扰,而这种微扰会使测试过程中获得的相邻两散斑图样的相关性急剧变弱,从而导致了测试屏幕对角度变化更加敏感。

为了提高该方法抗外界干扰的能力和测量的准确性,在屏幕上面积为  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$  的区域上对称选择了 9 个测试子区域进行相同方法的测试,测试结果如表 1 所示。通过对这 9 组数据拟合获得屏幕表面粗糙度并求取平均值,最后得到这 4 种材质屏幕的表面粗糙度分别为 235.80、209.57、132.24 和 137.60  $\mu\text{m}$ 。

表 1 不同屏幕上 9 个子区域的粗糙度测量结果  
Table 1 Measured results of surface roughness in 9 sub-regions for different screens

Measured regions	Surface roughness $\sigma_h/\mu\text{m}$			
	Print paper	PVC	Glass diffuser	PMMA diffuser
1	255.16	214.24	132.89	138.33
2	205.58	196.32	132.89	138.33
3	236.41	207.32	132.56	137.83
4	223.78	210.98	131.83	138.02
5	243.24	208.34	132.22	137.67
6	230.52	211.67	131.88	136.48
7	247.97	215.01	131.49	137.9
8	238.65	213.67	132.4	136.74
9	240.85	208.57	131.96	137.08
Mean value	235.80	209.57	132.24	137.60

## 5 结 论

运用角度多样性原理证实了可根据散斑图样之间的相关性正确测试投影显示屏幕表面粗糙度的有效性。在实际测量过程中,为了避免外界扰动和表面平度不均匀的影响,对被测显示屏幕分别选择了不同子区域进行重复测试,通过多组数据的平均提高屏幕测量的精度。一般情况下用做投影屏幕的表面粗糙度相对较大,在测试过程中应选取较小的入射角或较大的角度变化量。投影显示屏幕表面粗糙度的正确测试与确定,对角度多样性应用于激光投影系统中散斑的抑制具有重要意义。

## 参 考 文 献

- 1 T Yoshimura, K Kato, K Nakagawa. Surface-roughness dependence of the intensity correlation functions under speckle-pattern illumination [J]. J Opt Soc Am A, 1990, 7 (12): 2254-2259.
- 2 F Riechert, F Glöckler, U Lemmer. Method to determine the speckle characteristics of front projection screens[J]. Appl Opt, 2009, 48(7): 1316-1321.
- 3 J W Goodman. Speckle Phenomena in Optics theory and Application[M]. Englewood: Roberts and Company Publishers, 2007.
- 4 A M Hamed, H El-Ghandoor, F El-Diasty, et al.. Analysis of speckle images to assess surface roughness[J]. Opt & Laser Technol, 2004, 36(3): 249-53.
- 5 B Dhanasekar, N K Mohan, B Bhaduri, et al.. Evaluation of surface roughness based on monochromatic speckle correlation

- using image processing [J]. Precision Eng, 2008, 32 (3): 196-206.
- 6 H El-Ghandoor, M Saady, A Ashour. Analysis of surface roughness using laser optical imaging techniques[J]. J Mater Sci & Eng B, 2012, 2(1): 7-15.
- 7 C J Tay, S H Wang, C Quan, et al.. In-situ surface roughness measurement using a laser scattering method[J]. Opt Commun, 2003, 218(1-3): 1-10.
- 8 G Y Tian, R S Lu, D Gledhill. Surface measurement using active vision and light scattering[J]. Opt & Lasers in Eng, 2007, 45 (1): 131-139.
- 9 H Y Kim, Y F Shen, J H Ahn. Development of a surface roughness measurement system using reflected laser beam[J]. J Mater Process Technol, 2002, 130-131: 662-667.
- 10 K Leonhardt, H J Tiziani. Removing ambiguities in surface roughness measurement [J]. Optica Acta, 1982, 29 (4): 493-499.
- 11 Liu Hengbiao, Liu Chenglin. Experimental research on surface roughness measurement using angular-speckle correlation [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 697-701.
- 刘恒彪, 刘成林. 角度散斑相关方法表面粗糙度测量实验[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 697-701.
- 12 Zhang Jianwei, Yuan Zongheng, Zhang Yanhua. Analysis on large radius of curved surface roughness trichromatic laser speckle autocorrelation measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(1): 010301.
- 张建伟, 袁纵横, 张艳华. 三色激光散斑自相关法测量表面粗糙度的分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(1): 010301.
- 13 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.

栏目编辑:何卓铭