

密级:_____



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

激光显示中的散斑测量、评价与消除

作者姓名: _____ 袁园 _____

指导教师: _____ 毕勇 研究员 _____

_____ 中国科学院理化技术研究所 _____

学位类别: _____ 理学博士 _____

学科专业: _____ 光学 _____

培养单位: _____ 中国科学院理化技术研究所 _____

2019 年 06 月

Speckle measurement, evaluation and reduction in laser display

**A Dissertation Submitted to
The University of Chinese Academy of Sciences**

In partial fulfillment of the requirement

For the degree of

Doctor of Science

in Optics

By

Yuan Yuan

Supervisor: Professor Yong Bi

Technical Institute of Physics and Chemistry

Chinese Academy of Sciences

June 2019

中国科学院大学 研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：袁园
日期：2019.5.24

中国科学院大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：袁园	导师签名：毕凡
日期：2019.5.24	日期：2019.5.24

摘 要

激光显示是以红(R)、绿(G)、蓝(B)三基色(或多基色)激光为光源的新型显示技术,通过控制三基色激光强度比、总强度和强度空间分布即可实现彩色图像显示。激光具有方向性好、单色性好和亮度高三个基本特性,因此,激光显示技术具有高亮度、高清晰度和宽色域的优点,是唯一能够实现 BT2020 超高清电视标准的显示技术。同时,激光显示具有功耗小,寿命长等优点,特别是采用反射式成像,与自然万物反射光成像进入人眼原理相同,观看舒适度好,具有护眼功能。

激光光源固有的相干属性使激光显示画面存在散斑现象,隐藏了图像的细节信息,干扰了人眼获取图像的能力。本论文围绕激光散斑问题,重点研究了模拟人眼的散斑测量、散斑评价以及散斑消除等亟待解决的关键问题,获得的主要创新成果如下:

1. 结合散斑的影响因素和人眼生物学特征,首次搭建了一套与人眼生物学特征高度匹配的散斑测量系统,并实现了系统的自动化设计,可一键式采集/处理数据,初步解决了现有散斑测量方法测试结果与人眼主观感知不一致的问题。
2. 在分析散斑对比度对于散斑特性评价的优缺点的基础上,首次提出了散斑影响度的评价新方法,该方法可以全面评价像素关联、灰度涨落和图像清晰度对人眼感知散斑图像的影响。
3. 系统研究了不同掺 Ce 浓度,不同厚度的 Ce:YAG 透明陶瓷的荧光特性和温度特性,获得了最高转换流明为 2690 lm 的 Ce:YAG 陶瓷样品,并将其应用于激光显示整机中,得到了很好的散斑消除效果。
4. 基于运动散斑在时间序列上叠加抑制散斑的原理,系统研究了声波振幕、框架振幕和贴片电机振幕频率与散斑对比度的关系,以及对应的振源功耗和噪声,验证了贴片电机不仅可完全消除散斑,而且对应功耗低(1.51W),噪声小(43.1dB)。

关键词: 激光显示, 激光散斑, 人眼生物学特征, 散斑测量, 散斑评价, 散斑抑制, Ce:YAG 陶瓷, 振幕

Abstract

Laser display is a new display technology which employs three primary (or multi-primary) lasers (red, green and blue) as light source, and it achieves the colorful display by controlling the intensity ratio, total intensity and spatial distributing intensity of three primary lasers. Because of laser's good advantages of orientation, monochromaticity and brightness, laser display has the features of high luminance, high resolution and large gamut, being the only technology that can realize the BT2020 UHD TV standard. Meanwhile, laser display has the features of low power consumption and long lifetime. Especially, Laser display has good viewing comfort and eye protection function since it has the same principle as natural reflection imaging into human's eyes.

The inherent coherence of laser makes the image displayed with laser speckle, which hides the details of the image, and interferes with the ability of the human eye to acquire the image. This dissertation is focusing on laser speckle problem, and mainly explores the speckle measurement, speckle evaluation and speckle elimination based on human visual perception, which are the key issues to be solved. The main innovative achievements are as follows:

1. Based on the factors that affect speckle and the biological characteristics of human eyes, we build a speckle measurement system that closely matches the biological characteristics of human eyes for the first time. And it can automatically acquire/process images. This study preliminarily solves the inconsistency between existing speckle measuring methods and human visual perception.

2. On the analysis of the advantages and disadvantages of speckle contrast in characterizing speckle, we establish a new method, speckle influence degree, for speckle evaluation. This metric could comprehensively evaluate the effects of pixels' correlation, intensity fluctuation and image resolution on human visual perception of speckles.

3. We systemically investigate the luminescent and thermal properties of Ce:YAG transparent ceramics, with different Ce doping concentration and thickness, obtaining the ceramic samples with a maximum conversion lumen of 2690 lm. Then, the samples are applied into laser TV and has a good performance in reducing speckle.

4. On the principal of superposition of moving speckles in time to reduce speckle, we studied the speckle contrast as a function of vibrating frequency, power consumption and noise when acoustic vibrating screen, frame vibrating screen and patch motor vibrating screen work, which concludes that patch moter could compeletly remove speckle and has low power consumption (1.51W) and noise (43.1dB).

Keywords: Laser Display, Laser speckle, Biological characteristics of human eyes, Speckle measurement, Speckle evaluation, Speckle reduction, Ce:YAG ceramics, Vibrating screen.

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
目 录.....	V
第 1 章 研究背景	1
1.1 激光显示的研究现状.....	1
1.2 激光散斑的研究现状.....	3
1.2.1 激光散斑测量方法.....	3
1.2.2 激光散斑评价方法.....	5
1.2.3 激光散斑消除方法.....	5
1.3 本论文的主要研究内容.....	6
第 2 章 激光散斑	9
2.1 散斑的产生与表现.....	9
2.2 散斑的研究历史.....	12
2.3 散斑的分类.....	12
2.4 散斑的尺寸.....	14
2.5 散斑（对比度）的影响因素.....	17
2.5.1 散斑的产生过程对散斑（对比度）的影响.....	17
2.5.1.1 激光光源对散斑（对比度）的影响.....	17
2.5.1.2 光纤对散斑（对比度）的影响.....	19
2.5.1.3 运动散射片对散斑（对比度）的影响.....	21
2.5.1.4 屏幕对散斑（对比度）的影响.....	22
2.5.2 测量系统的参数设置对散斑（对比度）的影响.....	26
2.5.2.1 入射光光强对散斑（对比度）的影响.....	26
2.5.2.2 散斑尺寸对散斑（对比度）的影响.....	27
2.5.2.3 成像镜头数值孔径对散斑（对比度）的影响.....	29
2.5.2.4 成像镜头 F 数对散斑（对比度）的影响	31
2.5.2.5 成像镜头的聚焦程度对散斑（对比度）的影响.....	33
2.5.2.6 CCD 曝光时间对散斑（对比度）的影响	34

2.6	散斑抑制方法.....	36
2.7	本章小结.....	37
第 3 章	基于人眼生物学特征的散斑测量	39
3.1	人眼生物学特征.....	40
3.1.1	人眼生理学结构.....	40
3.1.2	人眼的分辨能力.....	41
3.1.3	人眼的成像过程与光学传递函数.....	42
3.2	模拟人眼的散斑测量系统.....	43
3.3	测试 EM-MSM 器件抑制散斑的效果.....	47
3.3.1	EM-MSM 器件.....	47
3.3.2	EM-MSM 器件抑制散斑.....	49
3.4	本章小结.....	52
第 4 章	模拟人眼主观视觉的散斑评价	53
4.1	散斑图像中的其他噪声.....	53
4.1.1	非均匀背景光的消除.....	53
4.1.2	周期噪声的消除.....	55
4.2	结构偏离度(structure deviation degree, SDD)评价散斑	58
4.2.1	SDD 理论分析.....	58
4.2.2	实验装置.....	60
4.2.3	实验结果与讨论.....	61
4.3	散斑影响度(speckle influence degree, SID)评价散斑.....	70
4.3.1	SID 理论分析	71
4.3.2	结果与讨论.....	73
4.4	本章小结.....	78
第 5 章	Ce:YAG 透明陶瓷的荧光特性及其消除散斑的应用研究 ..	79
5.1	Ce:YAG 透明陶瓷材料.....	80
5.1.1	YAG 透明陶瓷的物理特征	80
5.1.2	Ce:YAG 透明陶瓷的制备.....	81
5.1.3	Ce:YAG 透明陶瓷的光学特性.....	82
5.2	蓝光激发 Ce:YAG 透明陶瓷的荧光特性研究.....	83
5.2.1	实验方案.....	83

5.2.1.1	实验装置.....	83
5.2.1.2	蓝光激光器 (blue laser diode, blue LD)	84
5.2.1.3	温控系统.....	85
5.2.2	蓝光激发 Ce:YAG 透明陶瓷的荧光特性.....	89
5.2.2.1	Ce ³⁺ 浓度对发光特性的影响	90
5.2.2.2	厚度对发光特性的影响.....	92
5.2.2.3	温度对发光特性的影响.....	93
5.2.3	小结.....	94
5.3	Ce:YAG 透明陶瓷消除散斑.....	94
5.3.1	实验方案设计.....	95
5.3.2	Ce:YAG 陶瓷消散斑测试结果	95
5.4	本章小结.....	97
第 6 章	振动屏幕消除散斑	99
6.1	实验装置.....	99
6.2	三种振幕方式消除散斑.....	102
6.2.1	声波振动.....	102
6.2.2	框架振动.....	103
6.2.3	贴片电机振动.....	104
6.3	本章小结.....	106
第 7 章	总结	107
第 8 章	博士期间的其他工作	109
8.1	电子纸显示.....	109
8.2	三维显示.....	110
参考文献		113
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果		125
致谢		127

第1章 研究背景

1.1 激光显示的研究现状

激光显示技术是继黑白显示、彩色显示和数字显示技术之后的第四代显示技术。其中，黑白显示技术使人类首次看到了动态的视频图像，彩色显示技术解决了视频图像无颜色的问题，数字显示技术解决了视频图像易受干扰、清晰度差的问题，激光显示技术解决了视频图像的大色域和颜色高清问题。

激光显示技术是以红、绿、蓝三基色激光作为光源的显示技术，其工作原理如图 1.1 所示，红、绿、蓝激光分别经过扩束、匀场、消相干后入射到相对应的图像调制器上，经调制后的三色激光由棱镜合色，经过物镜后投射到屏幕上，进而得到激光显示图像[1]。

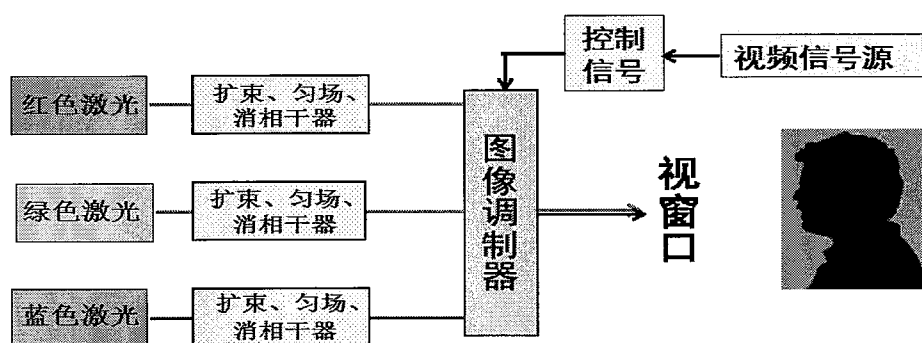


图 1.1 激光显示原理图

Fig. 1.1 The principle of laser display

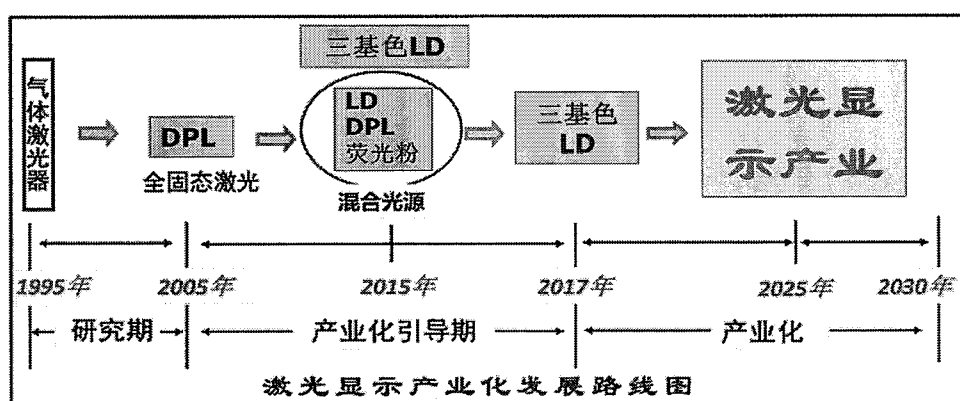


图 1.2 激光显示发展路线

Fig. 1.2 Development route of laser display

激光显示技术经历了 20 多年的研究期和产业引导期后，目前已经进入了产业化阶段，其发展路线图如图 1.2 所示。最初的激光显示光源是气体激光器，具有体积大、耗电高、寿命短、不易实用化等缺点，经过了全固态激光光源和混合光源的过渡期后，随着半导体激光二极管（laser diode, LD）材料和器件技术的发展，尤其是在 2014 年诺贝尔物理学奖“高效蓝色发光二极管”的发明后，目前三基色半导体激光器已经成为了激光显示技术中占主导地位的光源。

三基色 LD 作为显示光源，与其他相干/非相干光源相比，具有电激发、高效率、高偏振度、长寿命、全固态、小型化、频域/空域/时域综合参数易于调控等优势[2]，更重要的是，LD 具有可采用半导体制造工艺实现大规模量产从而降低成本的独到优势，使实现高性价比的激光显示成为现实，进而实现规模化生产，进入寻常百姓家。得益于半导体激光器的优势，激光显示技术具有其他显示技术不可比拟的优点，是目前唯一能够实现 BT2020 标准的显示技术[3]，详情如下：

- （1）色饱和度高——色彩最鲜艳；
- （2）色域大——色彩最丰富（色域覆盖率可达 80%）；
- （3）几何分辨率高——图像最清晰[4]；
- （4）颜色分辨率高——图像最柔美；
- （5）亮度高——大屏幕；
- （6）色温可控——可实现无缝拼接超大屏幕；
- （7）功耗小——比液晶电视节能 50%以上；
- （8）寿命长——可达数万小时；
- （9）体积小、重量轻、价格低——能进入寻常百姓家；

（10）采用反射式成像，与自然万物反射光成像进入人眼原理相同，观看舒适度好，最护眼[5]。

激光显示技术因其独有的优势，已经受到了广泛的关注。海信、长虹、中科极光、晋煤等各大厂商纷纷发布激光显示产品，以期占据国内外市场。各大影院纷纷进行产品升级，打造激光影厅。多地政府采用激光显示技术设计城市景观照明，以凸显城市特色。部队军事作战指挥车逐渐更换为激光投影设备，以提高工作效率。除此之外，激光显示产品在商务会议、教育娱乐和家庭影院等领域也越来越受欢迎。

1.2 激光散斑的研究现状

在激光显示技术中,由于激光光源固有的相干属性,当采用激光作为照明光源投影图像时,激光光束经过粗糙表面散射进入人眼,会导致产生散斑。散斑的存在使图像的强度灰度重新分布,隐藏了图像的细节信息,严重干扰了人眼提取图像信息的能力,甚至引起视觉疲劳[6]。

激光散斑的存在极大限制了激光显示技术的图像质量,只有消除激光散斑,才能使激光显示技术真正实现双高清(颜色、几何)、大色域显示,最终达到BT2020显示标准。当前国内外虽然在散斑消除方面已有很多专利技术基础,但多为微光学器件旋转和屏幕振动消相干技术,在产品层面上的应用较少,且往往未充分考虑激光散斑的结构与人眼的光学成像特征匹配的问题,因此,为了促进激光显示行业的发展,需要结合人眼的生物学特征,深入研究激光散斑问题。

1.2.1 激光散斑测量方法

准确地测量激光散斑需要满足以下两点要求:一,测量系统能有效的模拟人眼生物学特征参数,测量结果与人眼的主观视觉感知一致;二,测量结果不依赖于测试系统。目前国际上还没有形成统一的散斑测量标准,且在大多数散斑文献中未详细阐述散斑的测量过程方法,尤为重要,不同散斑测量方法的散斑测量结果差异性较大,使实验结果缺乏可靠性。因此,深入研究测量散斑的影响因素和测量方法,对于建立模拟人眼的散斑测量行业标准,获取准确的散斑图像,评价散斑抑制方案的有效性等方面都具有重要意义。

下面分别描述单色散斑测量方法和彩色散斑测量方法的研究现状。

1. 单色散斑测量方法

2006年,Goodman J. K 对散斑的产生机制、统计学模拟、散斑抑制的方法原理以及散斑的应用等基础科学问题进行了系统的描述,但未提出一套具体的、标准的散斑测量方法[6]。2011年,Oxide公司研制出了全球第一台散斑测量设备,该设备能够消除背景光和周期噪声对测量结果的影响,并能够计算散斑对比度和散斑颗粒的大小,但是设备售价高昂(~35万人民币),且在实际测量过程中数值变化大,经常出现与人眼主观视觉感知不一致的结果。2012年,Yong Bi等人完成了便携式线阵散斑测量仪器的设计,该仪器可工作在预览模式或者拍照模式,光场强度信息通过屏幕显示,可实时计算散斑对比度,属于嵌入式便携测量设备,

适合在激光显示产品生产或演示现场使用[7]，但是该设备仅能处理散斑图像的一维信息，导致测试结果不完备。2012年，Stijn Roelandt 等人将 CCD 相机的参数设置成与人眼相同，比如分辨尺寸设置为 $4\mu\text{m}$ ，焦距长度设置为 35mm，瞳孔大小设置为 3mm 等 [8]，但是他们未对测试系统的光学传递函数作出测评，忽略了与人眼光学传递函数的匹配度。2013年，Koji Suzuki 等人探究了散斑测量值与观察距离的关系，结论如下：随着观察距离的增加，散斑对比度降低[9]。2014年，Wei-Feng Hsu 等人探究了光强和采样率对散斑图样的影响，结论如下：当散斑图像中的最高灰度值 CCD 饱和值的 1 至 2 倍，且空间采样率大于等于 4 倍的像素尺寸时，可以获得准确的散斑图像[10]。2014年，S.Kubota 设计了模拟 Westheimer 人眼模型光学传递函数（Optical Transform Function, OTF）的成像装置，在影院屏幕亮度下 ($48\text{cd}/\text{cm}^2$)，当光学成像装置的瞳孔大小设置为 1.2mm 时，该装置的 OTF 与 Westheimer 人眼模型的 OTF 一致，证明了该散斑测试装置可模拟人眼捕获图像[11]。2016年，IEC 发布了散斑测量方法标准《IEC 62906-5-2: Optical measuring methods of speckle contrast》，对单色散斑散斑测量时的温度、湿度、测量距离、测试角度、环境亮度、屏幕增益等参数做出了规定[12]。

虽然散斑测量方法和散斑测量设备在逐渐改进完善，但仍经常出现散斑测量结果与人眼感知结果不一致的现象，需要进一步研究与人眼生物学特征高度匹配的散斑测量方法和散斑测量设备。

2. 彩色散斑测量方法

2013年，K. Kuroda 等人提出了彩色散斑理论[13]，并探究了不同散斑对比度的单色散斑在 CIE 1931 色域图上的色度分布，研究发现，完全散射的散斑几乎分布在整個色域空间，但是随着散斑对比度的降低，彩色散斑的分布区域在平均值处缩小到一个较小的区域，该结论表明彩色散斑特征是单色散斑理论与光度学、色度学的结合。2016年，K. Kuroda 等人采用蒙特卡洛模拟算法，利用单色散斑的数据计算彩色散斑在色域图上的分布，研究发现，RGB 三基色对应的单色散斑对比度对彩色散斑在色域空间上的分布有很大影响，比如，即使两种基色的散斑几乎消失，但另一种基色的散斑对比度较高，则综合产生的彩色散斑仍然在色域图上呈现线性扩散[14]。同年，S. Kubota 等人在实验上采用二维色彩分析仪直接测试彩色散斑，测试结果与上述 K. Kuroda 的理论模拟结果一致[15]。2017年，国际电工委员会发布了彩色散斑测量标准：IEC 62906 5-4 《Optical measuring

methods of colour speckle》[16]，但是该标准尚未得到国际上的广泛认可。

到目前为止，关于彩色散斑的研究较少，需要进一步深入研究模拟人眼的彩色散斑测量方法和彩色散斑测量设备。

1.2.2 激光散斑评价方法

在研究激光散斑的过程中，通常采用散斑对比度（speckle contrast, SC）评价散斑[6]，散斑对比度是基于误差敏感的评价方法[17-20]，定义为散斑图像的标准差与平均值的比值。该方法计算简便、物理意义明确，但只能表现散斑图像的灰度涨落幅度，忽略了人眼视觉特性，导致评价结果经常出现与人眼主观感受不一致的情况。因此，需要结合散斑的产生机制、散斑的影响因素和人眼的生物学特征，系统研究人眼感知散斑图像的影响因素和规律，构建散斑评价的新方法。

1.2.3 激光散斑消除方法

依据对激光散斑产生机理的分析，如果将相干光与粗糙屏幕一起使用，散斑现象无法完全消除，但是根据人眼的时间-空间积分特性，当散斑对比度小于某一数值时，人眼将无法识别散斑，该数值称为人眼识别散斑的阈值。人眼积分响应时间通常为~30ms，视网膜的空间分辨率约为 $4\mu\text{m}\times 4\mu\text{m}$ ，因此，如果在人眼有限的时间-空间内产生足够数量的独立散斑图样，当这些独立的散斑图像叠加平均后的散斑对比度小于人眼识别阈值时，人眼将看不到散斑，这就是消除激光散斑的原理，比如，如果 N 个平均强度相等的独立散斑图样叠加取平均值，则散斑对比度将会减小至单个散斑强度的 $1/\sqrt{N}$ 。

为了克服激光散斑对激光显示图像质量的影响，国内外研究机构开展了散斑抑制方法的大量研究[21-29]。散斑抑制方法的原理主要包括减弱时间相干性和减弱空间相干性。

减弱时间相干性抑制散斑方法主要是在时间序列上通过改变散射波的相位来产生足够多的独立散斑图样。1998年，达姆施塔特科技大学的 L. Wang 等人采用旋转的衍射光学元件消除散斑，形成了“沸腾”的散斑图样，达到了抑制散斑的目的[25]。2004年，J.I. Trisnadi 将二进制 Hadamard 矩阵刻成相位板，使用最少的散斑图样数达到了最大程度的散斑抑制[30]。2006年，中科院长春光机所郝丽采用二维扫描复面转镜消除散斑，该转镜采用 60 个扫描镜面，依次改变扫描

镜面反射角度,产生不同的散斑图样,有效地抑制了散斑[31];2007年,又采用超声光栅,使激光束通过因超声波在液体媒介中的传播而形成的“位相光栅”产生不同相位的子光束,形成变化的散斑图样,从而抑制了散斑[32]。2010年,挪威 poLight AS 的 M. N. Akram 采用电控制散射片,将光束分为多个子光束,达到了消除散斑的目的[33]。同年, Xuyuan Chen 等人提出采用动态衍射光栅产生独立散斑图样消除散斑的方法[34],随后进行了 MEMS 扫描镜消除散斑的实验[35]。2012年, Mehta 等人采用振动多模光纤方式消除散斑[36]。同年, Cao Hui 等人制作了随机激光器消除散斑[37]。2014年, N. E. Yu 等人采用加宽光谱的绿光激光器减少散斑[38]。2017年,山西大学全召民采用铁基液晶调制器消除散斑[39],同年,又结合扫描微反射镜和多模光纤消除散斑[40]。

减弱空间相干性的消散斑方法是在空间尺度上增加人眼(或 CCD 相机)的分辨单元内散射波相关宽度的数目,以产生足够多的独立散斑图样。2008年, G. Zheng 等人采用激光器阵列消除散斑,激光器间的角度大于人眼最小分辨角[41]。2009年, Falko Riechert 等人将分散的胶体填充屏幕,利用胶体颗粒的布朗运动来消除散斑[42]。2013年, K. Kong 等人采用九个激光器作为照明光源来消除散斑[43]。2014年,台湾国立大学 Shih-Yu Tu 通过微振屏幕来消除散斑[44]。

在激光显示产品的实际应用时,通常采用多种方法相结合来抑制散斑,但尽管如此,仍然有少数散斑以细沙状存在于投影图像中,因此需要继续探究新的散斑消除方法,以期能够实现高清画质显示。

1.3 本论文的主要研究内容

本论文围绕激光显示中的散斑现象,重点研究了激光散斑的测量、评价与消除等关键问题,结构安排如下:

第一章,介绍了激光显示和激光散斑的研究现状。

第二章,介绍了激光散斑的产生机制和表征方法、散斑的影响因素、散斑抑制方法原理和分类。

第三章,首次搭建了一套与人眼生物学特征高度匹配的散斑测量系统,系统可以自动化控制,可一键式采集/处理数据。

第四章,首次提出了散斑评价新方法:散斑影响度(speckle influence degree, SID),此方法可全面评价像素关联、灰度涨落和图像清晰度对人眼感知散斑图像

的影响。

第五章，系统研究了不同掺 Ce 浓度、不同厚度的 Ce:YAG 透明陶瓷的发光特性和温度特性，获得了最高转换流明为 2690lm 的 Ce:YAG 陶瓷样品，并将其应用于激光显示整机中，得到了很好的散斑消除效果。

第六章，系统研究了声波振幕、框架振幕和贴片电机振幕的振动频率与散斑对比度的关系，并分析了三种不同方法的功耗和噪声性能，结论是贴片电机振幕方法不仅可完全消除散斑，且功耗和噪声最小。

第七章，进行了全文总结和展望。

第八章，介绍了博士期间的其他工作。

第2章 激光散斑

2.1 散斑的产生与表现

1801 年, 托马斯·杨巧妙地把单个波阵面分解为两个波阵面, 以使两个波阵面的相位差恒定, 在接收面发现了亮暗相间的条纹, 第一次在实验室观察到了光的干涉现象[45]。杨氏双缝干涉实验的实验原理如图 2.1 所示, 光源发射的光波经过两个狭缝出射后传输至接收面, 两个狭缝出射的光波复分量分别为 $U_1(P)$ 和 $U_2(P)$, 则 P 点处的总强度为,

$$I(P) = I_1(P) + I_2(P) + 2\sqrt{I_1(P)I_2(P)} \cos \delta \quad \dots (2.1)$$

其中, $I_1(P)$ 为 P_1 点发射的光波传输至 P 点的强度, $I_2(P)$ 为 P_2 点发射的光波传输至 P 点的强度。式中第三项, 也即交叉项, 导致了干涉条纹的产生[46]。

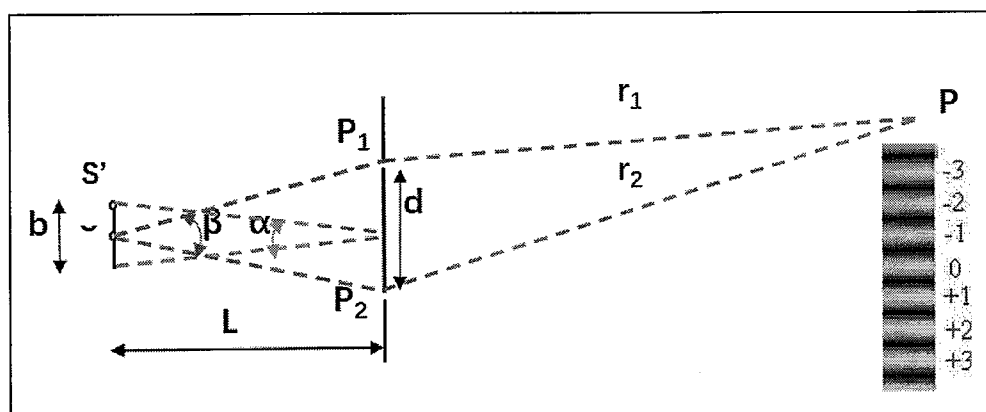


图 2.1 杨氏双缝干涉

Fig. 2.1 Young's double-slit interference

散斑与杨氏干涉条纹产生的物理原理一致, 都是由激光的相干性导致的。但是, 由于相互干涉的子光束数量和波前形状的不同, 两者具有不同的强度分布。可以认为, 杨氏干涉条纹是散斑图样的极简形式。

图 2.2 描述了激光散斑的产生。相干光束照射到表面粗糙的屏幕上产生散射, 每个散射点作为一个次级光源发射球面波到自由空间 (图 2.1(b)), 最终被人眼或 CCD 接收, 次级光源的干涉形成了颗粒状噪点, 这些颗粒状噪点被称为散斑 [6, 47-49]。

散斑可以模拟为随机相量和, 可以表示为, $A_m = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_n e^{i\phi_n}$, 其中, A_m 代表观测点处第 m 个球面波的光场, a_n 为 n 个贡献复合相量中第 n 个相量的长度,

φ_n 为它的相位。假设观测点处第 m 个和第 n 个球面波叠加，那么观测点处的光强为，

$$I^2 = A_m^2 + A_n^2 + 2A_m A_n \cos \varphi_n \quad \dots (2.2)$$

从式中可以看出，观测点出的强度表示为光波振幅的平方与交叉项之和。与式 (2.1) 形式一致，散斑图样中的亮暗分布取决于交叉项。

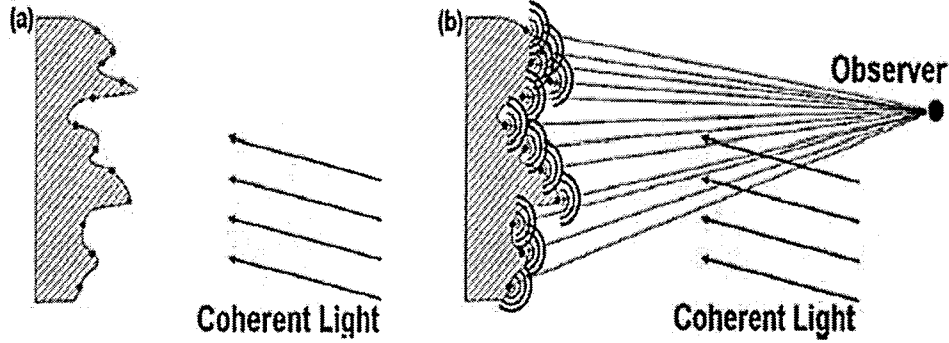


图 2.2 散斑的产生：(a) 屏幕表面的每一点被视为次级光源，该点散射后形成球面波，(b) 观察点处的光场可模拟为准随机相量和 [50]

Fig. 2.2 Illumination of speckle emergence: (a) each point of the surface can be seen as a secondary source, emitting a spherical wave, (b) the field in the observation point can be molded as quansi-random phasor sum [50]

下面介绍不同激光器产生的散斑图像，使我们对散斑有一个直观的了解。图 2.3 为全固态激光作为照明光源产生的散斑图像。图 2.4 为红、绿、蓝半导体激光器作为照明光源产生的散斑图像，第一列为单色散斑图像，第二列为对应的灰度图，第三列为散斑灰度图像的切面图。从图 2.3 和图 2.4 中，可以看到非常明显的颗粒状散斑噪声，图 2.3 中全固态激光器产生的散斑比图 2.4 中半导体激光器产生的散斑更为明显，这是因为全固态激光器的线宽较窄 ($\sim 0.1\text{nm}$)，而半导体激光器线宽较宽 ($3\text{--}5\text{nm}$)，线宽越窄的激光器相干长度越长，越容易产生散斑。除此之外，从图 2.3 中还可以看出，虽然 RGB 三基色半导体激光器的线宽几乎相同，但绿光散斑最为明显，这是人眼的视敏特性导致的，人眼对绿光最敏感。所以在研究散斑消除方案时，通常以绿色散斑图像作为分析对象。

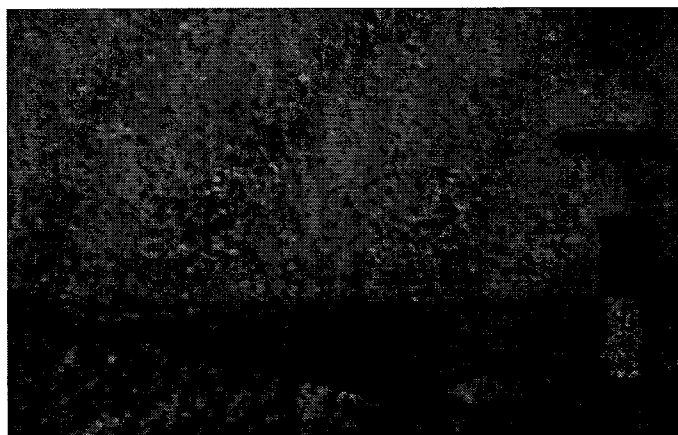


图 2.3 全固态激光器产生的散斑图像

Fig. 2.3 Laser speckle image

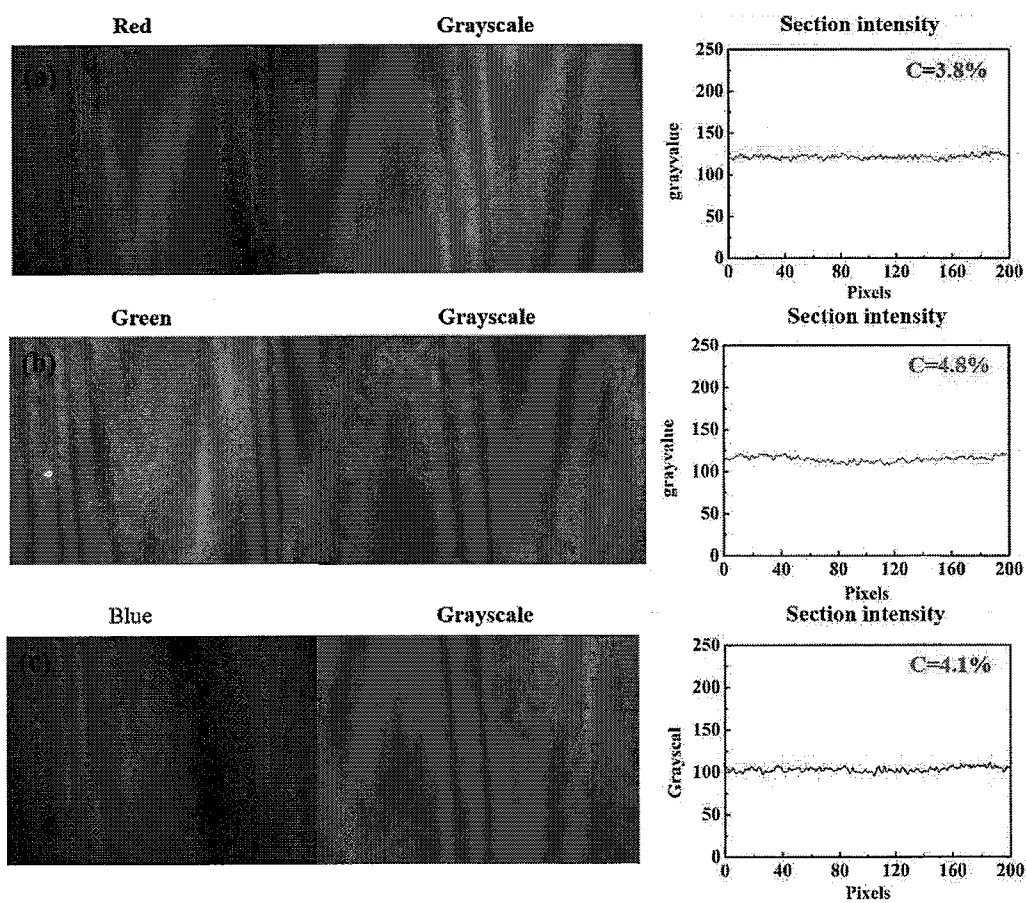


图 2.4 半导体激光器产生的散斑图像。(a)红色半导体激光, (b)绿色半导体激光器, (c)蓝色半导体激光器产生的彩色散斑图样、对应的灰度图以及散斑图样的切面图

Fig. 2.4 Colorful speckle image generated by (a) Red LD (laser diode), (b) Green LD, (c) Blue LD, its corresponding gray image and distribution of sectional intensity

2.2 散斑的研究历史

1855 年, F. Arago 分析了恒星闪烁的现象, 认为恒星产生闪烁的原理如下: 恒星发射的光在穿过地球大气层后才能够达到地球地表, 由于大气并不稳定, 其密度、湿度和温度都在随时变化, 导致原本直线传播的稳定光线在经过不同折射和不同路径后才能进入人眼, 因为光的干涉, 使人眼感知到不规则的强度起伏, 产生闪烁[51], 该原理与“大气散斑”原理基本一致, 被认为是历史上第一次对散斑现象的研究。1877 年, Exner 在研究相干光束在随机粗糙表面散射产生的 Fraunhofer 环时, 发现了细沙状颗粒结构, 其认为, 这是由于大量相干光束叠加导致的在局部空间上的剧烈光强起伏[52]。1914 年–1916 年, von Laue 对相干光束叠加产生的强度起伏进行了理论分析, 计算了强度概率密度函数和强度联合密度函数。1916 年–1918 年, de Haas, Raman 和 Buchwald 分别对散斑现象进行了理论分析和实验研究[53]。1943 年, Ramachandran 在实验上验证了连续环状分布的散斑强度符合 Rayleigh 统计分布[53]。1960 年, 休斯实验室的 Maiman 研制出世界上第一台激光器, 随后, 散斑问题再次被关注, 并逐渐成为研究热点。1962 年, Rigen 和 Gordon 首次发布了激光散斑图像。1963 年, Langmuir, Allen, Goodman 和 Oliver 等人对散斑进行了研究, 最具有代表性的工作为 Goodman 著作的《Speckle Phenomena in Optics : Theory and Application》[6], 此书系统地描述了散斑现象, 分析了散斑形成的原因, 讨论了抑制散斑的方法, 为散斑研究奠定了理论基础。

2.3 散斑的分类

按照 CCD 记录图像的方式, 可以将散斑分为客观散斑和主观散斑: 如图 2.5 所示[54], 当使用不含成像镜头的 CCD 捕获图像时, 产生的散斑称为客观散斑; 如图 2.6 所示[54], 当使用含有成像镜头的 CCD 捕获图像时, 产生的散斑称为主观散斑。主观散斑又分为直接散斑、投影散斑和屏幕散斑[54]: 当投影系统产生的图像直接被人眼或 CCD 相机接收时, 产生的散斑称为“直接散斑”; 当投影系统将图像投影到屏幕上时, 产生的散斑称为“投影散斑”; 当投影散斑经过屏幕再次散射进入人眼或 CCD 相机时, 产生的散斑称为“屏幕散斑”。如图 2.7 所示, 实际情况中, 我们用眼睛或带有成像镜头的 CCD 从屏幕获取图像信息, 产生的散斑为屏幕散斑。

按照相互干涉的球面波的光学特性,可以将散斑分为完全散射散斑、部分散射散斑、部分偏振散斑以及复合散斑:相位在 $(-\pi, \pi)$ 区间内呈均匀分布的多个球面子波相幅矢量叠加时,产生的散斑称为“完全散射(fully developed)散斑”;相位在 $(-\pi, \pi)$ 区间内呈非均匀分布的多个球面子波相幅矢量叠加时,产生的散斑称为“部分散射散斑”;既有垂直偏振分量又有水平偏振分量的多个球面子波相幅矢量叠加时,产生的散斑称为“部分偏振散斑”;当相干光波经过两次或两次以上散射时(散斑的散斑),产生的散斑称为“复合散斑”[6]。

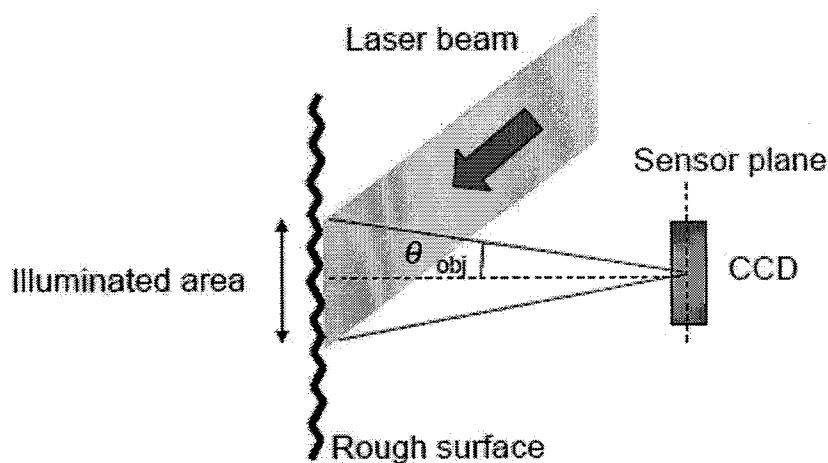


图 2.5 客观散斑的形成机制[54]

Fig. 2.5 Optical configuration to detect a structure of objective speckle[54]

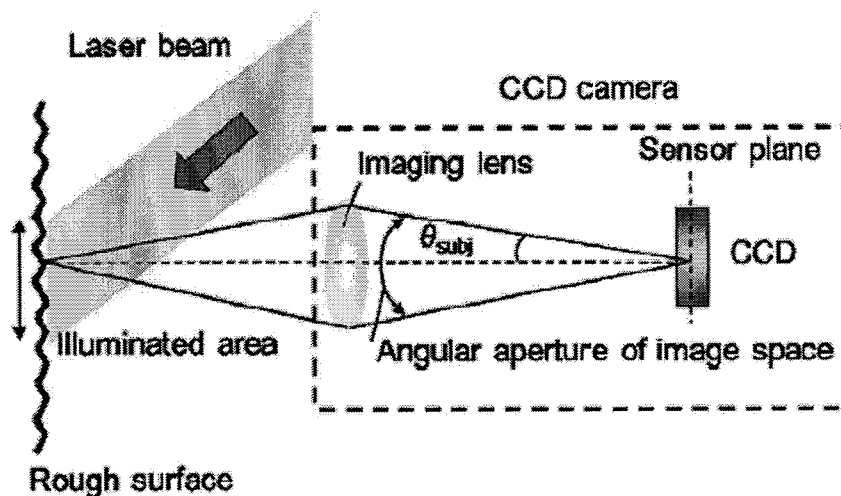


图 2.6 主观散斑的形成机制[54]

Fig. 2.6 Optical configuration to detect a structure of subjective speckle[54]

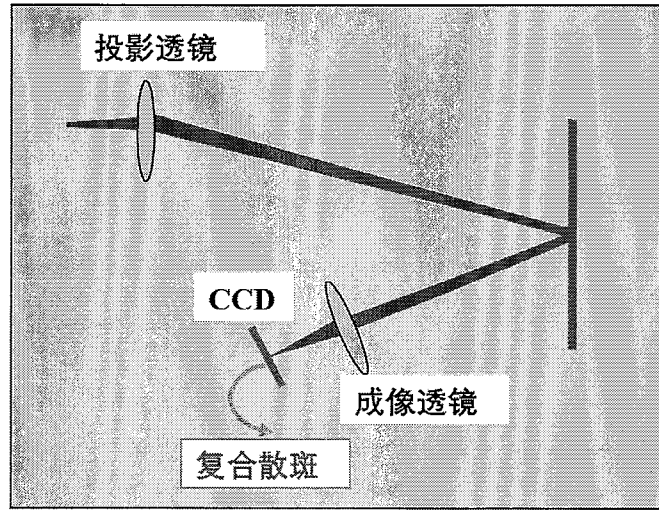


图2.7 完全散射散斑和复合散斑（散斑的散斑）的产生机制

Fig. 2.7 The mechanism of fully developed speckle and compound speckle (speckled speckle)

2.4 散斑的尺寸

在散斑的统计学性质中，散斑尺寸是一个非常关键的参数，它既代表了散斑图像中像素间的关联，又是设置 CCD 相机空间采样率时的重要参考指标。

下面以主观散斑为例，分析散斑尺寸的推导过程。如图 2.8 所示，屏幕上的点 $a(\alpha, \beta)$ 经过透镜成像至点 $A(x, y)$ ，根据菲涅尔衍射定律，像点与物点的关系为，

$$A(x, y) = \frac{\exp(j\frac{\pi}{\lambda f}(1 - \frac{z}{f})(x^2 + y^2))}{\lambda f} \iint a(\alpha, \beta) \exp[-j\frac{\pi}{\lambda f}(\alpha x + \beta y)] d\alpha d\beta \quad \dots (2.3)$$

式中， λ 为光源波长， z 为屏幕与透镜之间的距离， f 为透镜的焦距。若采用点扩散函数 k 表示光波传输过程，则像点与物点的关系可表示为，

$$A(x, y) = \iint k(x - \alpha, y - \beta) a(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad \dots (2.4)$$

可以从成像光波叠加的角度理解点扩散函数 $k(\alpha, \beta)$ 的物理意义。经过屏幕散射的光场可以看作是点源的集合，由于成像透镜有限的通光孔径，各个点源经过透镜后在成像面形成各自的衍射斑，这些衍射斑具有相同的函数形式，它们在像面叠加时受到点扩散函数的作用，形成人眼或 CCD 接收的图像。点扩散函数 $k(\alpha, \beta)$ 也叫成像系统的响应函数，是由透镜的孔径函数 $P(\zeta, \eta)$ 决定的，两者的关系为，

$$k(\alpha, \beta) = \frac{1}{(\lambda f)^2} \iint P(\zeta, \eta) \exp[j\frac{2\pi}{\lambda f}(\alpha\zeta + \beta\eta)] d\zeta d\eta \quad \dots (2.5)$$

如果透镜的通光孔径越小，点扩散函数越宽，像面上参与叠加的衍射光斑越

多，所成的像越接近原图；如果透镜的通光孔径越大，点扩散函数越窄，像面上参与叠加的衍射光斑越少，所成的像形变越严重。

根据式 (2.3) 可计算散斑的振幅相关函数，

$$\Gamma_A(x_1, y_1; x_2, y_2) = \frac{\exp[j\frac{\pi}{\lambda f}(1-\frac{z}{f})(x_1^2 + y_1^2 - x_2^2 - y_2^2)]}{\lambda^2 f^2} \iint I(\alpha_2, \beta_2) \exp[-j\frac{2\pi}{\lambda f}(\Delta x \alpha_2 + \Delta y \beta_2)] d\alpha_2 d\beta_2 \quad \dots (2.6)$$

$$\times \iint \mu_a(\Delta\alpha, \Delta\beta) \exp[-j\frac{2\pi}{\lambda f}(x_1 \Delta\alpha + y_1 \Delta\beta)] d\Delta\alpha d\Delta\beta$$

式中， $I(\alpha_2, \beta_2)$ 表示刚离开屏幕的表面上的光强分布， $\mu_a(\Delta\alpha, \Delta\beta)$ 表示刚离开屏幕的表面上的光波振幅相关函数。散斑的振幅相关函数包括两个积分，第一个积分为散射光强度分布函数的傅里叶变换，积分结果为像面上散斑场的相关函数，决定了散斑图像的精细结构，这一关系称为范西特-泽尼克定理。第二个积分为散射光振幅相关函数的傅里叶变换，积分结果为像面上的平均强度分布。实际应用的散射片和屏幕，其颗粒高度的变化远大于光波波长，即 $\sigma_h \gg \lambda$ ，因此，相干的各散射波之间的振幅和位相是统计无关的，也即， μ_a 为 δ 函数，得到第二个积分结果为 1。

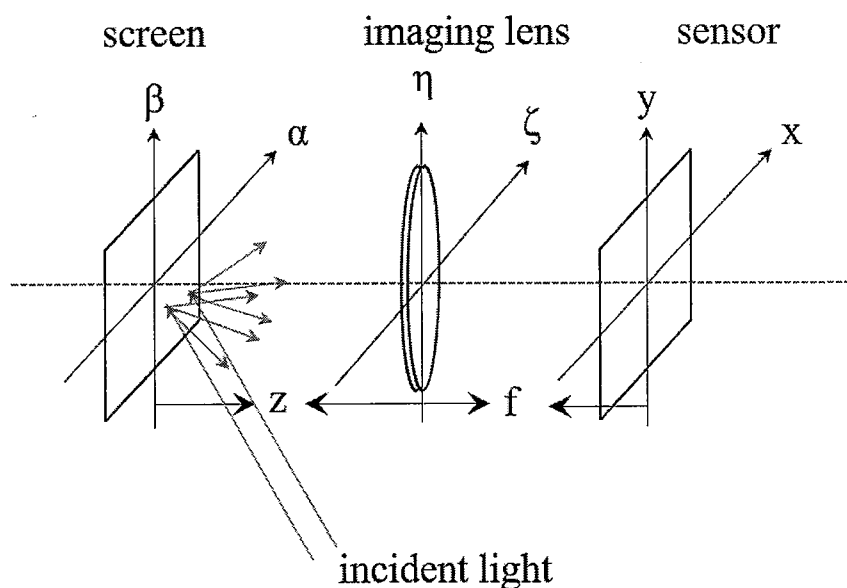


图 2.8 散射光传输至人眼或 CCD 传感器

Fig. 2.8 Scattered light from screen enters human eyes or CCD sensor

将振幅相关函数 Γ_A 归一化得到 μ_A ，强度相关函数与振幅相关函数的关系为，

$$\Gamma_I(\Delta x, \Delta y) = \bar{I}^2 [1 + |\mu_A(\Delta x, \Delta y)|^2] \quad \dots (2.7)$$

由此得出, 散斑强度的归一化协方差函数 $C_I(\Delta x, \Delta y)$ 与强度自相关函数 $\Gamma_I(\Delta x, \Delta y)$ 的关系为[6],

$$C_I(\Delta x, \Delta y) = |\mu_A(\Delta x, \Delta y)|^2 = \frac{\Gamma_I(\Delta x, \Delta y) - \bar{I}^2}{\bar{I}^2} \quad \dots (2.8)$$

将散斑强度的归一化协方差函数的等效宽度(半高全宽)定义为散斑的一维尺寸, 图 2.9 列出了具有不同散斑尺寸的散斑图像, 并给出了对应图像的归一化协方差函数曲线, 图(a)-(c)的散斑尺寸计算值分别为 1.77pixels、5.14pixels 和 6.35pixels, 也即图(a)中的散斑尺寸最小, 图(c)中的散斑尺寸最大。

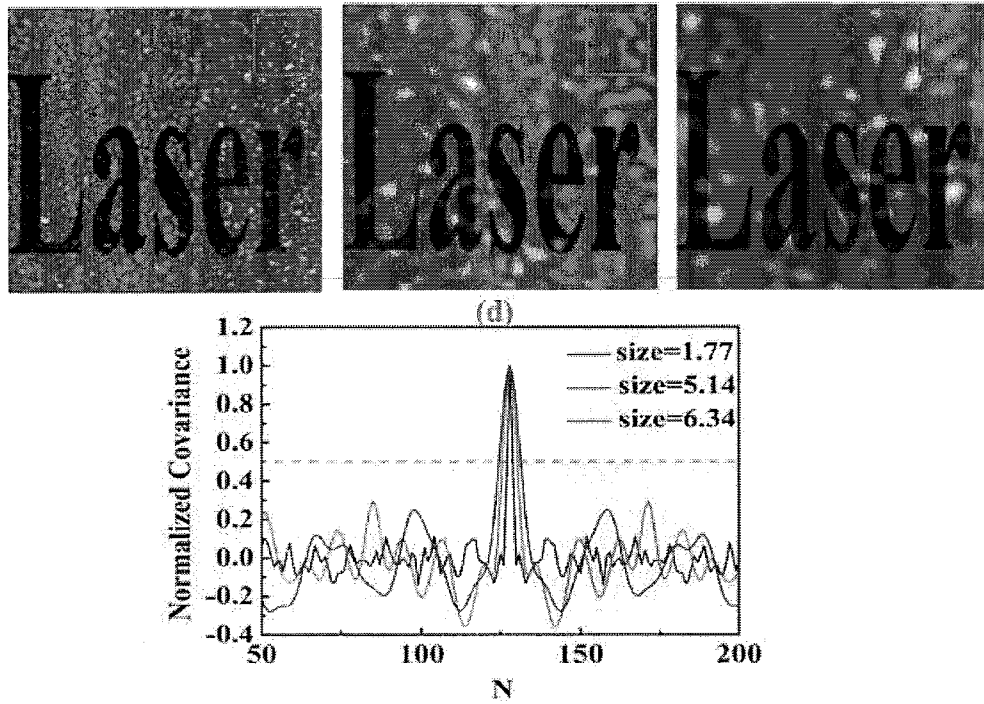


图 2.9 归一化协方差函数计算一维散斑尺寸

Fig. 2.9 Speckle size is calculated by normalized autocovariance function

还可以从几何光学角度计算散斑尺寸。参考图 2.5 和图 2.6, 客观散斑的最小尺寸 S_{obj} 由照明区域相干光束的边缘形成的干涉条纹间距决定, 而主观散斑的最小尺寸 S_{subj} 定义为孔径角边缘的两个相干光束形成的干涉条纹的最小间距, 两者的表达式分别为,

$$S_{obj} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{obj}} \quad \dots (2.9)$$

$$S_{subj} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{subj}} \quad \dots (2.10)$$

式中, λ 为相干光束的波长, θ_{obj} 为被照射区域相干光束的两个边缘相对于接收面的半角 (见图 2.5), θ_{subj} 是成像透镜有效直径两端的相干光束在图像空间的夹角 (见图 2.6)。

2.5 散斑 (对比度) 的影响因素

2.5.1 散斑的产生过程对散斑 (对比度) 的影响

散斑的产生与激光光源, 光源传输过程中的光纤、散射片等器件, 以及屏幕等等都密切相关, 它们使激光光束产生相干子光源并附加随机相位, 从而影响了散斑的精细结构。本节内容主要讨论它们是如何对散斑造成影响的。

通常采用散斑对比度 (speckle contrast, SC) 来表征散斑, SC 的定义为强度的标准差与平均值之比,

$$SC = \frac{\sigma_I}{\bar{I}} \quad \dots (2.11)$$

式中, σ_I 代表散斑图像的强度标准差, $\bar{I}$ 代表散斑图像的强度平均值。对于强度均匀分布的图像来说, 完全散射散斑的散斑对比度为 $SC = 1$, 无散斑的散斑对比度为 $SC = 0$ 。

根据散斑的统计学特性, 只有当相加的散斑图样之间有某种程度的退相关时, 才能改变散斑的统计分布, 即, 改变散斑 (对比度)。接下来, 我们将从散斑图样退相关 (相关函数宽度降至 $1/e$) 时所需要的条件着手, 来讨论激光光源、光纤、散射片和屏幕对散斑 (对比度) 的影响, 这也是散斑抑制方法的理论基础。

2.5.1.1 激光光源对散斑 (对比度) 的影响

(1) 激光线宽

在一定条件下, 当两束光的波长差 $\Delta\lambda$ 满足以下关系时, 可以认为两束光产生的散斑图样的强度相关度降至 $1/e^2$ [6, 57],

$$|\Delta\lambda| \geq \frac{\bar{\lambda}^2}{2\sqrt{2}\pi\sigma_h} \quad \dots (2.12)$$

式中, $\bar{\lambda}$ 为两束光中心波长的平均波长, σ_h 为粗糙表面高度涨落标准差。可以看出, 当表面高度涨落越大, 波长平均值越小时, 散斑图样明显退相关所需的波长

变化量越小。

激光光源的光谱分布通常具有一定的宽度，称为激光线宽。令激光照射屏幕的入射角为 θ_i 、观察角为 θ_o ，则散斑对比度与激光线宽的关系为，

$$SC = \frac{1}{\sqrt{1 + 2\pi^2 \left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{\sigma_h}{\lambda}\right)^2 (\cos\theta_o + \cos\theta_i)^2}} \quad \dots (2.13)$$

式中， λ 为激光光谱的中心波长， $\delta\lambda$ 为激光光谱带宽。

在法向照射屏幕和法向观察的条件下，散斑对比度 SC 与激光线宽关系为，

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = \frac{\delta\lambda}{\lambda} = \frac{\bar{\lambda}}{\sigma_h} \sqrt{\frac{1}{SC^2} - 1} \quad \dots (2.14)$$

图 2.10 描述了在法向入射和法向观察的条件下，激光线宽对散斑的影响，从图中可以看出，对于固定的散射表面微结构，随着激光线宽的增加，散斑对比度降低。

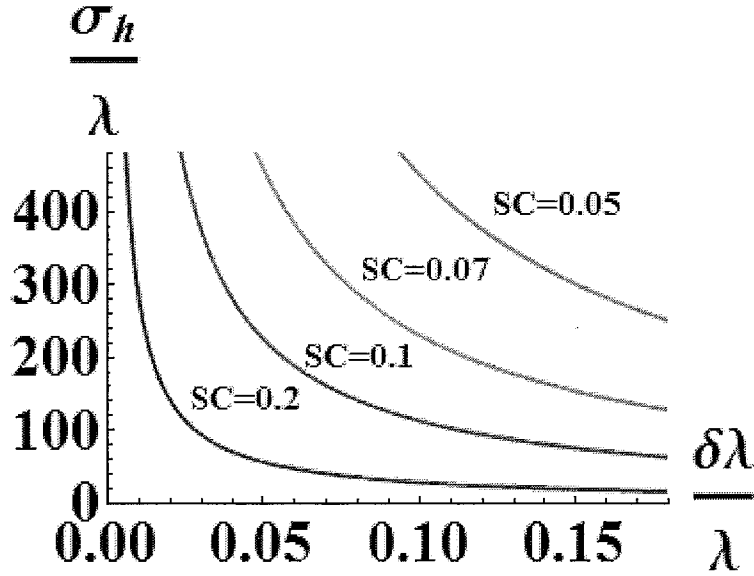


图 2.10 激光波长线宽对散斑的影响

Fig. 2.10 The influence of laser spectrum width on speckle

(2) 非相干点光源之间的角度间隔

如图2.11所示，两个非相干点光源关于光轴对称分布，点光源发射至投影镜头中心处的光与光轴的夹角为 ζ 。虽然两个点光源不相干，但如果这两个点光源的角间隔很小，则它们产生的散斑图样仍然可能相关，因此，需要研究两个非相干光源之间的夹角 ζ 满足什么条件时，才能使两个点光源产生的散斑图样退相关。

基于Goodman等人的理论分析[6, 58-60], 夹角 ζ 满足如下条件时, 这两个非相干点光源产生的散斑图样才能退相关,

$$\sin \zeta \geq \frac{D}{2z} \approx NA_{\text{image}} \quad \dots (2.15)$$

式中, D 为成像镜头通光孔径, z 为观察距离, NA 代表数值孔径, 定义为 $NA=n\sin\theta$, n 为折射率, θ 为通光孔径相对于屏幕所张的半角。由式(2.15)可知, 当观察距离越远, 成像镜头直径越小时, 产生退相关所需的夹角 ζ 越小。

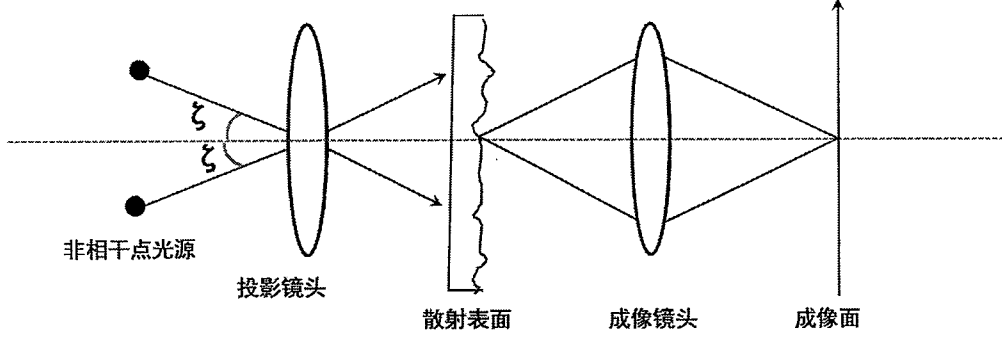


图2.11 两个非相干点光源的照明和成像光路

Fig. 2.11 Illumination and imaging geometry with two mutually incoherent point sources

2.5.1.2 光纤对散斑（对比度）的影响

当相干光束耦合输入多模光纤时, 由于不同模式的光波入射角和传输相速度不同, 导致光纤输出的光波相位不同, 使不同模式的光波发生干涉, 形成散斑。由上述光纤产生散斑的原理可知, 当通过对光纤施加扰动[61], 改变光纤长度或改变光纤输入端耦合角度等手段改变光波相位时, 光纤不同工作模式之间的相关度将减弱, 从而导致散斑的统计分布发生变化。假设多模光纤的各个模式传输的光功率相等, 可得到散斑对比度与多模光纤工作模式数、工作模式之间相关度的关系为[6, 61],

$$SC = \frac{1}{m\Delta\tau} \sqrt{\int_0^{m\Delta\tau} 2(m\Delta\tau - \tau) |\gamma(\tau)| d\tau} \quad \dots (2.16)$$

式中, m 为多模光纤的工作模式数, τ 为工作模式之间的时间延迟, $\Delta\tau$ 为第 k 个工作模式和第 $k-1$ 个工作模式的时间延迟差, γ 为激光光束在时间序列上的相干度[62]。由式中可知, 当不同工作模式之间的相关度越小时, 散斑对比度越低。

图 2.12 描述了实验上测得的光纤长度对散斑的影响, 图(a)为光纤长度 1.5m 时获得的散斑图像, 图(b)为光纤长度 5m 时获得的散斑图像, 显然, 采用较长的

光纤时产生的散斑噪声更少。

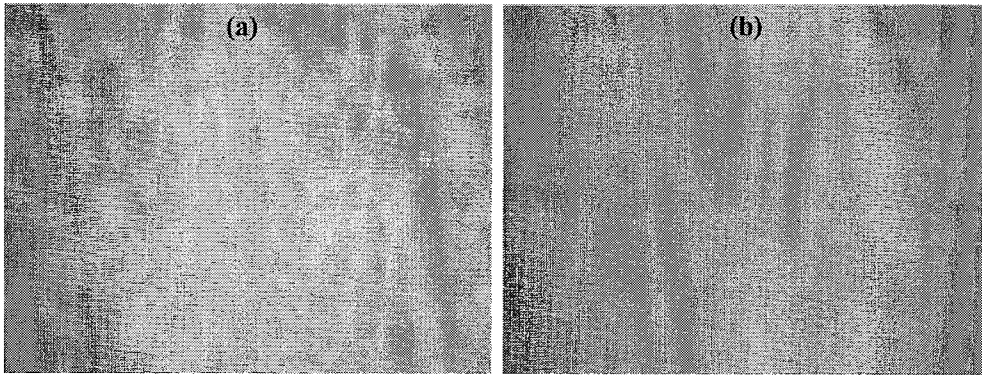


图 2.12 (a)光纤长度 1.5m 时获得的散斑图像, (b)光纤长度 5m 时获得的散斑图像

Fig. 2.12 Speckle image with fibre length of 1.5m, (b) speckle image with fibre length of 5m

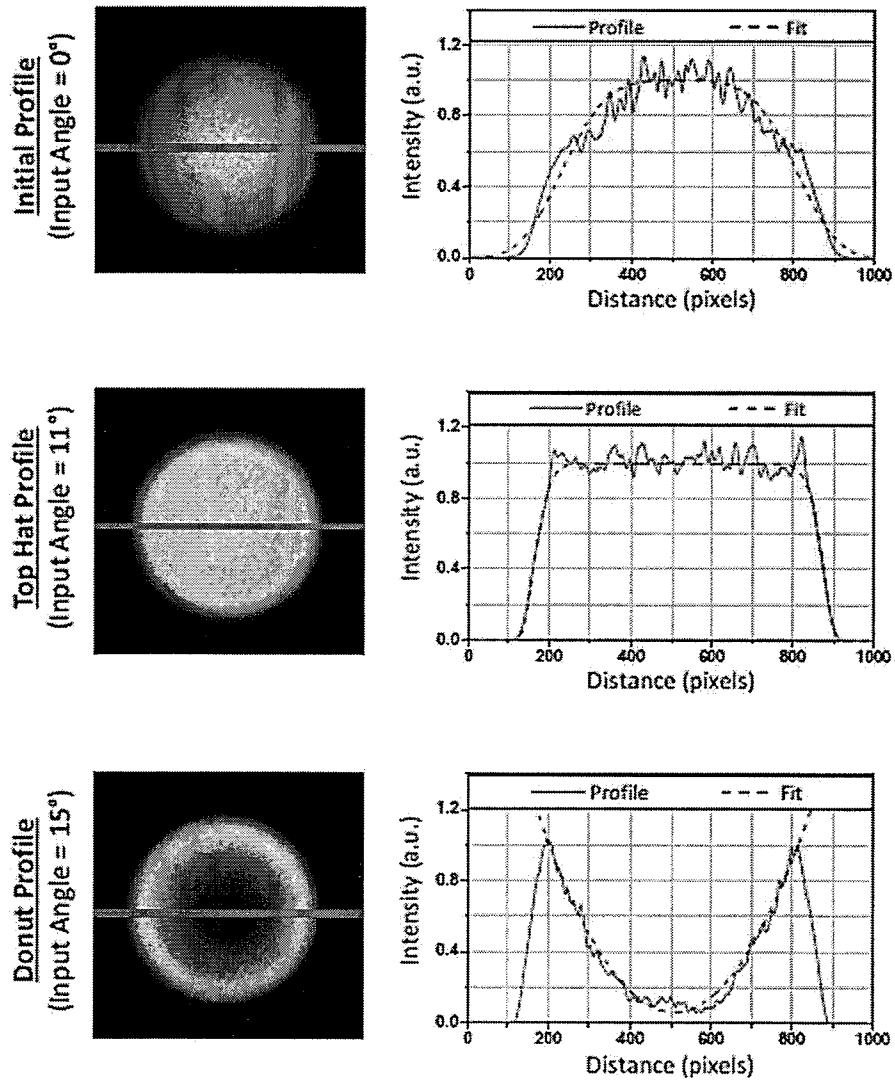


图 2.13 耦合输入角为(a)0°, (b)11°, (c)15°时获得的散斑强度分布以及对应的切面图

Fig. 2.13 Distribution of intensity at the output terminal of fibre when coupling angle is (a) 0° , (b) 11° , (c) 15°

图 2.13 描述了不同光纤耦合入射角对散斑的影响，图(a),(b)和(c)分别为入射角为 0° 、 11° 和 15° 时，对应的输出端面散斑强度分布二维灰度图以及一维切线图。从图中可以看出，当光纤耦合入射角为 0° 时，输出光束呈高斯分布，中间处散斑更为明显；当光纤耦合入射角为 11° 时，输出光束为平顶分布，散斑颗粒也呈平顶分布；当光纤耦合入射角为 15° 时，输出光束呈环状分布，散斑颗粒分布也同样呈环状分布。

2.5.1.3 运动散射片对散斑（对比度）的影响

随着散射片的运动，透射光束的相位不断变化，使在 CCD 相机或人眼积分时间内的散斑图样之间产生了退相关，由此影响了散斑对比度[63-66]。以下将分析运动散射片对散斑的影响机制。

假设投影光路中其他光学元件对光波相位不产生影响，只考虑待投影物体的粗糙表面和运动散射片粗糙表面附加光波的随机相位，除此之外，我们还假设，待投影物体的表面粗糙度与散射片的粗糙度相似，具有相同的高度涨落 σ_h 和相关半径 r_o 。那么，成像面上光场的自协方差函数可表示为，

$$C_A(\tau) = \iint \{ \exp[\sigma_o^2 \exp(-\frac{\Delta\alpha^2 + \Delta\beta^2}{r_o^2})] - 1 \} \times \{ \exp[\sigma_o^2 \exp(-\frac{(\Delta\alpha - v\tau)^2 + \Delta\beta^2}{r_o^2})] - 1 \} d\Delta\alpha d\Delta\beta \quad \dots (2.17)$$

式中，被积函数第一个因子为被投影物体的表面粗糙度对相关函数的贡献，第二个因子为运动散射片的表面粗糙度对相关函数的贡献，散射片的运动速率为 v ，运动时间为 τ 。 σ_o 为附加的随机相位标准差，式(2.17)归一化后得到 $\mu_A(\tau)$ ，

$$\mu_A(\tau) = \frac{C_A(\tau)}{C_A(0)} \quad \dots (2.18)$$

将式(2.17)和式(2.18)代入以下时间积分的散斑对比度公式，

$$SC = \sqrt{\frac{1}{M}} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^T (1 - \frac{\tau}{T}) |\mu_A(\tau)|^2 d\tau} \quad \dots (2.19)$$

采用数值计算可以得出散斑对比度与运动散射片位移 vT/r_o 的关系，结果如图 2.14 所示。从图中可以看出，散斑对比度随着散射片移动位移的增加而减小，而在同样的位移条件下，散射片表面产生的随机相位标准差越大，散斑对比度越

小。

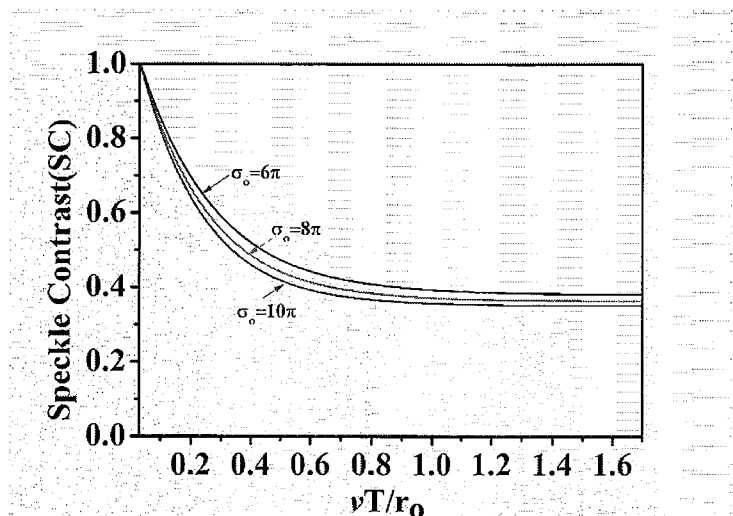


图 2.14 散斑对比度与运动散射片的归一化距离的关系

Fig. 2.14 Speckle contrast as a function of normalized distance of diffuser motion

2.5.1.4 屏幕对散斑（对比度）的影响

本节将分别讨论屏幕微结构，屏幕振动，屏幕散射光的偏振态，以及相对于屏幕的照明角度对散斑（对比度）的影响。

（1）屏幕微结构

从图 2.10 中激光线宽对散斑对比度的影响曲线可以看出，在相同的激光线宽条件下，表面高度标准差越大，也即表面越粗糙，获得图像的散斑对比度越小。下面将进一步分析屏幕表面的微结构与散斑（对比度）的关系。

当波长为 λ 的激光光束在屏幕表面散射时，散射表面微结构决定了散射波的附加相位大小，从而决定了散射波之间的相关度。散斑波相关函数与散射表面微结构通过下式联系，

$$\mu_a(\Delta\alpha, \Delta\beta) = \exp[-\sigma_\phi^2(1 - \mu_h(\Delta\alpha, \Delta\beta))] \quad \dots (2.20)$$

式中， σ_ϕ 为散射表面相移的标准差 $\sigma_\phi = 2\pi\sigma_h/\lambda$ ， μ_h 为表面高度相关函数。

散射波相关函数在屏幕上的等效面积 A_a ，被称为相干面积，可以认为不同相干面积内的散射波将在人眼视网膜或 CCD 传感器上产生散斑图样不相关。因此，积分时间内不相关的散斑图样数目就是人眼或 CCD 镜头在屏幕上的最小分辨单元 A_k 内相干面积的数目 N 。 N 的表达式为，

$$N = \begin{cases} \frac{A_k}{A_a}, & A_k > A_a \\ 1, & A_k < A_a \end{cases} \quad \dots (2.21)$$

式中, A_k 和 A_a 的表达式分别为,

$$A_k = \frac{\lambda^2 f^2}{A_p} \quad \dots (2.22)$$

$$A_a = \frac{\pi r_c^2 e^{-\sigma_\phi^2}}{1 - e^{-\sigma_\phi^2}} [Ei(\sigma_\phi^2) - \varepsilon - \ln(\sigma_\phi^2)] \quad \dots (2.23)$$

式中 A_p 为成像镜头孔径大小, λ 为光波波长, r_c 为表面高度 h 的相关函数峰值下降至 $1/e$ 的宽度 (相关半径), $Ei(x)$ 代表指数积分函数, ε 为欧拉常数。

将式(2.22)和(2.23)代入式(2.21), 当 $A_k > A_a$ 时, 获得的独立散斑图样数目可表示为,

$$N = \frac{N_0 (e^{\sigma_\phi^2} - 1)}{Ei(\sigma_\phi^2) - \varepsilon - \ln(\sigma_\phi^2)} \quad \dots (2.24)$$

式中, N_0 为屏幕上成像镜头的一个分辨单元内表面高度相关面积的个数, σ_ϕ 为散射表面相移的标准差。

参考 Goodman 理论推导[6], 可得出表面微结构与散斑对比度的关系式,

$$SC = \sqrt{\frac{8(N-1)\{N-1 + \cosh[(4\pi \frac{\sigma_h}{\lambda})^2]\} \sinh^2[(4\pi \frac{\sigma_h}{\lambda})^2 / 2]}{N(N-1 + \exp(4\pi \frac{\sigma_h}{\lambda})^2)^2}} \quad \dots (2.25)$$

式中, N 为独立散斑图样的数目, σ_h 为表面高度标准差。独立散斑图样数目和表面高度标准差对散斑对比度的影响如图 2.15 所示。图(a)描述了不同的 N_0 值下的散斑对比度 SC 与 σ_h/λ 的关系, 由图中可知, 随着屏幕表面粗糙度的增加, 也即表面高度标准差的增加, 散斑对比度随之增加, 并逐渐达到饱和值 ($SC=1$)。图(b)描述了不同的 σ_h/λ 下散斑对比度 SC 与 N_0 的关系, 由图中可知, 随着参数 N_0 的增加, 散斑对比度呈现了先增加后减小的趋势。

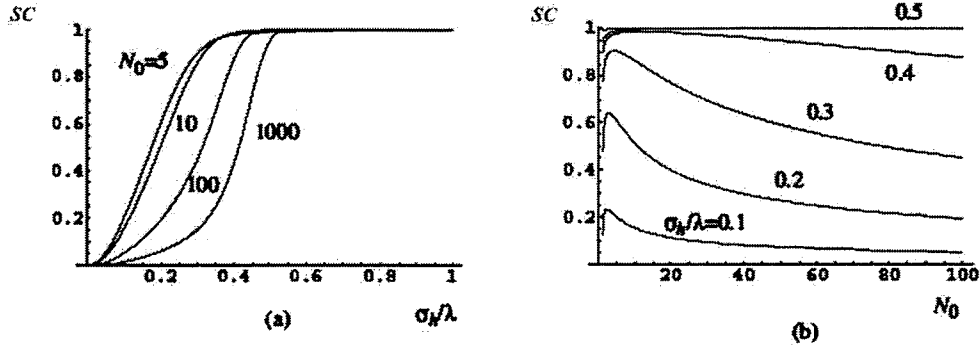


图 2.15 (a)不同的 N_0 值下散斑对比度 SC 与 σ_n/λ 的关系, (b)不同的 σ_n/λ 下散斑对比度 SC 与 N_0 的关系

Fig. 2.15 (a) Speckle contrast as a function of σ_n/λ when N_0 changes, (b) speckle contrast as a function of N_0 when σ_n/λ changes

(2) 屏幕振动

当屏幕迅速地沿垂直于屏幕方向或平行于屏幕方向振动时,若振动振幅恰好达到一个波长 λ ,也即 2π 弧度的相位变化,则两个散斑图样之间失去相关性,导致散斑对比度发生变化[67]。下面将分析,当屏幕振动振幅达到多大时,可使两个散斑图样退相关。

屏幕振动路径示意图如图 2.16 所示[68], P_1 、 P_2 为屏幕振动的首末位置,距离为 d 。当屏幕在 P_1 位置时,单色平面波入射至屏幕的粗糙表面,产生的散射波被眼睛接收,形成 $x = 0$ 处的散斑图样。随着屏幕在 P_1 和 P_2 之间振动,产生的散斑图样从 $x = 0$ 到 $x = \pm d$ 之间变换。假设 P_1 、 P_2 处的散射角分别为 θ_1 、 θ_2 , P_1 处散射波的相干宽度为 ΔS_1 , P_2 处散射波的相干宽度为 ΔS_2 ,眼睛的视角为 θ_e ,在屏幕上的分辨率单元直径为 ΔS_e 。 ΔS_1 , ΔS_2 和 ΔS_e 的表达式分别为,

$$\Delta S_1 = \frac{\lambda}{\sin(\frac{\theta_1}{2})} \quad \dots (2.26)$$

$$\Delta S_2 = \frac{\lambda}{\sin(\frac{\theta_2}{2})} \quad \dots (2.27)$$

$$\Delta S_e = \frac{\lambda}{\sin(\frac{\theta_e}{2})} \quad \dots (2.28)$$

沿 z 轴的振动距离 d 和沿 x 轴的相对运动距离 t 的关系如下,

$$t = d \cdot \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \quad \dots (2.29)$$

如果 d 足够小, 则 ΔS_1 与 ΔS_2 近似相等。以波长为532nm的激光器作为照明光源时, 若 θ_1 为 60° , 则相关距离 ΔS_1 为 $1.064\mu\text{m}$, 也就是说, 屏幕上 $1\mu\text{m}$ 的偏移即可使产生的两个散斑图样退相关。所以, 在积分时间内, 可以通过控制屏幕的运动距离, 来控制人眼分辨单元 ΔS_e 内相关距离 ΔS_1 (或 ΔS_2) 的个数, 以此来改变散斑的统计分布。

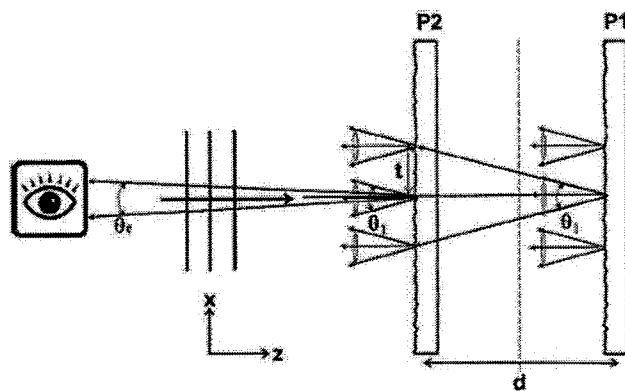


图2.16 单屏幕振动模型[68]

Fig. 2.16 Model of single vibrating screen[68]

(3) 屏幕散射光的偏振态

当光从粗糙的表面反射时, 通常发生多重散射, 导致反射光呈现非偏振态。如果经过一个检偏器观察光的强度, 检偏器的方向先是 x 方向再沿 y 方向 (x 和 y 是检偏器偏振正交的两个方向), 那么观察到的两个散斑图样是不相关的, 二者叠加后的散斑对比度将减小, 减小的程度依赖于散斑图样中光的偏振度 P , 但是最多减小 $1/\sqrt{2}$ 倍。散斑对比度与偏振度之间的关系为,

$$SC = \frac{\sqrt{1+P^2}}{2} \quad \dots (2.30)$$

式中, P 为完全偏振波分量的强度和光波总强度之比。

(4) 相对于屏幕的照明角度

照明角度, 指照射屏幕的光束与屏幕法线的夹角, 用 θ_i 表示, 如图2.17所示的光路, $\vec{k}_i$ 为照明光束光波矢, $\vec{k}_o$ 为散射光束光波矢, θ_o 为散射光与屏幕法线的夹角。

考虑如下的情况: 观察角度垂直于屏幕表面, 波长为定值, 研究照明角度的

变化量 $\Delta\theta_i$ 对散斑对比度的影响[69, 70]。根据Goodman的理论[6], 在一定条件下, 散斑强度的相关函数与照明角度的关系为,

$$|\mu_A|^2 \approx \exp[-(2\pi \frac{\sigma_h}{\lambda} \Delta\theta_i \sin\theta_i)^2] \quad \dots (2.31)$$

从公式中可以看出, 随着照明角度的变化量 $\Delta\theta_i$ 增大, 强度相关函数 $|\mu_A|^2$ 变小, 当散斑强度的相关度降为 $1/e$ 时, 则散斑对比度降低。

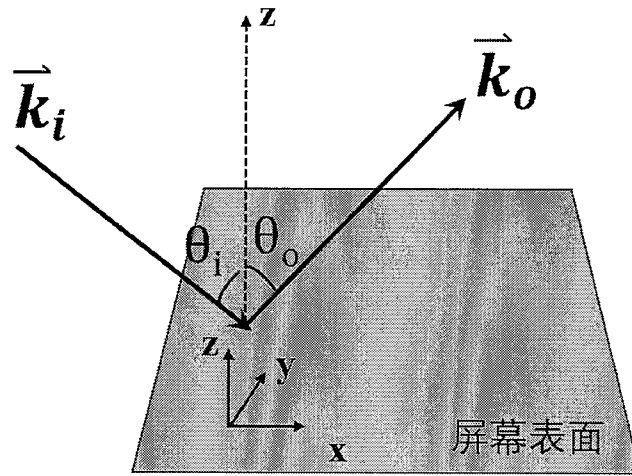


图2.17 散射光路

Fig. 2.17 Optical path of scattering

2.5.2 测量系统的参数设置对散斑（对比度）的影响

实验测得的散斑对比度对测试系统具有很强的依赖性, 测试系统的参数设置不同, 测得的散斑对比度也会不同。本节内容将讨论入射光光强、散斑尺寸、成像镜头数值孔径、成像镜头 F 数、成像镜头聚焦程度和 CCD 曝光时间等测量系统参数对散斑对比度的影响。

2.5.2.1 入射光光强对散斑（对比度）的影响

采用数值模拟的方法生成 10 幅散斑颗粒尺寸均为 3.93pixels, 而入射光平均强度不同的散斑图像, 研究入射光光强对散斑对比度的影响。图 2.18(a)-(f)显示了其中 6 个具有代表性的散斑图像, 入射光平均强度分别为 29、58、87、120、170、237 (当强度为 255 时, CCD 相机饱和), 对应的散斑对比度分别为 0.9951、0.9545、0.8719、0.7274、0.5321、0.2185。图 2.18(g)展示了散斑对比度随着入射光平均强度的变化, 当入射光平均强度增加时, 散斑图像的对比度降低。

实际上从数学角度来讲,当入射光光强增加时,图像的平均强度值和强度标准差应等比例增加,从而使计算得到的散斑对比度值保持不变,但由于 CCD 相机动态范围的限制和数字化采样的影响,散斑对比度随着平均强度的增加而减小。这也就要求,当研究其他物理量对散斑对比度的影响时,务必保持入射光平均强度恒定不变,以避免带来实验误差甚至得出错误的结论,还需要注意不能输入太强的入射光,以防止 CCD 相机饱和。

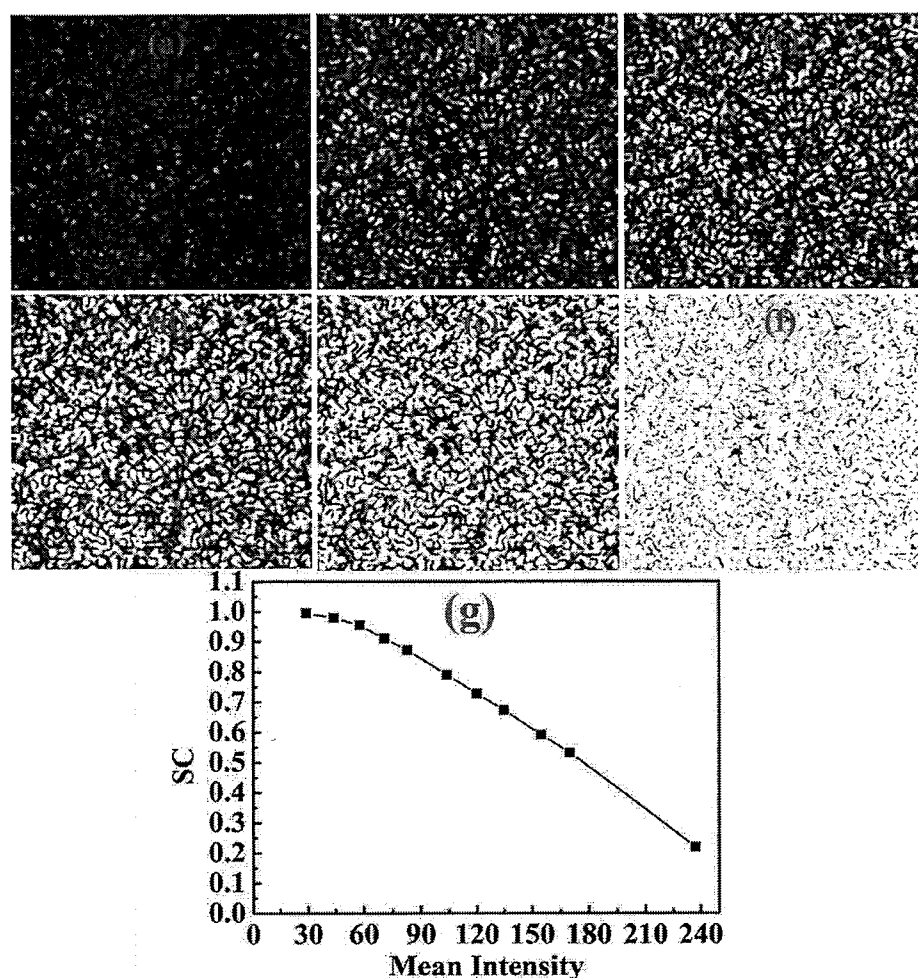


图 2.18 不同平均强度的散斑图像, 平均灰度值分别为(a) 26, (b) 58, (c) 83, (d) 120, (e) 170, (f) 237; (g)散斑对比度随着平均光强的变化曲线

Fig. 2.18 Speckle images with different mean intensity of (a) 29, (b) 58, (c) 83, (d) 120, (e) 170, (f) 237; (g) Speckle contrast as a function of mean intensity

2.5.2.2 散斑尺寸对散斑（对比度）的影响

散斑尺寸取决于成像镜头的通光孔径, 通光孔径函数经过傅里叶变换后得到强度点扩散函数, 强度点扩散函数在成像面上的等效面积即为散斑尺寸。根据采

样定理,要使 CCD 能够分辨散斑,要求散斑尺寸至少占据两个像素尺寸[12, 71]。本文中的散斑尺寸大小均是以像素尺寸为单元计算的,也称为空间采样率。

采用数值模拟的方法,研究了散斑测量系统的散斑尺寸对散斑对比度的影响。图 2.19(a)-(h)为平均光强相同,而散斑尺寸分别为 1、1.77、5.73、8.09、9.70、14.09、19.93pixels 的散斑图像,对应散斑对比度计算值分别为 0.5643、0.8476、0.8719、0.8810、0.8717、0.8718、0.8810 和 0.8658。图 2.19(i)画出了散斑对比度值随着散斑尺寸的变化曲线,由图中可知,当散斑尺寸 $S_{\text{speckle}} \geq 2\text{pixels}$ 时,散斑对比度基本趋于稳定,在 0.87~0.88 范围内浮动,而散斑尺寸 $S_{\text{speckle}} = 1\text{pixels}$ 时,散斑对比度值较小,为 0.5643,与 0.87~0.88 相比偏离较大。

产生上述结果一方面是因为,当散斑尺寸小于 CCD 相机的最小分辨单元时,多个散斑颗粒在分辨单元内产生空间积分,导致 CCD 相机无法识别单个散斑颗粒,而是将一个像素单元内的所有颗粒认为是一个亮斑,隐藏了部分散斑颗粒的强度涨落;另一方面是因为,在 CCD 对图像数字化过程中,单个像素仅记录一个灰度值,导致像素单元内的灰度标准差为零,使数字化图像与实际图像产生差别。因此,只有散斑尺寸较大时,CCD 才能精确的记录单个散斑内的强度涨落,从而得到准确地散斑对比度结果。同时,因为 CCD 的空间分辨率越大,分析的图像区域越小,所以要根据实际使用情况综合考虑,选取合适的空间分辨率大小。

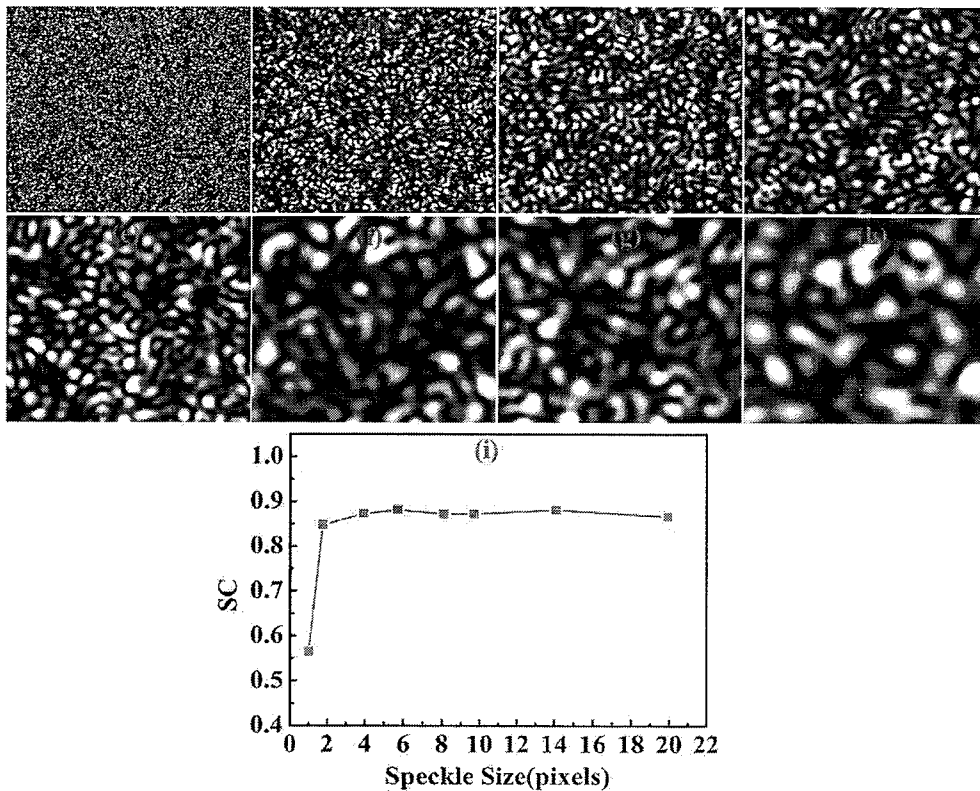


图 2.19 不同散斑尺寸的散斑图样。(a) 1, (b) 1.77, (c) 3.93, (d) 5.73, (e) 8.09, (f) 9.73, (g) 14.09, (h) 19.93 (pixels); (i) 散斑对比度(SC)与散斑尺寸(speckle size)的函数曲线图

Fig. 2.19 Speckle Patterns with different speckle sizes of (a) 1, (b) 1.77, (c) 3.93, (d) 5.73, (e) 8.09, (f) 9.73, (g) 14.09, (h) 19.93pixels. (i) Speckle Contrast (SC) as a function of Speckle size

2.5.2.3 成像镜头数值孔径对散斑（对比度）的影响

成像镜头的数值孔径定义为 $NA = n \sin \theta$ ，其中 n 是折射率， θ 是镜头的通光孔径相对于屏幕中心所张的半角。由于空气的折射率约为 1，且 θ 值一般较小，所以成像镜头的数值孔径可近似表示为，

$$NA_{image} = \frac{D}{2L} \quad \dots (2.32)$$

式中， D 为成像镜头的通光孔径大小， L 为成像镜头与屏幕间观察距离。成像镜头的数值孔径对散斑的影响，同时包含了观察距离和通光孔径大小两个因素。

当同时考虑系统的空间自由度和时间自由度时，散斑对比度可表示为[12]，

$$SC = \sqrt{\frac{M + N \pm 1}{MN}} \quad \dots (2.33)$$

$$N = \left(\frac{NA_{image}}{NA_{illum}} \right)^2 \quad \dots (2.34)$$

式中， M 为时间自由度数， N 为空间自由度数，“ $\pm$ ”中的“+”对应光束未充满或刚好充满投影光学系统的情况，“-”对应光束溢出投影光学系统的情况。 NA_{illum} 是投影镜头的数值孔径。

首先，研究成像镜头通光孔径大小和观察距离对散斑对比度的影响，散斑图像结果如图 2.20 所示。图中，第一行图像(a)-(c)的观察距离为 690mm，第二行图像(d)-(f)的观察距离为 1035mm；第一列图像(a)和(d)的通光孔径为 1mm，第二列图像(b)和(e)的通光孔径为 1.2mm，第三列图像(c)和(f)的通光孔径为 1.5mm。由各个图像的散斑对比度计算结果可知，当成像镜头的通光孔径不变，观察距离增加时，散斑对比度降低；当观察距离不变，成像镜头的通光孔径增加时，散斑对比度增加。除此之外，图(a)和(f)的通光孔径大小和观察距离不相同，但数值孔径相同，它们的散斑对比度基本相同。

然后，综合考虑观察距离和通光孔径，研究数值孔径对散斑对比度的影响。考虑光束未填满镜头的情况，将式 (2.34) 代入式 (2.33)，得到数值孔径与散斑对比度的关系式为，

$$SC = \sqrt{\frac{1}{M} + (1 - \frac{1}{M}) \cdot (\frac{NA_{image}}{NA_{illum}})^2} \quad \dots (2.35)$$

对上式进行了理论模拟, 结果如图 2.21 中的虚线所示, 在数值孔径小于 0.0005 以下, 散斑对比度基本不变, 当数值孔径大于 0.0005 后, 散斑对比度几乎成正比的增加。设置成像镜头的通光孔径 (pinhole diameter, PHD) 分别为 PHD=0.8, 1.0, 1.2 和 1.5, 改变观察距离, 测试了散斑对比度与数值孔径的关系, 实验结果如图 2.21 中的离散点所示。实验测量结果与理论模拟曲线表现一致, 均表明散斑对比度随着数值孔径的增加而增加[9]。

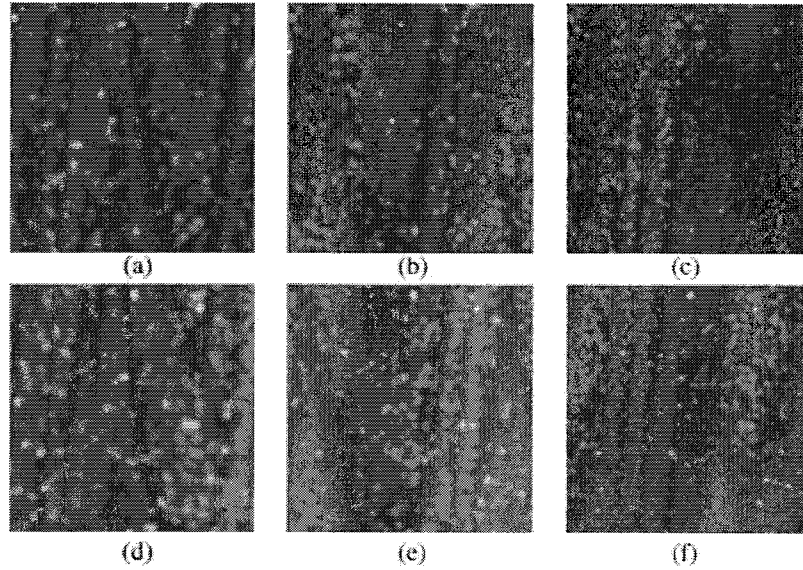


图 2.20 不同的孔径大小和观察距离下获得的散斑图像。第一行图像的观察距离为 690mm, 第二行图像的观察距离为 1035mm; 第一列图像的通光孔径为 1mm, 第二列图像的通光孔径为 1.2mm, 第三列图像的通光孔径为 1.5mm。(a) $NA_{image} = 0.00078$, $SC = 0.384$, (b) $NA_{image} = 0.00092$, $SC = 0.426$, (c) $NA_{image} = 0.00114$, $SC = 0.478$, (d) $NA_{image} = 0.00052$, $SC = 0.274$, (e) $NA_{image} = 0.00061$, $SC = 0.311$, (f) $NA_{image} = 0.00076$, $SC = 0.360$ [9]

Fig. 2.20 Observed speckle images at various observing distance L and aperture size D_{image} . The first row shows $L = 690$ and the second row shows $L = 1035$ mm. The first column shows $D_{image}=1.0$ mm, the second column shows $D_{image}=1.2$ mm, and the third column shows $D_{image}=1.5$ mm. (a) $SC = 0.384$ at $NA_{image} = 0.00078$, (b) $SC = 0.426$ at $NA_{image} = 0.00092$. (c) $SC = 0.478$ at $NA_{image} = 0.00114$, (d) $SC = 0.274$ at $NA_{image} = 0.00052$. (e) $SC = 0.311$ at $NA_{image} = 0.00061$. (f) $SC = 0.360$ at $NA_{image} = 0.00076$ [9]

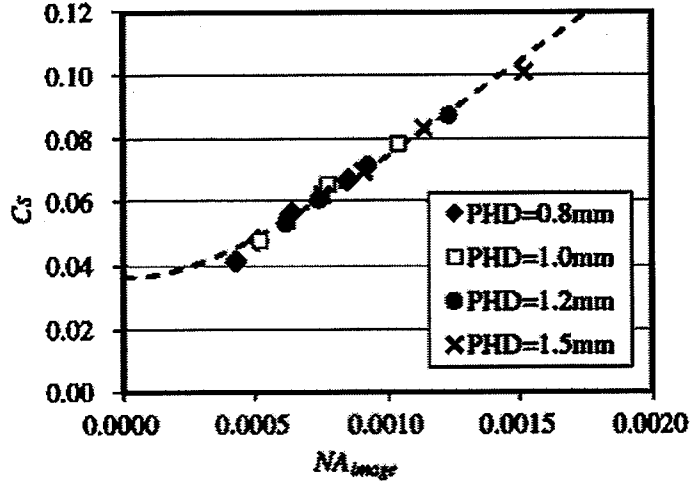


图 2.21 不同数值孔径测得的散斑对比度，虚线表示的是散斑对比度与数值孔径的理论关系曲线 [9]

Fig. 2.21 Measured SC with different NA_{image} , the dotted line shows the theoretical fitting function with $M=761$ and $NA_{illum}=0.0153$ [9]

2.5.2.4 成像镜头 F 数对散斑（对比度）的影响

成像镜头 F 数定义为镜头焦距 f 与孔径光阑 D 的比值，即， $F_{\#}=f/D$ 。改变成像镜头 F 数产生两种效应：一方面， F 数的变化引起散斑尺寸的变化；另一方面， F 数的变化影响 CCD 接收的光通量。这两种效应都会对散斑产生影响。

首先，讨论成像镜头 F 数通过改变散斑尺寸对散斑（对比度）产生的影响。主观散斑尺寸 A_s 的表达式为[8]，

$$A_s = \frac{4\lambda^2 F_{\#}^2}{\pi} \quad \dots (2.36)$$

式中， λ 为激光光源的中心波长， $F_{\#}$ 为成像镜头 F 数。

从空间多样性角度分析，空间自由度数 N 可表示为[6]，

$$N = \begin{cases} \frac{A_p}{A_s}, & A_s \leq A_p \\ 1, & A_s \geq A_p \end{cases} \quad \dots (2.37)$$

式中， A_p 为 CCD 像素尺寸， A_s 为散斑尺寸。

将式 (2.36) 和式 (2.37) 代入散斑对比度表达式，得到散斑对比度与成像镜头 F 数的关系为，

$$SC = \frac{1}{\sqrt{N}} = \begin{cases} \frac{2\lambda F_{\#}}{\sqrt{\pi A_p}}, & A_s < A_p \\ 1, & A_s > A_p \end{cases} \quad \dots (2.38)$$

由上式可看出, 当散斑尺寸小于像素尺寸时, 散斑对比度随着 F 数的增加线性增加。由于 F 数的增加使散斑尺寸也增加, 当散斑尺寸大于像素尺寸时, 散斑对比度饱和, 等于 1。更严格来说, 根据采样定理, 当散斑尺寸大于 2 倍的像素尺寸时, 散斑对比度才能达到饱和[10, 12]。

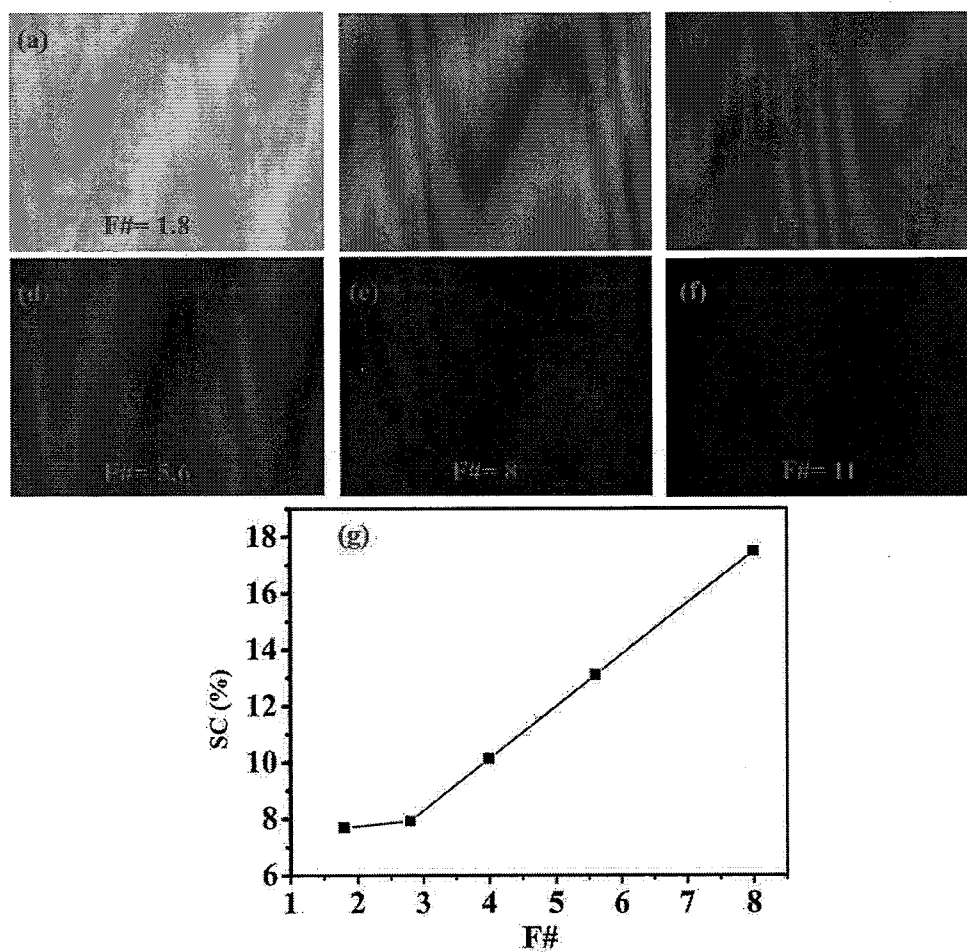
表 2.1 列出了当成像镜头焦距 f 为 50mm, 采用绿光半导体激光器($\lambda=532\text{nm}$)作为照明光源时, 根据主观散斑尺寸计算公式[12, 54, 71], 得出的镜头 F 数与散斑尺寸的关系。根据表 2.1, 当 F 数小于 16 时, 获得的散斑尺寸小于 2 个像素尺寸 (CCD 相机的像素尺寸为 $4.4\mu\text{m} \times 4.4\mu\text{m}$)。

表 2.1 散斑尺寸与镜头参数

Table 2.1 Speckle size and lens parameters

$F_{\#}(f/D)$	$D(\text{mm})$	$S_{\text{sub}}(\mu\text{m})$
1.8	27.7778	0.9939
2.8	17.8571	1.5132
4	12.5000	2.1446
5.6	8.9286	2.9911
8	6.2500	4.2643
11	4.5455	5.8580
16	3.1250	8.8724
18	2.7778	9.5797
22	2.2727	11.7070

图 2.22 展示了当散斑尺寸小于 2 个像素尺寸时, F 数对散斑对比度的影响。由图(g)可知, 着 F 数的增加, 散斑对比度随之增加, 这与理论预期结果一致。当 F 数继续增加时, 会导致散斑尺寸大于 2 个像素尺寸, 此时散斑对比度的趋于饱和 (参见 2.5.2.2 节)。

图 2.22 成像镜头 F 数对散斑对比度的影响Fig. 2.22 The effect of F number of imaging lens on speckle contrast

另外，从图 2.22(a)-(f)中可以看到，随着 F 数的增加，图像越来越暗，这是因为随着 F 数的增加，通光孔径减小，导致入射到 CCD 传感器上的平均光强降低。 F 数的变化影响 CCD 接收的光通量，也会对散斑产生影响，影响规律与入射光光强对散斑的影响一致（参见 2.5.2.1 节）。

2.5.2.5 成像镜头的聚焦程度对散斑（对比度）的影响

成像镜头与屏幕间的距离 $L=300\text{cm}$ 时，调节镜头相对于屏幕聚焦，通过改变 CCD 拍摄距离来改变聚焦/离焦程度，研究成像镜头的聚焦程度对散斑对比度的影响。

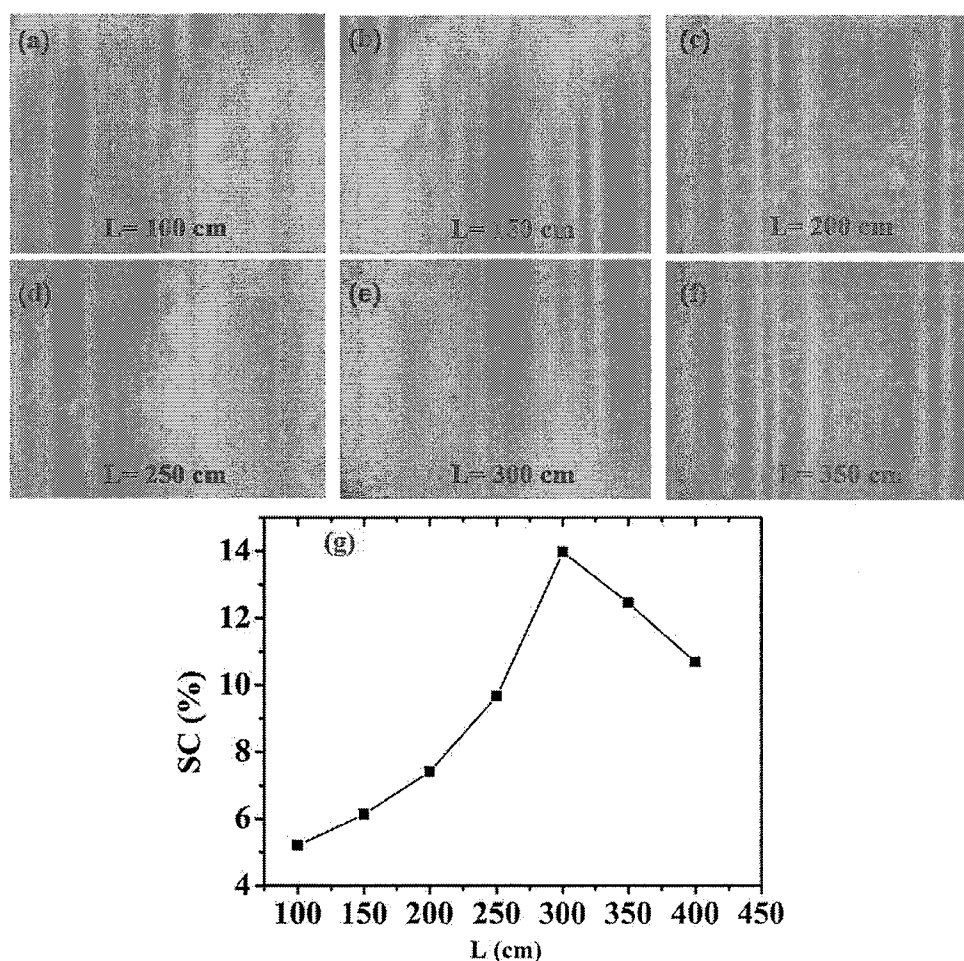


图 2.23 成像镜头的聚焦程度对散斑对比度的影响

Fig. 2.23 The influence of the focusing of imaging lens on speckle contrast

图 2.23(a)-(f)对应散斑图像的拍摄距离 L 分别为 (a) 100, (b) 150, (c) 200, (d) 250, (e) 300 和 (f) 350cm, 图(e)描述了散斑对比度随 L 变化的曲线。随着拍摄距离的增加, 成像镜头对屏幕发生了由离焦到聚焦再到离焦的变化, 导致散斑对比度出现了先增大后减小的变化趋势。这与图中的结果相一致。实际上, 为了保证 CCD 成像的清晰度, 成像距离往往在聚焦距离附近, 此时的散斑对比度趋于最大值。

2.5.2.6 CCD 曝光时间对散斑（对比度）的影响

CCD 曝光时间对散斑对比度的影响主要体现在两方面: 一, 曝光时间影响 CCD 接收的光通量; 二, 曝光时间影响时间积分内参与叠加的独立散斑图样数目 N 。

曝光时间对 CCD 接收光通量的影响与入射光光强对散斑的影响规律一致,

不再赘述，这里主要分析曝光时间对积分时间内独立散斑图样数目的影响。

以运动散射片为例，假设散射片运动速率为 v ，曝光时间为 T_E ，时间自由度 M 可表示为[72]，

$$M = \alpha \cdot v \cdot T_E \quad \dots (2.39)$$

式中， α 为等比例系数。将该式代入式 (2.33)，得到散斑对比度与曝光时间的关系为，

$$SC = \sqrt{\frac{\alpha v T_E + N \pm 1}{\alpha v T_E N}} \quad \dots (2.40)$$

图 2.24 描述了在 CCD 接收的光通量相同，散射片的运动速率不同时，散斑对比度与曝光时间的关系[72, 73]。其中，虚线代表理论模拟结果，离散点代表实验结果。由图中可知，在相同的散射片运动速率条件下，随着曝光时间的增加，散斑对比度降低；在相同的曝光时间条件下，随着散射片运动速率的增加，散斑对比度降低。

当曝光时间为 0.08s 时，随着散射片运动速率从 0.12mm/s 增加至 7.5mm/s，散斑对比度由 17%降低至 2%，继续增加散射片运动速率时，测得的散斑对比度也将保持 2%不变，原因如下：继续增加散射片速率时，系统中散射波的相位涨落超过了 2π 弧度，这时就不会再增加新的独立散斑图样，散斑对比度也就不再变化。

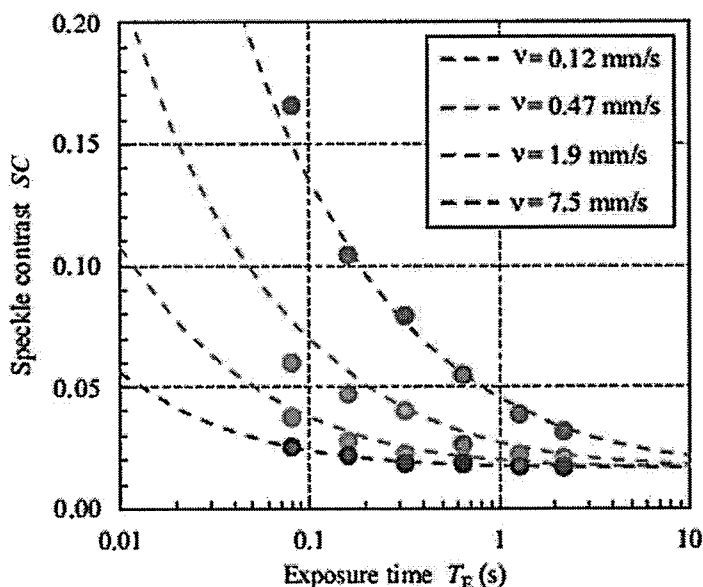


图 2.24 不同散射片运动速率时，曝光时间对散斑对比度的影响[72]

Fig. 2.24 The influence of exposure time on speckle contrast under different velocity of moving diffuser[72]

2.6 散斑抑制方法

散斑抑制方法均是基于对散斑影响因素和获得独立散斑图样的条件的分析来设计的（见 2.5 节），当多个独立的散斑图样求和时，散斑对比度将会减小，从而达到抑制散斑的目的[6]。

如果单个探测器相继获得两个独立的散斑图样，则求和得到的总的散斑图像的散斑对比度为，

$$SC = \frac{\sqrt{1+r^2}}{1+r^2} \quad \dots (2.41)$$

式中， $r = \bar{I}_2/\bar{I}_1$ ， $\bar{I}_1$ 和 $\bar{I}_2$ 分别为两个散斑图样的平均强度，如果 N 个独立的散斑图样相加，散斑对比度可表示为

$$SC = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N \bar{I}_n^2}}{\sum_{n=1}^N \bar{I}_n} \quad \dots (2.42)$$

式中， $\bar{I}_n$ 为参与求和的第 n 个散斑图样的平均强度。

当式（2.42）中的各分量平均强度相等时（对所有的 n 都有 $\bar{I}_n = \bar{I}_0$ ），可简化散斑对比度表达式，

$$SC = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad \dots (2.43)$$

如果 N 个相关的散斑图样相加，可以通过线性变换矩阵将 N 个相关的散斑图样转换为 N 个不相关（独立）的散斑图样，变为独立散斑图样相加。变换后，虽然总平均强度不变，但是各个独立散斑图样的平均强度发生变化。

所有的散斑抑制方法都产生唯一的效果，也即在人眼积分时间或 CCD 相机曝光时间内，产生尽可能多的独立散斑图样，将这些散斑图样在强度基础上叠加来减少散斑对比度[72]。可以从减弱时间相干性和减弱空间相干性两个方面来抑制散斑，目前的主要散斑抑制方法分类如图 2.25 所示。

实际情况中，激光显示设备通常采用多种散斑抑制方法，以最大程度抑制散斑。将每种散斑抑制方法看成是引入某一数目的自由度，则散斑对比度取决于降低因子 R ，表达式为[6]，

$$SC = \frac{1}{R} \quad \dots (2.44)$$

$$R = R_\lambda R_\sigma R_\theta R_N \dots (2.45)$$

式中, R_λ 为激光光源的波长多样性产生的降低因子, R_σ 为屏幕的偏振多样性产生的降低因子, R_θ 为投影系统和观察系统的角度多样性产生的降低因子, R_N 为空间多样性产生的降低因子。

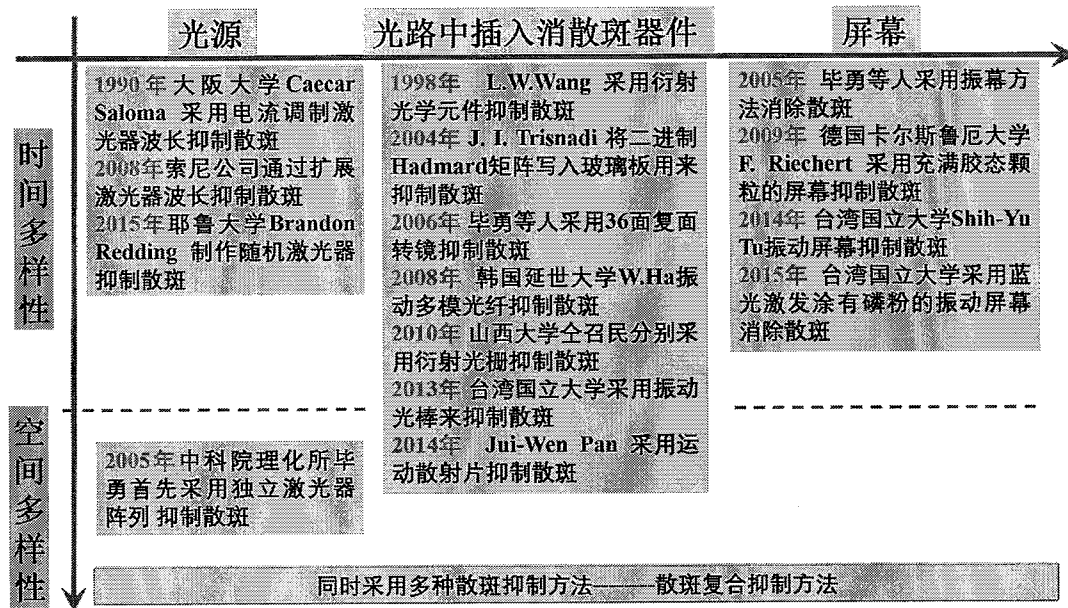


图 2.18 散斑抑制方法分类

Fig. 2.18 Classification of methods of speckle reduction

2.7 本章小结

本章对散斑进行了详细的介绍, 主要内容如下:

- 1.介绍了散斑的产生机理和表现形式。
- 2.介绍了散斑的研究历史。
- 3.介绍了散斑的分类。
- 4.推导了散斑尺寸的计算方法。
- 5.分析了散斑对比度的影响因素。
- 6.总结了散斑抑制的方法。

第3章 基于人眼生物学特征的散斑测量

无论是评测激光显示产品的散斑指标参数,还是验证散斑抑制方法的有效性,都需要对散斑准确测量。论文中,第1章对国内外散斑测量的研究现状进行了阐述,第2章对散斑测量结果的影响因素进行了分析,可以得出,目前国际上对于散斑测量的研究主要分为两大部分:第一,散斑测量结果的影响因素的研究,主要包括入射光光强、散斑尺寸、成像镜头数值孔径、成像镜头F数、成像镜头曝光时间和电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)曝光时间的影响,这些研究结果为散斑测量仪的研制提供了理论和实验基础;第二,散斑测量仪器的研制,包括日本Oxide公司Kubota等人研制的散斑测量仪和中国科学院光电研究院(Academy of Opto-electronics, AOE)毕勇等人研制的线阵散斑测量仪。这两种散斑测量仪各有优势:前者功能较为全面,可消除非均匀背景光和周期噪声,可计算散斑尺寸、散斑对比度等等;后者体积小、便携,数据处理速度快,适合应用于工程场景进行实时散斑测量。但是,以上两种设备参数未全面考虑人眼的生理结构参数和主观视觉特征,并且散斑评价体系过于单一,忽略了其他因素对人眼感知散斑图像的影响,导致实验测试结果经常出现与人眼主观感知不一致的现象,对比数据如表3.1所示。

表 3.1 散斑测量仪参数与人眼参数的对比

Table 3.1 Comparison between parameters of speckle measuring device and human eyes

参数	人眼	Oxide 散斑测量仪	AOE线阵散斑测量仪
特征参数	CCD像素尺寸	~4 μm	6.45 μm × 6.45 μm
	最小分辨角	0.33'—1'	0.44'
	瞳孔尺寸	2mm—8mm	ϕ 0.8mm, ϕ 1.0mm, ϕ 1.2mm, ϕ 1.5mm
光学传递函数	Westheimer人眼模型	符合	不符合
散斑评价方法	多种因素共同影响	散斑对比度 $SC=\sigma_I/I$	散斑对比度 $SC=\sigma_I/I$

因此,要准确测量散斑,散斑测量仪除了具有上述功能特点外,其参数必须符合人眼生物学特征,与人眼成像特点一致。为了满足准确测量散斑的应用化需求,本章进行了基于人眼生物学特征的散斑测量工作,主要内容包括以下几点:研究了人眼生物学特征参数和人眼的光学传递函数;搭建了模拟人眼的散斑测量系统,并计算了系统的光学传递函数,与 Westheimer 人眼模型的光学传递函数

进行了对比；采用模拟人眼的散斑测量系统，对新型磁驱动微扫描振镜（electromagnetic micro scanning mirror, EM-MSM）抑制散斑的效果进行了测量和评价[74]，并与人眼在屏幕上散斑的直观感知对比，验证测量设备的有效性。

3.1 人眼生物学特征

3.1.1 人眼生理学结构

眼睛的结构如图 3.1 所示，人眼是一个充满液体的准球形结构，由三个组织层组成：外纤维层（巩膜和角膜），中间血管层（由脉络膜，部分纤毛体和虹膜组成）和内层（主要由视网膜组成，也包括纤毛体和虹膜的一部分）[45, 74-76]。

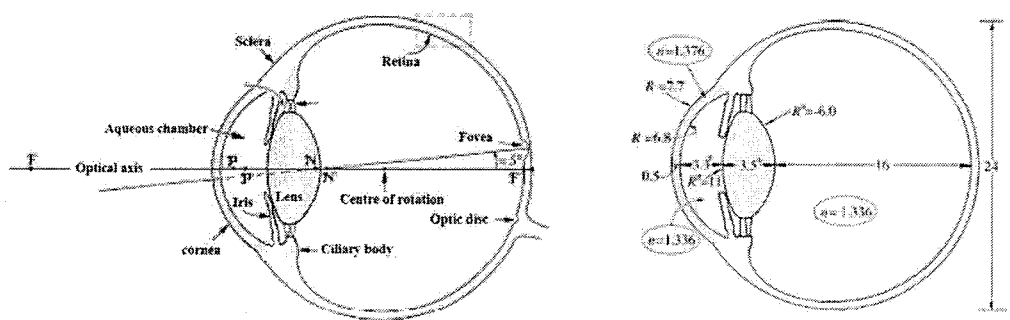


图 3.1 人眼内部结构

Fig. 3.1 Structure of human eye

表 3.2 不同亮度下瞳孔直径大小

Table 3.2 Diameter of pupil under different brightness

适应视场亮度 (cd/m^2)	10^{-5}	10^{-3}	10^{-2}	0.1	1	10	10^2	10^3	2×10^4
瞳孔直径/mm	8.17	7.80	7.44	6.72	5.66	4.32	3.04	2.32	2.24

眼球最外层的前端为角膜，是一层薄薄的透明层，允许光线进入眼睛。角膜后为虹膜，虹膜中央的圆孔，称为瞳孔，限制进入眼睛的光通量，是眼球光学系统中的孔径光阑。瞳孔的大小随环境光的变化而变化，它们之间的对应关系如表 3.2 所示，当环境光亮度由 10^{-5}cd/m^2 增加至 $2 \times 10^4\text{cd/m}^2$ 时，瞳孔直径由 8mm 减小至 2mm。虹膜之后是晶状体，晶状体是一个活跃的光学元件，随着物体距离的改变，相应地改变晶状体的折光度，调整光路，使得不同距离的物体都能在视网膜上成清晰的像。晶状体后是前房和视网膜，视网膜是人眼成像系统的接收面，

上面的感光细胞接收光信号后，由视神经传输至大脑皮层。

3.1.2 人眼的分辨能力

1. 视角

人眼看外界物体时，往往会根据物体在视网膜上所成像的大小判定物体的大小，而视网膜上成像的大小不仅与物体的实际大小有关，也与物体离眼睛的距离有关。我们通常采用“视角”描述这两个因素，视角定义为，一定大小物体的两端（或两个分开的点）的主光线与光瞳中心所形成的夹角，用 θ 表示。这样一来，视角大，则视网膜上的像就大；视角小，则视网膜上的像就小。

2. 人眼的分辨极限

根据视角的定义了解到，两个分离的物点所形成的视角越小，则两个视网膜上的像点离得越近。接下来，我们将讨论当视角多大时，眼睛刚好能够分辨出两个点。

（1）最小分辨角

刚好能够分辨的外界两个分离的点与光瞳中心形成的夹角叫做最小分辨角，用 $\theta_{\min}$ 表示。当视角大于等于最小分辨角时，人眼可分辨出这两个物点；当视角小于最小分辨角时，人眼无法分辨出这两个物点。

（2）人眼的分辨极限

图 3.2 描述了人眼分辨极限的生理基础。外界一个物点在视网膜上形成一个像点，刺激一个视细胞，若像点 a 和像点 b 所刺激的两个视细胞之间至少间隔一个不受刺激的视细胞，则人眼可以分辨出是两个点；若像点 c 和像点 d 所刺激的是两个相邻的视细胞，则无法分辨是两个点，而会看成是一个大的物点。

在一定的外界条件下，最小分辨角主要与视网膜的视细胞直径和分布有关。在人眼黄斑处，因人而异，视锥细胞直径约为 $1.0\sim 1.5\mu\text{m}$ ，视锥细胞边缘间隔约为 $0.5\sim 1.0\mu\text{m}$ ，瞳孔中心距离视网膜的距离约为十几毫米。假设视锥细胞直径为 $1.5\mu\text{m}$ ，视锥细胞边缘间隔为 $0.5\mu\text{m}$ ，瞳孔中心距离视网膜的距离为 16.67mm ，则人眼最小分辨角为，

$$\theta_{\min} = \frac{4\mu\text{m}}{16.67\text{mm}} = 0.83' \quad \dots (3.1)$$

最小分辨角大小因人而异，典型值为 $1'$ ，据报道，有的人可以达到 $0.5'$ ，甚至 $0.33'$ 的最小分辨角。

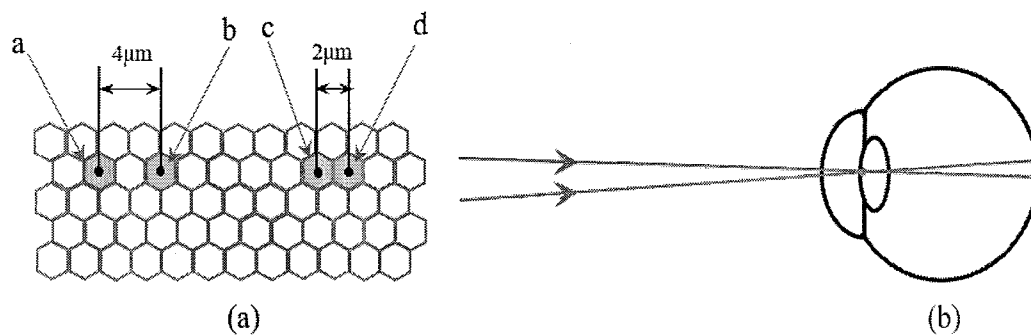


图 3.2 (a)受刺激的视细胞分布图; (b)最小分辨角[76]

Fig. 3.2 (a) Distribution of stimulated ophthalmic cells; (b) minimum angle of resolution[76]

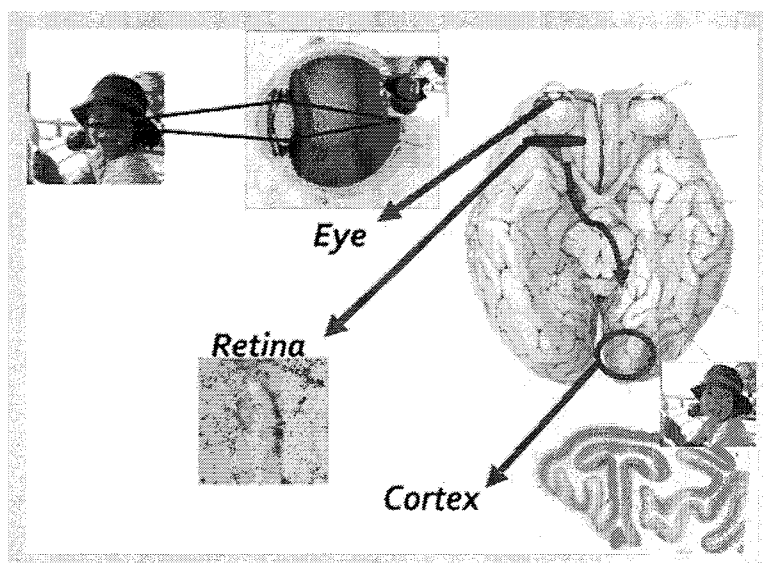


图 3.3 人眼成像过程[77]

Fig. 3.3 Imaging process of human eyes[77]

3.1.3 人眼的成像过程与光学传递函数

人眼视觉成像是一个复杂的过程。图 3.3 是一个视觉过程的简化示例[77]，人眼视觉过程由眼睛开始，眼睛将实物成像于视网膜上，形成倒立图像，随后光信号被光感受器接收并传送到视觉皮层进行处理，最终产生视觉，看到物体。当人眼成像时，眼球还可以在外部的六块肌肉的作用下移动，从而扫描视觉环境。

任何光学成像系统都不能完整无损地传递物体的信息到像面，通常采用光学传递函数 (optical transfer function, OTF) 来表示系统的成像质量。在研究人眼的过程中，科学家构造了多种人眼模型，本文选择 Westheimer 人眼模型，在该模

型下, 3mm 瞳孔直径的人眼光学传递函数为[11, 78, 79]

$$OTF_s(\rho) = 0.2865e^{-3\rho^3} + \frac{0.01562}{0.1479^2 + \rho^2} \quad \dots (3.2)$$

式中, $\rho = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$, 其量纲为每弧分的周数, v_x 和 v_y 分别代表空间频域的坐标。

系统的通光孔径(人眼的瞳孔大小)对于系统的成像质量起着决定性作用。图 3.4 描述了光学传递函数与系统通光孔径的关系[80]。它们可以通过两种方式联系起来, 一, 由瞳孔孔径函数经过傅里叶变换后, 再依次计算振幅点扩散函数和强度点扩散函数, 然后再经过傅里叶逆变换, 得到系统的光学传递函数; 二, 直接通过瞳孔孔径函数的归一化自卷积得到系统的光学传递函数。

上述第一种计算方式更便于从物理上理解瞳孔孔径函数是如何影响人眼成像质量的。物面光场可以看作是点源的集合, 由于人眼具有有限的瞳孔大小(通光孔径), 各个点源经过角膜、晶状体和房水后(相当于透镜)在视网膜形成各自的衍射斑, 这些衍射斑具有相同的函数形式, 但是它们在像面叠加时受到点扩散函数的作用, 叠加后形成人眼接收的图像。由此看来, 人眼的瞳孔孔径不仅使点源成像为衍射斑, 而且还决定了各个衍射斑的叠加权重, 最终影响了成像质量。

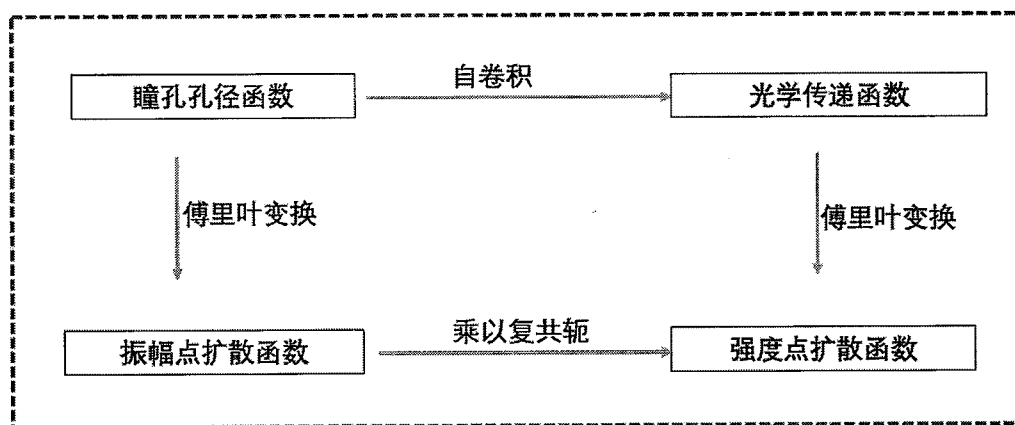


图 3.4 瞳孔孔径函数, 光学传递函数, 强度点扩散函数以及振幅点扩散函数的关系图[80]

Fig. 3.4 Relationship of Pupil Function, Optical Transform Function, Intensity Point Spread Function and Amplitude Point Spread Function[80]

3.2 模拟人眼的散斑测量系统

要使散斑测量系统模拟人眼的视觉特性, 就要使测量系统能够有效模拟眼睛的参数, 以保证测量系统的光学传递函数与人眼光学传递函数相匹配, 使二者在相同条件下对相同物体具有类似的成像。

1. 硬件系统

在模拟人眼参数方面，依据人眼的生物学特征参数（见 3.1 节），本文选择两款工业相机 Manta G-201B 和 Point Gray CM3-U3-13Y3M-CS 分别模拟人眼，并对比二者的结果，二者搭配的定焦镜头（Computar）焦距均为 35mm，相关配置参数如表 3.3 所示。

首先，基于对光学传递函数影响因素的分析，推导直径 L 的圆形通光孔径在频域 ρ 内的系统光学传递函数，表达式为[81]

$$OTF_c(\rho) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} [\arccos(\frac{\rho}{\rho_0}) - \frac{\rho}{2\rho_0} \sqrt{1 - (\frac{\rho}{2\rho_0})^2}], & \rho \leq \rho_0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad \dots (3.3)$$

式中， $\rho_0 = \frac{L}{2\lambda d_i}$ 是光学系统的截止频率， d_i 为出瞳到像面的距离。

表 3.3 模拟人眼的相机配置参数

Table 3.3 configuration parameters of CCD simulating human eyes

CCD camera	Manta G-201B	Point grey CM3
Focal length/mm	35mm	35mm
CCD resolution	1624×1234	1280×1024
Pixel size	4.4×4.4μm ²	4.8×4.8μm ²
Observe Area on screen/mm	94mm ×71mm	94mm ×71mm
Visual angle(H×V)	11.2°×8.5°	10.4°×7.8°
Angle resolution	0.4'	0.46'
Work distance/mm	475mm	475mm

然后，利用式(3.3)计算散斑测试系统（Manta G-201B）在不同参数下的光学传递函数，并与 Westheimer 人眼模型光学传递函数对比，结果如图 3.5 所示。图中，黑色曲线代表 Westheimer 人眼模型在 3mm 瞳孔时的光学传递函数，红色曲线和绿色曲线分别描述了拍摄距离为 675mm、475mm 时，散斑测量系统的光学传递函数。从图中可看出，黑色曲线与红色、绿色曲线均符合的较好，也就是说，实验中搭建的测试系统的光学传递函数与 Westheimer 人眼模型的光学传递函数基本一致，证明了该测量装置的有效性，也即该散斑测量系统可以有效的模拟人眼光学成像过程。

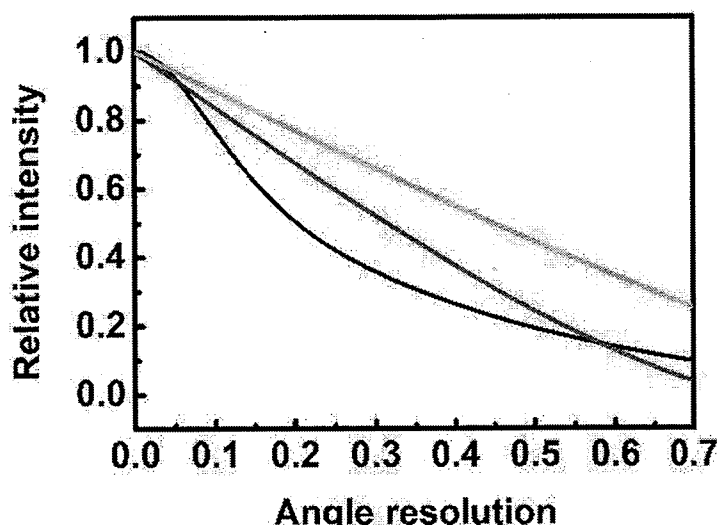


图 3.5 理论模拟对比 Westheimer 人眼模型（黑色实线）3mm 瞳孔直径的光学传递函数与衍射受限成像系统在 475mm（绿色实线）和 675mm（红色实线）观察距离时的光学传递函数

Fig. 3.5 A comparison between OTF of human eyes (dark) and the OTF of a 3mm diffraction-limited circular aperture when $z_e=475$ (green) and $z_e=675$ (red)

2. 软件系统

模拟人眼的散斑测量系统充分利用了软硬件结合技术，实现了测量系统的自动化运行，接下来将详细描述软件系统的设计原理和数据处理方法。

软件系统的设计流程图如图 3.6 所示，包括散斑测量、散斑图像校正和散斑图像的量化评价。散斑测量过程就是将驱动软件与硬件建立连接，来获取图像数据。这可以通过打开并配置 CCD 相机设备来完成。硬件的配置信息可以使驱动软件控制硬件，并正确解析传送至计算机。CCD 的配置信息通常保存在配置文件中，内容包括获取数据的硬件接口、图像大小、像素位深度、抓取速率和抓取方式等等。一旦建立了连接，软件就可以控制 CCD 相机获取散斑图像并传送至事先分配好的图像缓冲区。

CCD 相机获取散斑图像后，观察散斑图像是否存在背景光不均匀现象或图像中有周期噪声的干扰。如果存在上述两种噪声，则分别采用环形陷波滤波器消除非均匀背景光，和阵列陷波滤波器消除周期噪声（见第 4 章）。最后将校正后的散斑图像进行量化分析。对散斑图像的量化分析包括计算散斑图像的灰度值分布、散斑尺寸、散斑对比度（见第 2 章）、结构偏离度（见第 4 章）和散斑影响

度（见第 4 章）等等。

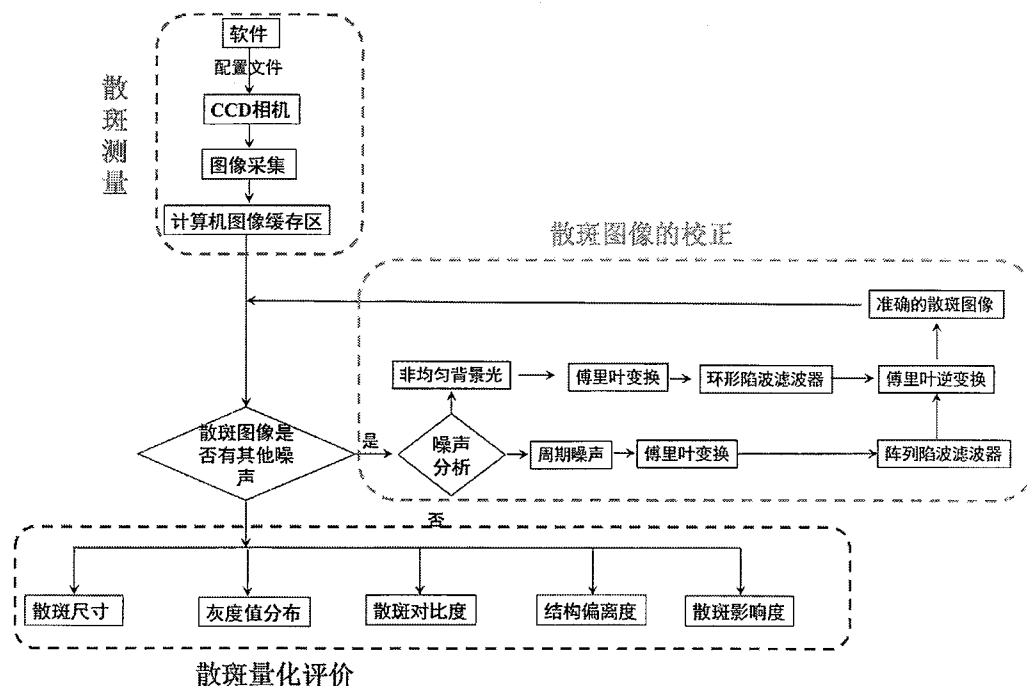


图 3.6 软件系统原理图

Fig. 3.6 The working principle of the software system

按照上述的软件设计流程，设计了散斑测量软件界面，如图 3.7 所示，该界面主要实现了以下功能：

- 按下“grab”按钮，系统开始进行散斑图像采集，并可以在该按钮链接的菜单上改变 CCD 相机的曝光时间、增益、 γ 值等参数；
- “Camera Name”用来选择硬件接口，以确定在工作中使用哪台相机；
- “□”为感兴趣区域 (reigon of interest, ROI)，可以手动框选待计算区域，然后计算得出该区域的二值化图像、三维灰度图、散斑一维尺寸和散斑对比度值；
- “image grab”呈现了散斑图像原图，“Histogram”用来呈现该散斑图像的灰度值分布图，“binary image”用来呈现散斑图像中 ROI 区域的二值化结果；
- “save image”按钮用于图像的本地存储，“introduce”按钮可导入本地图片；“End”按钮结束软件运行。

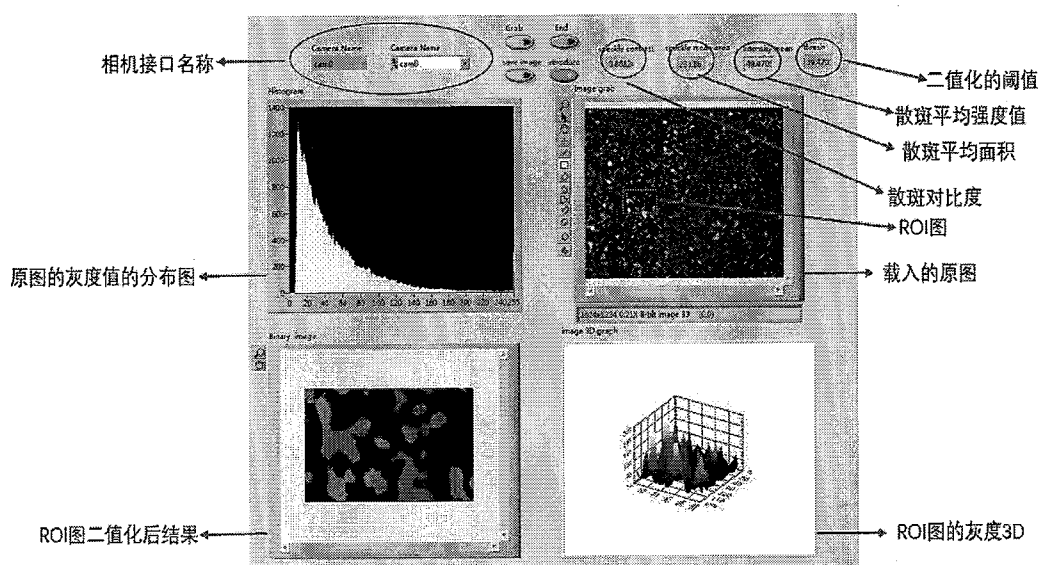


图 3.7 散斑测量界面

Fig. 3.7 speckle measuring surface

3.3 测试 EM-MSM 器件抑制散斑的效果

本节，将采用上一节描述的模拟人眼的散斑测量设备，来测试新型电磁驱动的微型扫描反射镜(Electromagnetic micro-scanning mirrors, EM-MSM)器件抑制散斑的效果。

3.3.1 EM-MSM 器件

EM-MSM 器件的结构和实物装置如图 3.8 所示：图(a)为微振镜的镜面结构图，圆形区域为反射区，镜面可沿快轴和慢轴两个方向转动；图(b)为 EM-MSM 器件的驱动接口，该器件可以单边驱动也可以双边驱动（本节描述的实验中均使用单边驱动），红色导线为快轴驱动输入端，蓝色导线为慢轴驱动输入端；图(c)为 EM-MSM 器件正面实物图，反射面直径为 6.5mm，该器件是由硅片和电镀镍膜组成，在外加电流线圈产生的磁场中镍膜被磁化，由此产生了驱动反射镜角度偏转的作用力，这种电磁驱动微镜的方式能够有效地减少镜板上的欧姆热和功率损失。

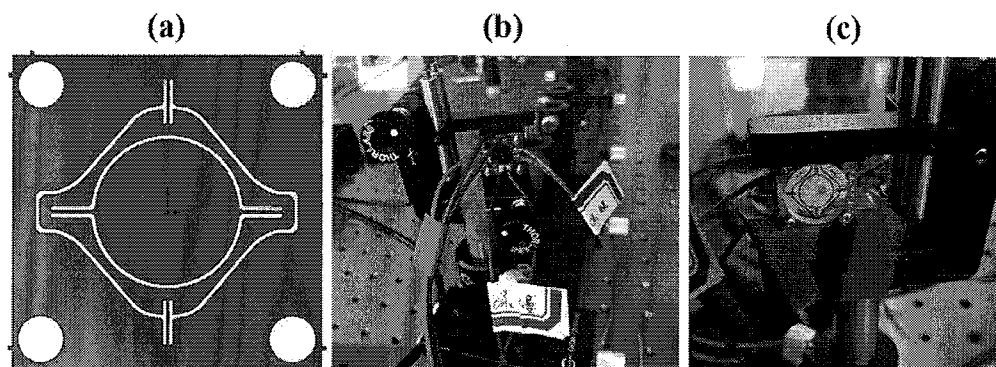


图 3.8 微电磁驱动的微型扫描反射镜

Fig. 3.8 Electromagnetic micro-scanning mirrors (EM-MSM)

首先, 测量扫描振镜快轴和慢轴的共振频率大小。采用信号发生器 AFG1022 驱动 EM-MSM, 固定驱动功率, 使驱动频率在范围 100Hz–2000Hz 内变化, 测量扫描范围最大时对应的扫描频率, 也即最佳共振频率 (该扫描频率范围内, 快轴和慢轴均有 4 个共振频率)。测量结果为, 慢轴的最佳共振频率为 620Hz, 快轴的最佳共振频率为 1563.8Hz。

然后, 测量 EM-MSM 驱动频率分别为快、慢轴的最佳共振频率时, 振镜的偏转角度与驱动功率的关系, 实验结果如图 3.9 所示。设置慢轴扫描频率为 620Hz 时 (慢轴共振频率), 随着驱动功率的增加, 扫描角度增加, 最大的扫描角度为 7.8° , 此时的驱动功率为 104.22mW。设置快轴扫描频率为 1563.8Hz 时 (快轴共振频率), 随着驱动功率的增加, 扫描角度增加, 扫描角度最大为 6.53° , 此时的驱动功率为 101.52mW。

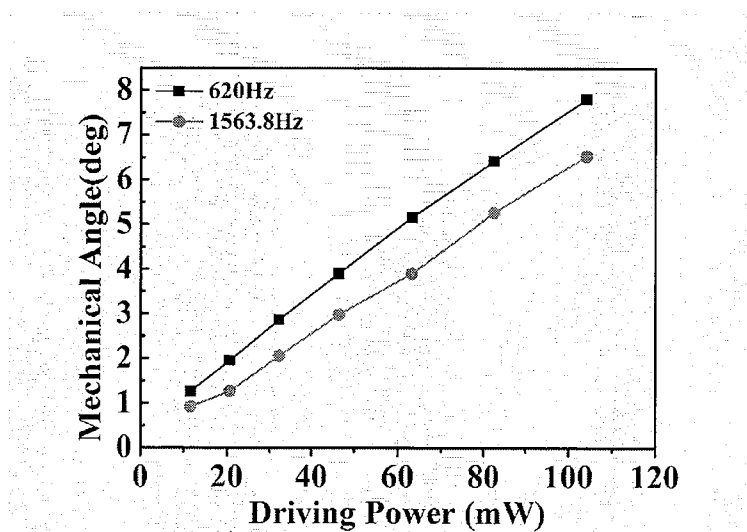


图 3.9 EM-MSM 的机械扫描角度与驱动功率的关系

Fig.3.9 The Relation between mechanical scanning angle and driving power consumption of EM-MSM

3.3.2 EM-MSM 器件抑制散斑

将 EM-MSM 器件置于投影光路系统, 进行散斑抑制实验, 实验原理图如图 3.10 所示, 中心波长为 532nm 的全固态激光器作为照明光源, 出射的光束由 EM-MSM 反射, 使用凸透镜将多角度的反射光束聚焦到光管中, 光管出射光经过投影镜头后照射在屏幕上, 并由 CCD 相机成像, 成像结果输入至计算机处理。光路中, 光管出口与投影透镜之间的距离为 30mm, 投影透镜与屏幕之间的距离为 930mm, 相机与屏幕的距离为 475mm, 设置画面亮度为影院级别, 也即 48cd/m^2 。

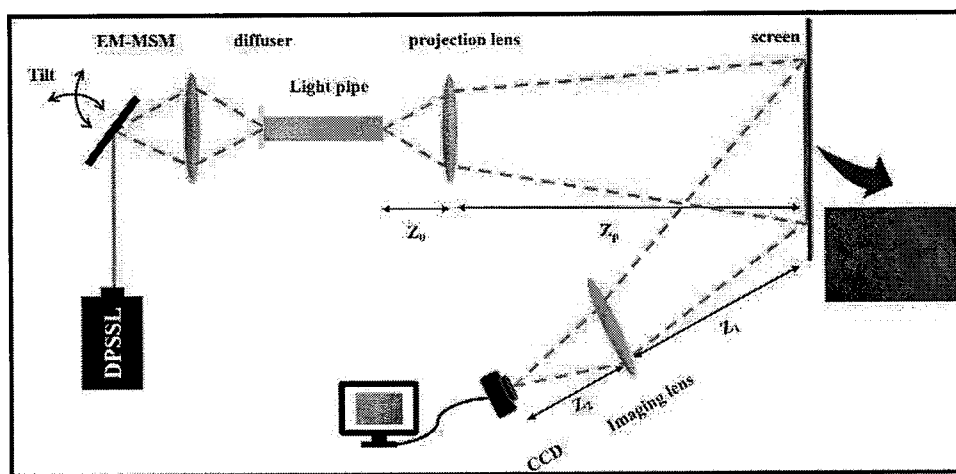


图 3.10 实验装置图

Fig. 3.10 Experimental setup

设置快轴和慢轴的驱动电流使 EM-MSM 开启时的快慢轴偏转角度均为 4° , 快轴和慢轴的驱动频率分别为 1563.8Hz 和 620Hz。将 EM-MSM 器件关闭或开启, 观察屏幕上的散斑图像, 由散斑测量系统 Manta G201B 和 Point Gray M3 分别记录散斑图像, 并实时计算散斑对比度。

图 3.11 为散斑测量系统 Manta G201B 记录的散斑图像。图中第一行是 EM-MSM 关闭时, 测试距离和镜头 F 数分别为 (a) $Z_1 = 475\text{mm}$, $F_{\#1} = 11$, (b) $Z_1 = 675\text{mm}$, $F_{\#1} = 11$, (c) $Z_1 = 675\text{mm}$, $F_{\#1} = 8$ 时捕获的散斑图像。图中第二行, 除了 ES-MSM 打开外 (偏转角设定为 4°), 其它条件与第一行对应图像一致。这

些图像对应的散斑对比度如表 3.4 所示, 对比第一行图像和第二行图像的散斑对比度, 当 EM-MSM 器件由关闭到开启时, 散斑对比度有了明显降低, 降低了~35%, 原因如下: 当 EM-MSM 开启时, EM-MSM 使光束角度不断偏转, 产生了更多的独立散斑图样, 在 CCD 积分时间内叠加平均, 导致散斑对比度降低。

对比图 3.11 (d), (e) 和 (f) 发现, 当镜头 F 数恒定, 测试距离增加时, 测得的散斑对比度降低, 原因如下: 当拍摄距离增加时, 成像镜头的数值孔径变小, 导致散斑对比度减小[9]。当测试距离恒定, F 数减小时, 测得的散斑对比度也减小, 原因如下: 当 F 数减小时, 散斑尺寸减小, 导致部分散斑在 CCD 像素单元内产生了空间积分, 使散斑对比度减小。

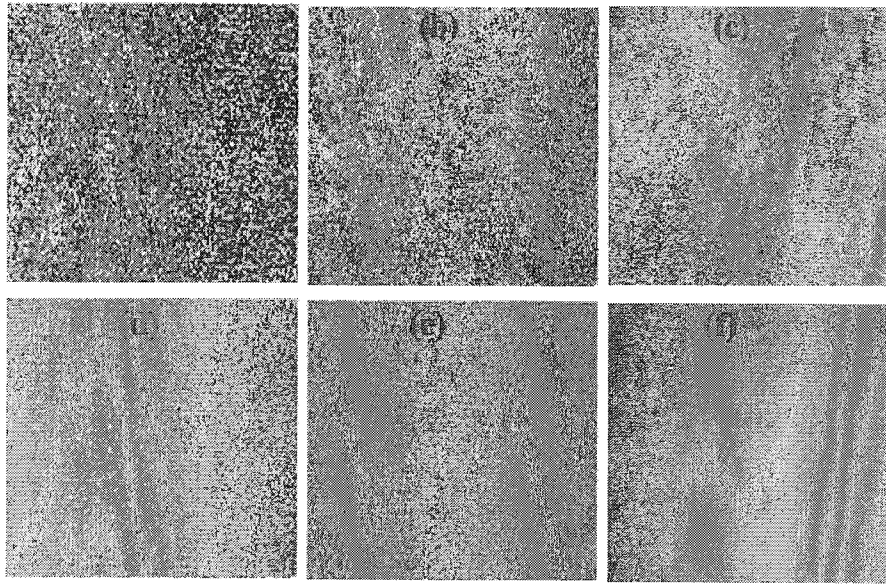


图 3.11 采用 Manta G201B CCD 相机捕获的散斑图像, 平均灰度值为 157graylevels: 第一行, 扫描振镜沿快轴和慢轴的偏转角为 0° , 拍摄距离和镜头 F 数分别为 (a) $Z_1 = 475\text{mm}$, $F_{\#1} = 11$, (b) $Z_1 = 675\text{mm}$, $F_{\#1} = 11$, (c) $Z_1 = 675\text{mm}$, $F_{\#1} = 8$; 第二行, 扫描振镜沿快轴和慢轴的偏转角为 4° , 拍摄距离和镜头 F 数分别为 (d) $Z_1 = 475\text{mm}$, $F_{\#1} = 11$, (e) $Z_1 = 675\text{mm}$, $F_{\#1} = 11$, (f) $Z_1 = 675\text{mm}$, $F_{\#1} = 8$

Fig. 3.11 speckle images captured by the CCD camera (Manta G201-B) with mean intensity $\bar{I} = 157\text{graylevels}$: the first row, EM-MSM half scanning angle $\theta = 0^\circ$, (a) $Z_1 = 475\text{mm}$, $F_{\#1} = 11$, (b) $Z_1 = 675\text{mm}$, $F_{\#1} = 11$, (c) $Z_1 = 675\text{mm}$, $F_{\#1} = 8$; the second row, EM-MSM half scanning angle $\theta = 4^\circ$, (a) $Z_1 = 475\text{mm}$, $F_{\#1} = 11$, (b) $Z_1 = 675\text{mm}$, $F_{\#1} = 11$, (c) $Z_1 = 675\text{mm}$, $F_{\#1} = 8$

表 3.4 CCD Manta G201-B 记录的散斑对比度

Table 3.4 Speckle contrast recorded by CCD Manta G201-B

$F\#$	observing distance (cm)	Speckle contrast (%)	
		EM-MSM off	EM-MSM on
11	475	33.3	14.6
11	675	31.1	11.8
8	675	22.7	8.2

同样地, 采用 Point Gray M3 散斑测量系统测试 EM-MSM 器件在不同工作状态下的散斑图像, 除了更换散斑测量系统的 CCD 相机外, 实验条件与图 3.11 中的一致, 实验结果如图 3.12 所示。表 3.5 列出了不同条件下的散斑对比度, EM-MSM 器件由关闭到开启时, 散斑对比度也降低至 35%左右, 这与 Manta G201B 相机的测量结果相一致。然而, 由于 Point Gray 相机的像素尺寸大于 Manta G201B 相机的像素尺寸, 导致测量散斑过程中单个像素单元内产生了较大程度的空间积分, 使 Point Gray 相机测得的散斑对比度较小。

由上述测量结果可知, EM-MSM 器件角度扫描时, 具有明显的抑制散斑效果。同时, 搭建的模拟人眼生物学特征的散斑测量系统的测量结果, 与人眼对屏幕上散斑的直观感受相一致, 证明了这套散斑测量系统的有效性, 以 Manta G-201B 为例, 其参数与 Oxide 散斑测量仪、AOE 散斑测量仪和人眼的对比如表 3.6 所示。

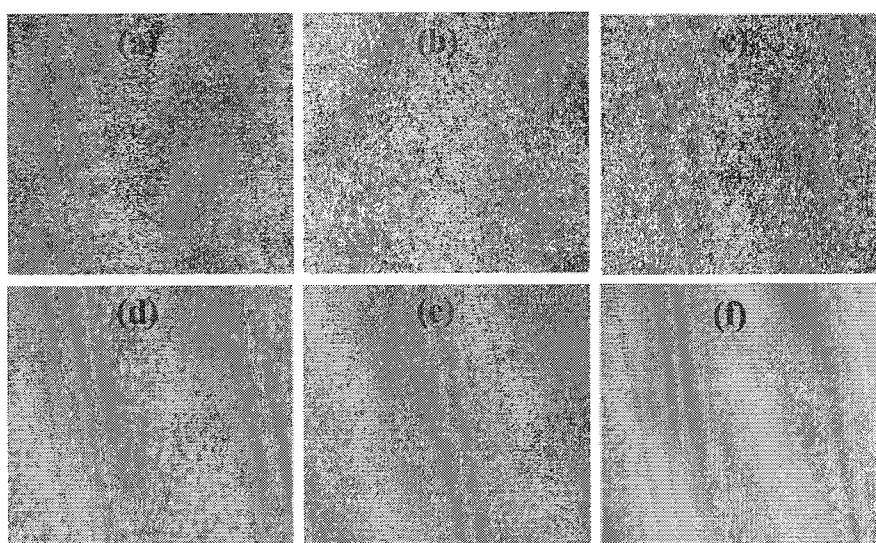


图 3.12 采用 Point Gray CCD 相机捕获的散斑图像, 平均灰度值为 157graylevels: 第一行, 扫描振镜沿快轴和慢轴的偏转角为 0° , 拍摄距离和镜头 F 数分别为 (a) $Z_1 = 475\text{mm}$, $F\# = 11$, (b) $Z_1 = 675\text{mm}$, $F\# = 11$, (c) $Z_1 = 675\text{mm}$, $F\# = 8$; 第二行, 扫描振镜沿快轴和慢轴的偏转角为 4° , 拍摄距离和镜头 F 数分别为 (d) $Z_1 = 475\text{mm}$, $F\# = 11$, (e) $Z_1 = 675\text{mm}$,

$F_{\#i} = 11, (f) Z_1 = 675\text{mm}, F_{\#i} = 8$

Fig. 3.12 speckle images captured by the CCD camera (Point Gray) with mean intensity $\bar{I}=157\text{graylevels}$: the first row, EM-MSM half scanning angle $\theta=0^\circ$, (a) $Z_1=475\text{mm}, F_{\#i}=11$, (b) $Z_1=675\text{mm}, F_{\#i}=11$, (c) $Z_1=675\text{mm}, F_{\#i}=8$; the second row, EM-MSM half scanning angle $\theta=4^\circ$, (a) $Z_1=475\text{mm}, F_{\#i}=11$, (b) $Z_1=675\text{mm}, F_{\#i}=11$, (c) $Z_1=675\text{mm}, F_{\#i}=8$

表 3.5 CCD Point gray 记录的散斑对比度

Table 3.5 Speckle contrast recorded by CCD Point gray

$F\#$	observing distance (cm)	Speckle contrast	
		EM-MSM off	EM-MSM on
11	475	28.5	10.7
11	675	27.5	10.3
8	675	23.7	8.4

表 3.6 散斑测量仪研究结果与人眼参数的对比

Table 3.6 Comparison between parameters of speckle measuring device and human eyes

参数	人眼	Oxide 散斑测量仪	AOE线阵散斑测量仪	研究结果
CCD像素尺寸	$\sim 4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$	$6.45\mu\text{m} \times 6.45\mu\text{m}$	$3.5\mu\text{m} \times 3.5\mu\text{m}$	$4.4\mu\text{m} \times 4.4\mu\text{m}$
特征参数	最小分辨角	0.33'—1'	0.44'	0.17'—0.04'
瞳孔尺寸	2mm~8mm	$\varphi 0.8\text{mm}, \varphi 1.0\text{mm}, \varphi 1.2\text{mm}, \varphi 1.5\text{mm}$	F2.4	3mm
光学传递函数	Westheimer人眼模型	符合	不符合	符合
散斑评价方法	多种因素共同影响	散斑对比度 $SC=\sigma_I/I$	散斑对比度 $SC=\sigma_I/I$	散斑影响度 $SID=\left\{1-\frac{1}{1+SC^2}\right\}^{1/2}$

3.4 本章小结

本章的主要工作内容如下：

- 1.介绍了人眼的生理学结构和分辨能力，分析了人眼的成像过程，推导了人眼光学传递函数。
- 2.搭建了两套模拟人眼的散斑测量系统，设置测量系统的参数，使其能很好的匹配人眼的光学传递函数。
- 3.测试了 EM-MSM 器件的性能，将其用于散斑抑制，使用搭建的模拟人眼散斑测量系统测量了散斑抑制的效果。

第4章 模拟人眼主观视觉的散斑评价

通常采用散斑对比度(speckle contrast, SC)来表征散斑,该表征方法计算简便,物理意义明确。但是散斑对比度只能表现散斑图像的强度起伏程度,忽略了其他因素的影响[82-86],导致表征结果经常出现与人眼主观感受不一致的情况。2004年, Wang Zhou 等人提出了利用结构相似度(structural similarity index, SSIM)量化评价压缩图像的质量,该方法除了能够表现散斑图像的强度起伏,还考虑了图像结构关联。SSIM 理论认为人眼的主要功能是从视场中提取结构信息,结构相关性对图像质量评价具有重要的影响[18, 87-90]。

本章内容中,首先分析了其他噪声对评价散斑图像的影响,并提出了消除噪声的方法。然后基于 SSIM 理论基础,建立了结构偏离度(structural deviation degree, SDD)评价方法,将其应用于散斑图像的评价,并与散斑对比度表征方法对比,研究了该方法表征散斑图像的可行性。最后提出了散斑影响度(speckle influence degree, SID)方法,并从像素关联、散斑对比度和图像清晰度三个方面,对表征结果进行了分析和讨论。

4.1 散斑图像中的其他噪声

在激光显示整机中,半导体激光器出射激光,激光经过透镜、匀光片、光棒和空间光调制器(digital micromirrors device, DMD)等一系列光学元件后,作为光源将图像投射至屏幕,屏幕上的图像最后由人眼视网膜或 CCD 相机接收,从而完成整个激光显示过程。所以,在人眼或 CCD 相机获取的图像中,除了由于激光相干性而产生的散斑噪声之外,还存在其他噪声,主要包括环境照明光引起的背景光不均匀、DMD 上微反射镜边界产生的周期噪声和 CCD 暗电流噪声。由于投影图像的灰度值一般远大于 CCD 暗电流引起的灰度起伏,CCD 暗电流噪声可以忽略不计,也就是说,只需消除非均匀背景光和周期噪声,即可得到准确的散斑图像。

4.1.1 非均匀背景光的消除

2016 年,国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)发布了单色散斑测量标准 62906 《laser display device-5--2: Optical measuring

methods of speckle contrast》。该标准中规定：测量散斑须在黑室内进行，除了用于投影显示的激光光源，其他照明光源需全部关闭，以避免其他照明背景光对散斑测量和评价的准确性造成影响。

2017 年，IEC 发布了彩色散斑测量标准 62906 《laser display device-part 5-4: Optical measuring methods of colour speckle》。该标准规定：在单色散斑测量过程中，需要对背景光进行匀化处理。

以上两个标准均对消除非均匀背景光对散斑评价的影响做了明确要求，以避免出现错误的测量结果。这就要求我们在进行散斑评价之前，必须确保散斑图像的背景光是均匀分布的。

接下来，介绍我们设计的用环形陷波滤波器(annular notch filter)消除非均匀背景光的方法。首先将散斑图像进行傅里叶变换转换到频率域，在该频域下，散斑颗粒为高频分量，沟壑状的非均匀背景光为中频分量，均匀背景光为零频分量。然后，采用环形陷波滤波器将中频也即非均匀背景光成分滤除。最后，利用傅里叶逆变换，将图像从频率域变换回空间域，得到消除了非均匀背景光的散斑图像。

图 4.1 为使用环形陷波滤波器滤除非均匀背景光的实验结果图。图 (a) 为 CCD 记录的散斑原图（空间域）。图 (b) 为图像傅里叶变换后的频率域图，此图已经经过环形陷波滤波器作用，中频成分被滤除，其中，插图为设计的环形滤波器。图 (c) 为图 (b) 中的频率域图像经傅里叶逆变换后的散斑图像，由图中显示的结果可知，经过环形滤波器滤波后，非均匀背景光已经被消除。

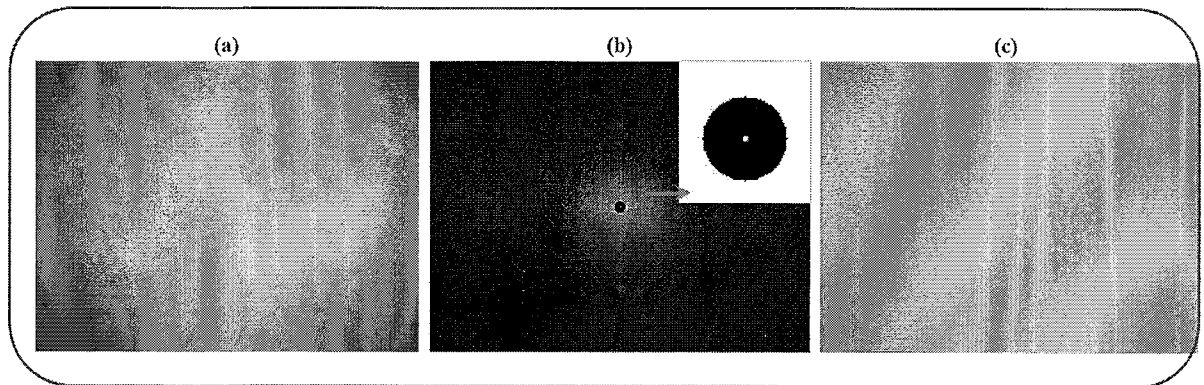


图 4.1 (a) CCD 采集的散斑图像原图，(b) 空间频域内，环形陷波滤波器作用在原图上消除不均匀背景光，插图 of 环形陷波滤波器。(c) 背景光均匀的散斑图样

Fig. 4.1 Raw speckle image captured by CCD, (b) in spatial frequency domain, the annular notch filter works on speckle to remove the effects of background, and the inset is annular notch filter, (c)

speckle image after uniform-conversion background

图 4.2 为彩色散斑测量标准 IEC 62906 中的消除非均匀背景光的示例。图(a) (b) (c) 分别为 CCD 捕获的蓝、绿、红 (blue, green, red, BGR) 散斑图像, 图中除了高频率的散斑强度的起伏外, 还具有较低频率的沟壑状强度起伏背景, 也即非均匀背景光。选取 10×10 大小的局域面积, 对该面积内的非均匀背景光处理, 然后采用滑动窗口, 对图片中的其他部分依次处理, 最终得到图 (d) (e) (f) 所示的背景光均匀 (非均匀背景光消除) 的散斑图像。

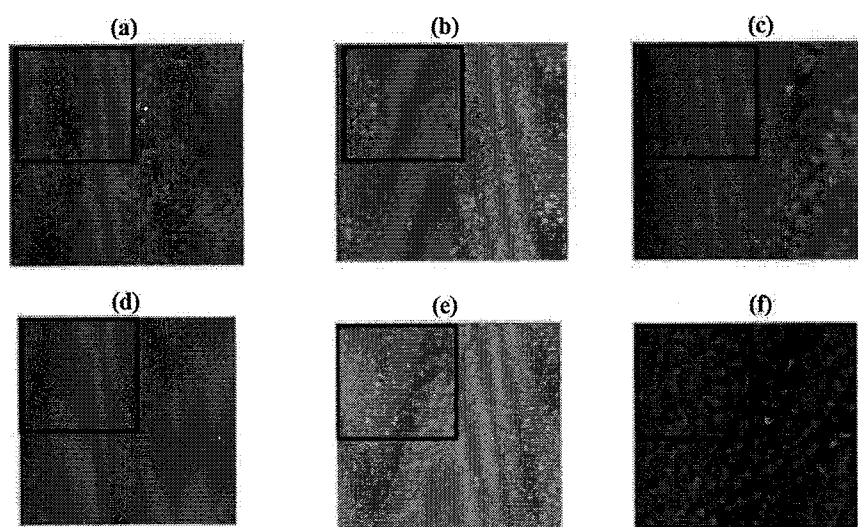


图 4.2 (a) Blue, (b) green, (c) red 散斑原图像; 背景光匀化处理后的 (d) blue, (e) green, (f) red 散斑图像

Fig.4.2 The raw speckle images of (a) blue, (b) green, (c) red ; (d) blue, (e) green, (f) red speckle images after post-processing of uniform-conversion of the background

4.1.2 周期噪声的消除

1. 数字微反射镜器件的结构 (digital micromirrors device, DMD)

激光投影整机中的核心部件之一是 DMD, 以德国 ViALUX 公司基于 DLP® Discovery™ 4100 芯片组开发的 V 系列 DMD 为例, 介绍 DMD 的结构和工作原理。如图 4.3 所示, (a) 为 DMD 的外观实物图; (b) 为 DMD 的内部结构图, DMD 由微反射镜阵列组成, 外部安装透视窗口加强对反射镜的保护, 微反射镜只有 $\pm 12^\circ$ 两个偏转角, 且不能连续变化; (c) 为微反射镜阵列放大图; (d) 为 DMD 的工作原理图, 光束入射到 DMD 表面后, DMD 根据视频信号转换的脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 信号指令, 确定每个微反射镜的偏转

角度和偏转时间，结合 RGB 三基色光源投影出彩色图像。

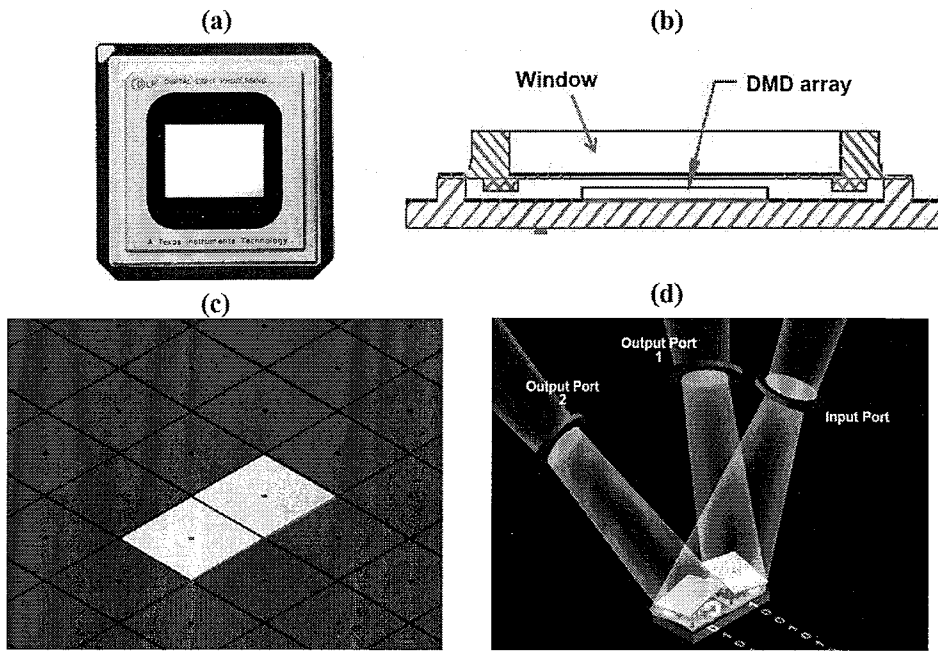


图 4.3 (a) 数字微反射镜器件 (digital micromirrors device, DMD) 空间光调制器, (b) DMD 结构, (c) 微反射镜阵列 (d) DMD 工作原理

Fig. 4.3 Spatial light modulator called digital micromirrors device (DMD), (b) the inner structure of DMD, (c) arrays of micromirrors, (d) the working principal of DMD

2. 周期噪声的来源

激光投影整机中的 DMD 由微反射镜阵列组成，每个微反射镜的偏转角和偏转时间均可独立控制，正是微反射镜阵列结构的存在，使得 DMD 在显示图像的同时，也显示了微反射镜边界的灰度，给图像带入了周期噪声。

周期噪声也与散斑测量过程中的测量距离有关，图 4.4 为测试激光投影整机（中科极光科技股份有限公司产生）投射的散斑图像的实验装置图。下面将根据成像与照明的关系，确定在什么测试距离范围内，CCD 捕获的散斑图像会存在周期噪声。

整机中 DMD 芯片的尺寸为 $14.5\text{mm} \times 8.16\text{mm}$ ，像素分辨率为 1920×1080 ，像素尺寸为 $7.56\mu\text{m} \times 7.56\mu\text{m}$ 。将 DMD 产生的图像投射至 100 英寸的屏幕上 ($2.21\text{m} \times 1.24\text{m}$)，此时，DMD 微反射镜单元在屏幕成像上的尺寸为 $1149\mu\text{m} \times 1149\mu\text{m}$ 。散斑测量系统中的 CCD (Manta G201B) 像素尺寸为 $4.4\mu\text{m} \times 4.4\mu\text{m}$ ，镜头焦距为 50mm。

当采集的 DMD 微元尺寸小于一个像素尺寸 $4.4\mu\text{m}$ 时, CCD 将不能分辨微反射镜阵列边界, 记录的图像不包含周期噪声, 也就是说, 根据成像关系, 当拍摄距离 Z 大于 13m 时, 记录的散斑图像将没有周期噪声的干扰。根据 IEC 62906 5-2 单色散斑测量标准规定, 测试距离要为散斑图像宽度的 3 倍, 根据此标准, 该系统中的测试距离为 $\sim 6.63\text{m}$, 小于 13m , 也就是说, 记录的散斑图像会受到周期噪声的干扰, 必须消除周期噪声后, 才能准确的评价散斑。

上文所述的实例是散斑测量中的典型代表, 换句话说, 在实际测量散斑过程中, 消除周期噪声是散斑评价过程中必不可少的一步。

3. 周期噪声的消除

消除周期噪声的方法与 4.1.1 中描述的消除非均匀背景光的方法类似, 均利用了傅里叶变换和特征频率选择性滤除, 图 4.5 展示了消除周期噪声的实验过程和结果。图(a)为 CCD 相机拍摄的散斑图像原图, 红色矩形框内为局部放大图, 可以清晰看到周期噪声, 此时的散斑对比度为 13.91% 。图(a)经过傅里叶变换至频率域, 如图(b)所示, 可以看到周期噪声规则地排列成矩形阵列形式。图(c)中, 根据频率域周期噪声的位置实时生成了相同阵列形式的陷波滤波器, 以图中周期性排列的黑点表示。图(d), 最终经过逆傅里叶变换, 将频率域图像转换会空间域散斑图像, 如图中所示的局部放大插图, 可以看到周期噪声被消除, 此时的散斑对比度变为 8.46% 。

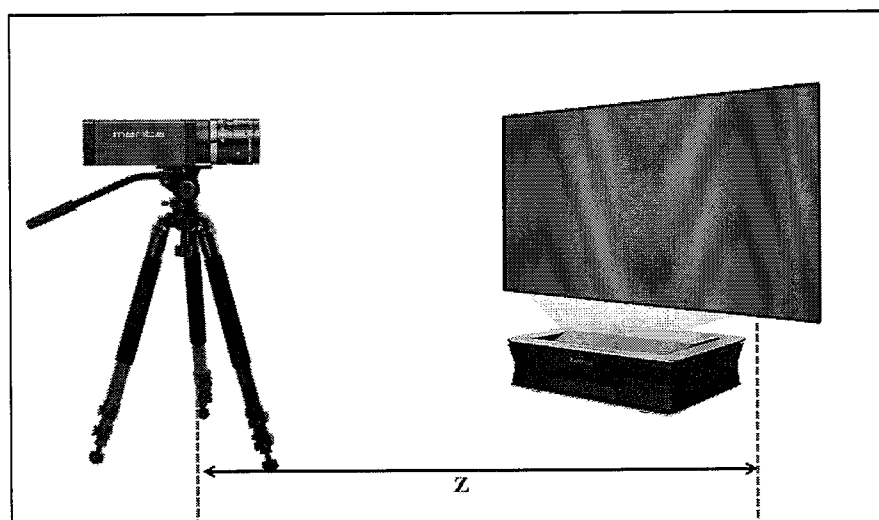


图 4.4 激光显示整机的散斑测量

Fig. 4.4 Speckle measurement of laser display device

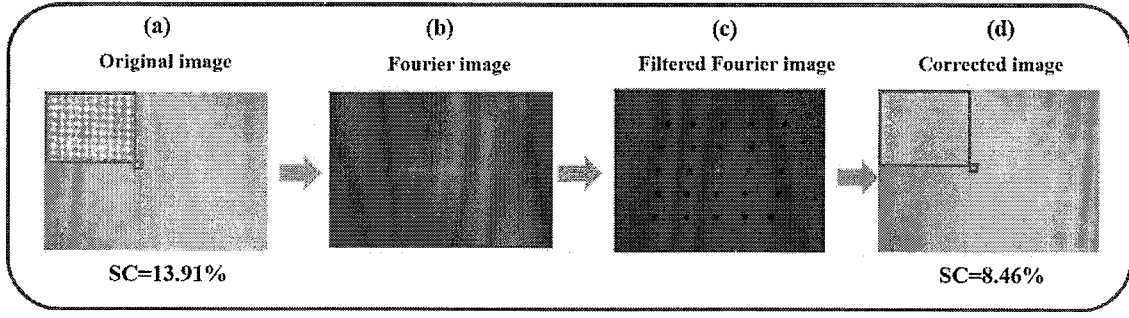


图 4.5 陷波滤波器消除散斑图像中的周期噪声, (a) 散斑图像原图, (b) 频域空间的图像, (c) 陷波滤波器滤波, (d) 校正后的图像

Fig. 4.5 Notch filter to eliminate periodic noise in speckle image, (a) original speckle image, (b) Fourier image, (c) filtered fourier image, (d) corrected image

4.2 结构偏离度(structure deviation degree, SDD)评价散斑

4.2.1 SDD 理论分析

在 Wang zhou 教授提出的结构相似度理论基础之上[18, 88-90], 本文建立了用于散斑图像评价的结构偏离度(structure deviation degree, SDD)方法, 该方法对三个分量, 也即亮度(luminance, L)、对比度(contrast, C)和结构(structure, S), 进行了综合评判。

相对于散斑对比度评价方法, 结构偏离度方法不仅考虑了散斑图像的强度起伏, 也考虑了图像间的结构关联, 其表达式如下,

$$SDD = 1 - \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \cdot \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \cdot \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (SDD = 1 - L \cdot C \cdot S) \quad \dots (4.1)$$

式中, C_1 、 C_2 、 C_3 是常数, 以保证每个分式避免为 0。其中, $C_1 = (K_1L)^2$, $C_2 = (K_2L)^2$, $C_3 = C_2/2$, K_1 和 K_2 分别取值 0.001 和 0.003, L 为图像像素的动态范围 (对于 8-bit 的像素, 动态范围为 255)。 μ_x 和 μ_y 分别是参考图像 x 和待测试图像 y 的平均光强, σ_x 和 σ_y 分别是参考图像 x 和待测试图像 y 的强度标准差, σ_{xy} 为参考图像 x 和待测试图像 y 的相关系数, 它们的表达式如下,

$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \dots (4.2)$$

$$\sigma_x = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2 \right)^{1/2} \quad \dots (4.3)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) \quad \dots (4.4)$$

将式(4.2)和式(4.3)中的下标 x 换为 y ，即为 μ_y 和 σ_y 的表达式。

一般选择无散斑噪声的图像作为参考图像，当测试图像与参考图像完全一致时，SDD 值为 0，当测试图像与参考图像完全偏离时，SDD 值为 1。也就是说，SDD 值越大，待测试图像的散斑越多；SDD 值越小，待测试图像的散斑越少。

图 4.6 展示了结构偏离度中的亮度比较（以下称“亮度相似度”）的理论分析曲线。图(a)描述了参考图像和待测试散斑图像的亮度相似度 L 随着平均亮度的变化曲线，图(b)为图(a)的俯视图。

从图中可以看出，亮度相似度 L 关于 $\mu_y = \mu_x$ 对称：固定参考图像的平均亮度 μ_x 值不变，当测试图像的平均亮度 μ_y 越来越接近参考图像的平均亮度 μ_x 时，亮度对比度值 L 变得越来越大，直到达到最大值 1，当 μ_y 的亮度超过 μ_x ，且变的更大时，亮度对比度值 L 反而会变的越来越小，直至趋于 0。

从图中还可以看出，若参考图像的平均亮度 μ_x 和测试图像的平均亮度 μ_y 的差值相同，但两者的绝对数值不同时，对应亮度对比度 L 的变化不同，例如，坐标由(10, 60)变至(60, 60)， L 值变化为 0.67，而坐标由(150, 200) 变至(200, 200)， L 值变化为 0.04，该规律与人眼亮度感知 Γ 曲线一致：在全黑环境下增加一定量的入射光时，假设人眼感觉的亮度增加量为 ϕ ，继续增加相同大小的入射光，则人眼感觉的亮度增加量小于 ϕ ，这就是人眼对亮度响应的 Γ 曲线，也即韦伯定律。

对比度相似度 C 与亮度相似度 L 的表达式一致，二者的变化规律一致，均符合韦伯定律。结构相似度 S ，描述了参考图像与测试图像的结构相似度。

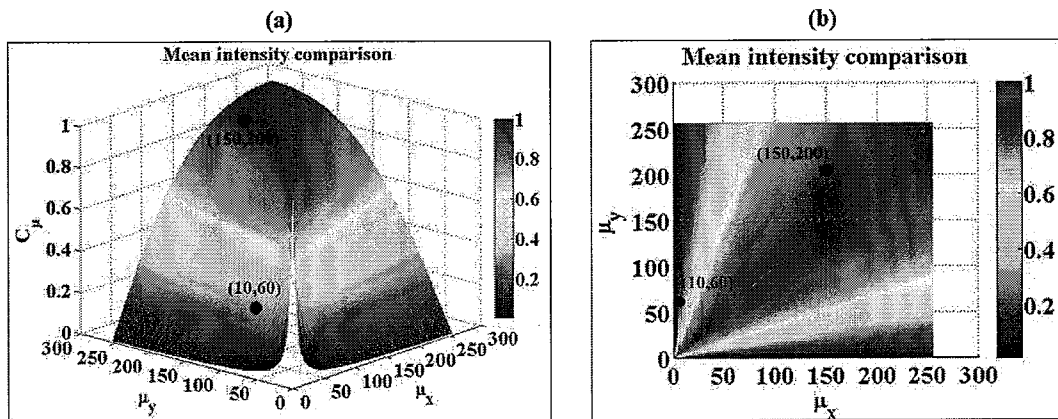


图 4.6 亮度对比度 L 与参考散斑图像、测试散斑图像平均强度 μ_x 和 μ_y 的关系

Fig. 4.6 The relation between brightness contrast L and mean intensity of reference speckle image and test speckle image μ_x, μ_y

4.2.2 实验装置

使用 SDD 方法对散斑图像进行了评价, 实验装置示意图如图 4.8 所示, 实验装置包括激光投影系统和散斑测量系统两部分。激光投影系统采用全固态绿光激光器作为照明光源, 激光中心波长为 532nm, 最高输出功率为 5W, 经过光纤耦合输出后, 激光经过聚焦透镜进入光棒, 然后由投影镜头投影至屏幕。散斑测量系统选用 Manta G-201B 型号 CCD 相机, 搭配成像镜头 Computar M5028-MPW2, 测量系统的像素分辨率为 1624×1234 , 像素尺寸为 $4.40\mu\text{m} \times 4.40\mu\text{m}$, 镜头焦距为 50mm, 在测试散斑过程中, 实验环境亮度为影院环境标准亮度 $48\text{cd}/\text{m}^2$ 。

为了高效处理实验数据, 编写了散斑图像计算软件, 软件界面如图 4.7 所示, 各个按钮的功能如下所示。

按钮“Load Image 1”为导入参考图像;

按钮“Load Image 2”为导入测试图像;

点击“Calculate SDD and SC”, 计算得出结构偏离度 SDD 以及 SDD 的三个分量值: 结构相似度 S , 亮度相似度 L 和对比度相似度 C 。同时计算出测试图像的散斑对比度 SC 以及强度标准差 Sigma 和强度平均值 I , 计算结果显示在对应文本框中。

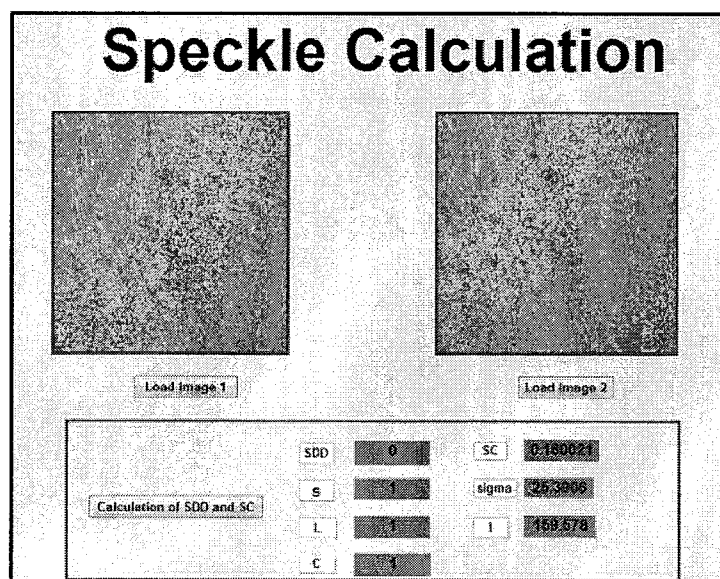


图 4.7 程序用户界面计算 SDD(structure deviation degree)和 SC(speckle contrast)

Fig. 4.7 Guide User Interface (GUI) used to calculate SDD (structure deviation degree) and SC (speckle contrast)

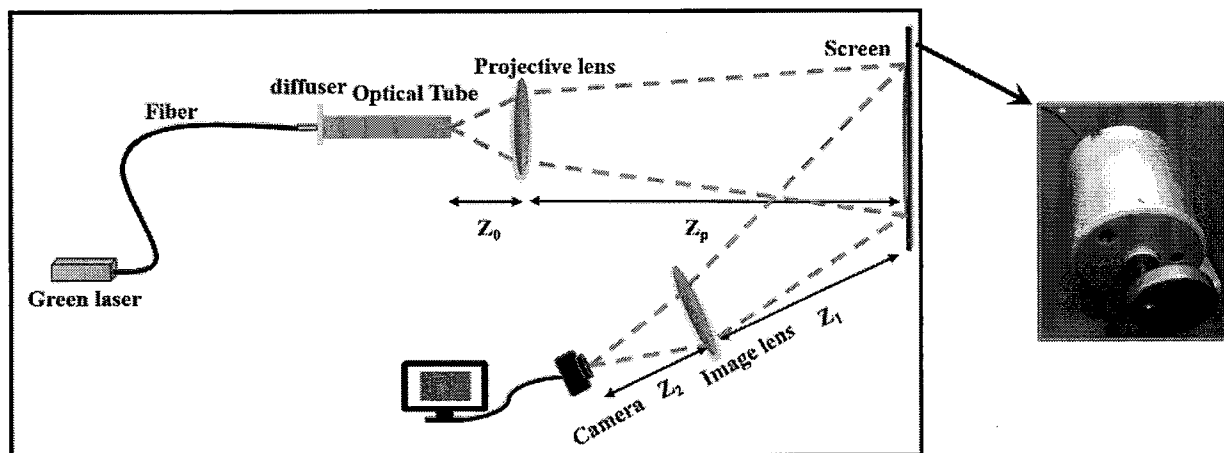


图 4.8 实验装置图

Fig. 4.8 Diagram of experimental device

4.2.3 实验结果与讨论

实验中, 采用四组散斑图像探究 SDD 的表征结果, 同时计算 SC 进行对比。第一组为不同入射光平均强度时的散斑图像; 第二组为不同 F 数的散斑图像; 第三组为不同曝光时间的散斑图像; 第四组为不同聚焦程度的散斑图像; 第五组为不同散斑对比度的散斑图像; 第六组为不同散斑尺寸的散斑图像。

1. SDD 评价不同入射光平均强度时的散斑图像

图 4.9(a)-(f)为不同入射光平均强度时的散斑图像, 图(g)描述了 SDD 和 SC 随入射光强度变化的曲线。改变入射光平均强度, 对应散斑图像的平均灰度值分别为(a) 64, (b) 87, (c) 114, (d) 132, (e) 151, (f) 186graylevels。

从数学角度而言, 当入射光功率增加时, 强度标准差与图像灰度保持等比例增加, 也即散斑对比度不变。但由实验结果可知, 散斑对比度随着入射光平均强度的增加而减小, 如图 4.9(g)所示, 对此结果的分析也可见 2.5.2, 这里更为详细的解释导致此现象的原因。这是由 CCD 传感器有限的动态范围 (实验所用的是 8-bit 相机) 导致的, 主要表现在以下两点:

一, 当入射光功率较低时, 强度标准差主要来源于数字量化误差, 随着入射光强的增加, 数字量化误差保持不变, 而图像的平均强度增加, 导致散斑对比度降低;

二，当入射光功率较高时，强度标准差主要来源于图像的强度涨落，随着入射光功率的增加，CCD 像素光电转换产生的电子数目增加，当像素达到饱和值 255 后将不再变化，该像素内多余的电子数溢出至相邻像素单元，由此导致散斑对比度降低。

选择平均灰度值为 63graylevels 的无散斑噪声图像作为参考图像（图中未画出），在测试图像的灰度值由 64graylevels 增加至 186graylevels 的过程中，图像的平均灰度与参考图像差值越来越大，导致亮度相似度降低，同时，随着入射光平均强度的增加，强度标准差减小，导致对比度相似度和结构相似度增加。以上三个因素的变化最终导致测试图像与参考图像偏离度增加，也即散斑噪声升高。

表 4.1 列出了不同入射光平均强度时的散斑图像对应的结构偏离度和散斑对比度大小，当散斑图像平均灰度值从 64graylevels 增加至 186graylevels 时，散斑对比度数值由 0.085 降至 0.077，结构偏离度数值由 0.32 升至 0.84。

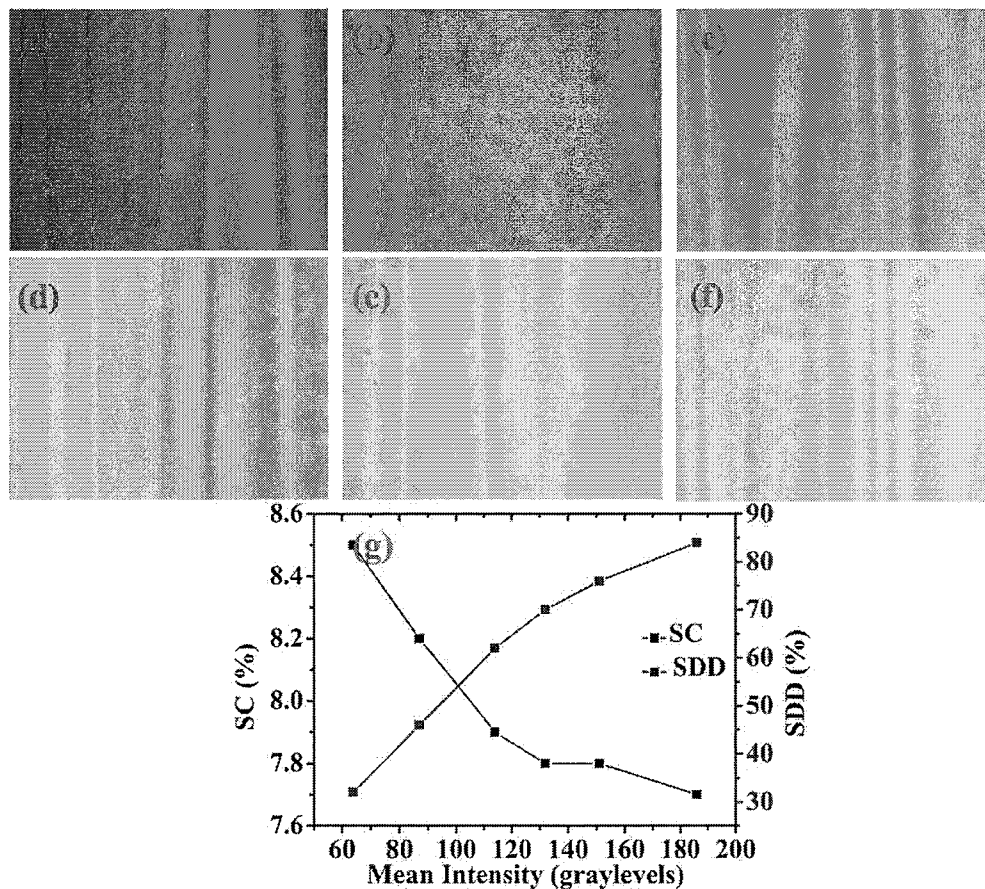


图 4.9 不同平均强度的散斑图像, (a) 64, (b) 87, (c) 114, (d) 132, (e) 151, (f) 186graylevels, (g) SDD 和 SC 随平均光强变化的曲线

Fig. 4.9 Speckle images with different mean intensity, (a) 64, (b) 87, (c) 114, (d) 132, (e) 151, (f) 186graylevels, (g) SDD and SC as a function of mean intensity

表 4.1 不同平均强度的散斑图像的结构偏离度值(SDD)和散斑对比度值(SC)

Table 4.1 Structural Deviation Degree (SDD) and Speckle Contrast (SC) of speckle images in terms of mean intensities

Mean Intesity (graylevel)	SC	SDD
64	0.085	0.32
87	0.082	0.46
114	0.079	0.62
132	0.078	0.70
151	0.078	0.76
186	0.077	0.84

2. SDD 评价不同 F 数的散斑图像

图 4.10(a)-(d)是成像镜头 F 数分别为 1.8、2.8、4 和 5.6 时捕获的散斑图像，图(e)描述了结构偏离度和散斑对比度随 F 数的变化曲线。同样的，以平均灰度值为 63graylevels 时的无散斑图像作为参考，计算散斑图像的结构偏离度和散斑对比度，结果如表 4.2 所示。

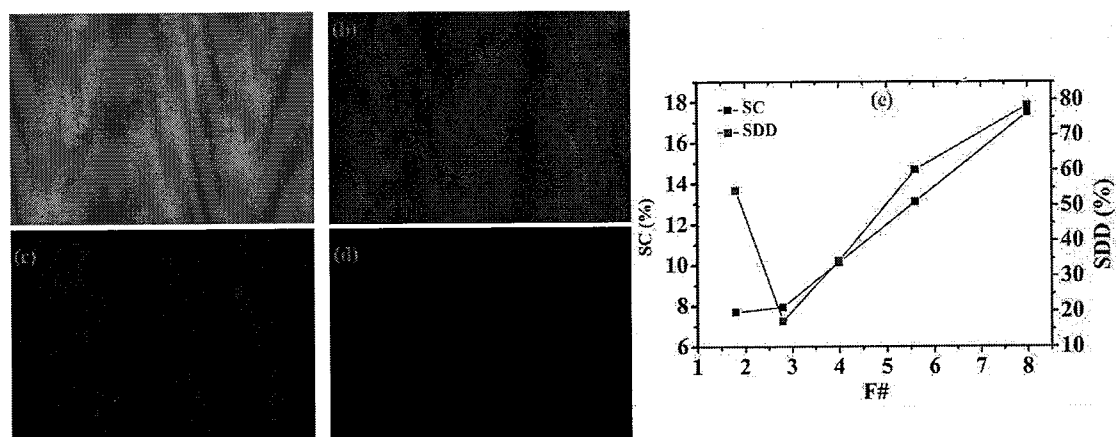


图 4.10 不同 F 数的镜头捕获的散斑图像 (a) $F_{\#}=1.8$, (b) $F_{\#}=2.8$, (c) $F_{\#}=4$, (d) $F_{\#}=5.6$, (e) SDD 和 SC 随成像镜头 F 数的曲线

Fig. 4.10 speckle images with different F number of (a) $F_{\#}=1.8$, (b) $F_{\#}=2.8$, (c) $F_{\#}=4$, (d) $F_{\#}=5.6$, (e) SDD and SC as a function of F number

镜头 F 数从 1.8 增加至 5.6, 对应图像的平均灰度值分别为 126、55、7 和 2.3 graylevels, 相应的散斑对比度逐渐增大, 而结构偏离度先减小后增大。图(b)与参考图像的亮度相似度更高, 使结构偏离度减小, 继续增加 F 数时, 图像平均灰度值降低, 亮度相似度随之降低, 使结构偏离度呈现出增加的趋势。

散斑对比度的变化趋势与结构偏离度不一致, 这是因为, 当散斑图像的平均灰度值较低时, 图像强度的涨落主要来源于 CCD 暗电流噪声和数字量化误差, 这会使对比度偏大, 甚至会出现结果大于 1 的情况。

表 4.2 不同镜头 F 数捕获的散斑图像的结构偏离度值(SDD)和散斑对比度值(SC)

Table 4.2 Structural Deviation Degree (SDD) and Speckle Contrast (SC) of speckle images in terms of F number of imaging lens

F#	SC	SDD
1.8	0.0769	0.5420
2.8	0.0793	0.1721
4	0.1013	0.3430
5.6	0.1311	0.6006
8	0.1748	0.7833

3. SDD 评价不同曝光时间的散斑图像

图 4.11(a)-(h)分别为曝光时间 25、30、35、40、45、50、55 和 60ms 时捕获的散斑图像, 图(e)和表 4.3 描述了结构偏离度和散斑对比度随曝光时间的变化关系。

以平均灰度值为 63 graylevels 的无散斑图像作为参考, 计算散斑图像的结构偏离度和散斑对比度, 可以看出, 随着 CCD 曝光时间的增加, 散斑对比度降低, 而结构偏离度逐渐升高, 这是因为 CCD 曝光时间的增加与入射光平均光强增加的效果一致, 均导致散斑图像的平均灰度值增加, 所以产生了相似的实验结果。

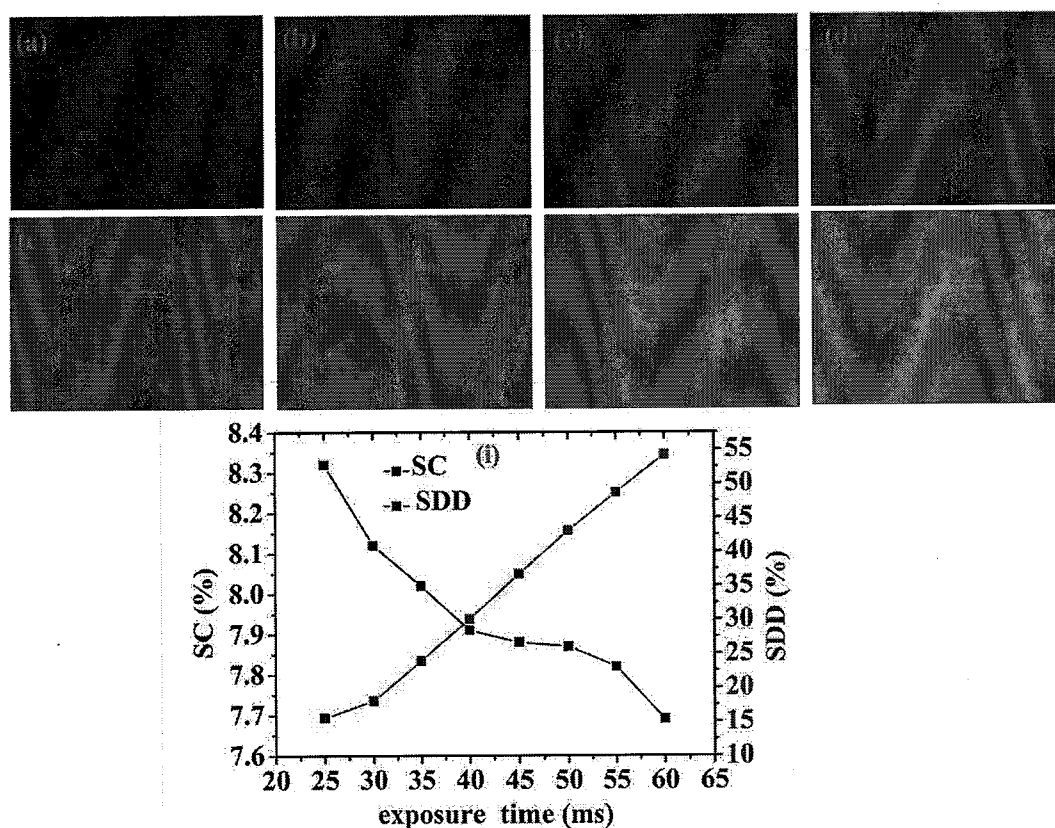


图 4.11 不同曝光时间捕获的散斑图像 (a) exposure time = 25ms, (b) exposure time = 30ms, (c) exposure time = 35ms, (d) exposure time = 40ms, (e) exposure time = 45ms, (f) exposure time = 50ms, (g) exposure time = 55ms, (h) exposure time = 60ms, (i) SDD 和 SC 随曝光时间的变化曲线

Fig. 4.11 speckle images with different exposure time of a) exposure time = 25ms, (b) exposure time = 30ms, (c) exposure time = 35ms, (d) exposure time = 40ms, (e) exposure time = 45ms, (f) exposure time = 50ms, (g) exposure time = 55ms, (h) exposure time = 60ms, (i) SDD and SC as a function of exposure time

表 4.3 不同曝光时间捕获的散斑图像的结构偏离度值(SDD)和散斑对比度值(SC)

Table 4.3 Structural Deviation Degree (SDD) and Speckle Contrast (SC) of speckle images in terms of exposure time

exposure time	SC	SDD
25	0.0832	0.1556
30	0.0812	0.1807
35	0.0802	0.2396
40	0.0791	0.3004
45	0.0788	0.3670

50	0.0787	0.4309
55	0.0782	0.4867
60	0.0769	0.5420

4. SDD 评价不同聚焦程度的散斑图像

在距离屏幕 300cm 处，将测量设备对屏幕聚焦，改变拍摄距离，测试镜头聚焦/离焦程度对散斑评价的影响。图 4.12(a)-(f)分别为拍摄距离 L 等于 100、150、200、250、300 和 350cm 时捕获的散斑图像，图(e)和表 4.4 描述了结构偏离度和散斑对比度与拍摄距离的关系。

以平均灰度值为 63graylevels 的无散斑图像作为参考，计算散斑图像的结构偏离度和散斑对比度，随着拍摄距离的增加，成像镜头与屏幕经过了由离焦到聚焦再继续离焦的变化，导致散斑对比度和结构偏离度出现了先增大后减小的变化趋势。这是因为，镜头对屏幕的离焦状态越严重，捕获的图像对比度越差，反之，则捕获图像的对比度越好。当镜头对屏幕严格对焦时，虽然准确记录了散斑图像，但也同时也记录了屏幕微结构，反过来对散斑评价造成干扰。因此，在实际拍摄散斑图像时，要根据实际情况，在准确记录散斑图像（聚焦）和减小屏幕微结构（离焦）二者间取舍，选取合适的拍摄距离。

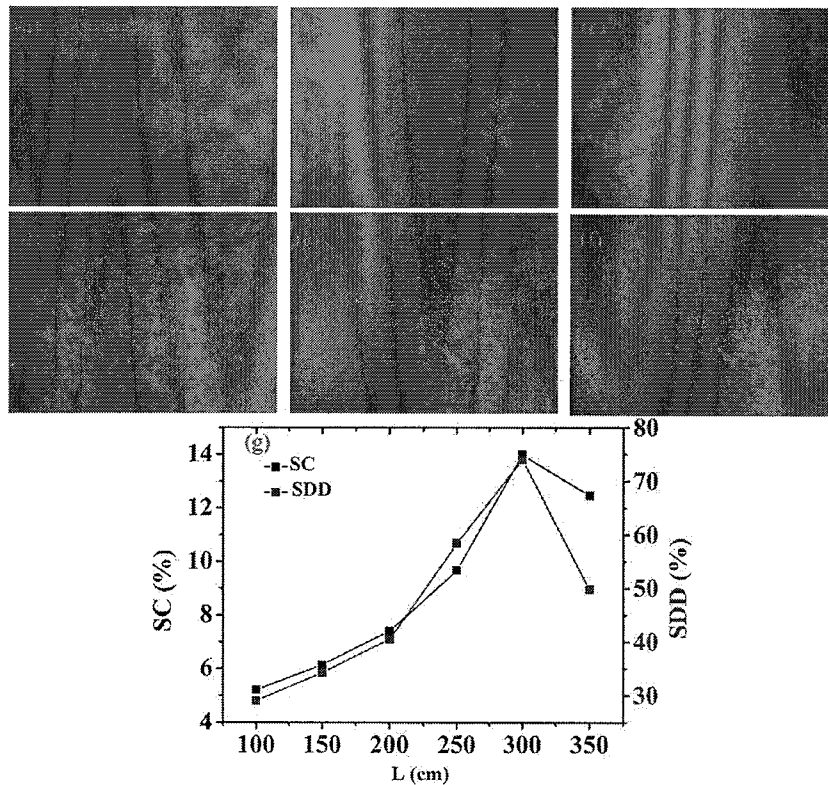


图 4.12 不同观察距离捕获的散斑图像 (a) $L=100\text{cm}$, (b) $L=150\text{cm}$, (c) $L=200\text{cm}$, (d) $L=250\text{cm}$, (e) $L=300\text{cm}$, (f) $L=350\text{cm}$, (g) SDD 和 SC 随拍摄距离的变化曲线

Fig. 4.12 speckle images with different exposure time of (a) $L=100\text{cm}$, (b) $L=150\text{cm}$, (c) $L=200\text{cm}$, (d) $L=250\text{cm}$, (e) $L=300\text{cm}$, (f) $L=350\text{cm}$, (e) SDD and SC as a function of observing distance

表 4.4 不同观察距离捕获的散斑图像的结构偏离度值(SDD)和散斑对比度值(SC)

Table 4.4 Structural Deviation Degree (SDD) and Speckle Contrast (SC) of speckle images in terms of observing distance

observing distance (cm)	SC	SDD
100	0.0521	0.2904
150	0.0614	0.3421
200	0.0741	0.4054
250	0.0967	0.5841
300	0.1398	0.7403
350	0.1246	0.4980

5. SDD 评价不同散斑对比度的散斑图像

将偏心转子分别固定于屏幕的水平框架和竖直框架,通过改变电压调节偏心转子的振动频率,获得不同对比度的散斑图像。根据本节第一部分的研究结果:散斑图像的对比度对入射光平均强度极为敏感,所以在探究其他参数对散斑的影响时,需要保持入射光平均强度恒定不变。本实验中,入射光强度维持不变,图像灰度维持在 $(185\pm 2.8)\text{graylevels}$,波动幅度小于 1.5%。

图 4.13 和表 4.5 描述了结构偏离度和散斑对比度随着屏幕振动频率的变化情况。随着屏幕振动频率从 15.18Hz 增加至 56.98Hz,散斑对比度由 6.7% 降至 3.8%。与之对比,以平均灰度值为 193.3graylevels 的无散斑图像作为参考,结构偏离度由 69%降至 42%,与散斑对比度的变化趋势一致,也就是说,就对比度对散斑的影响而言,结构偏离度具有与散斑对比度相同的表征能力。

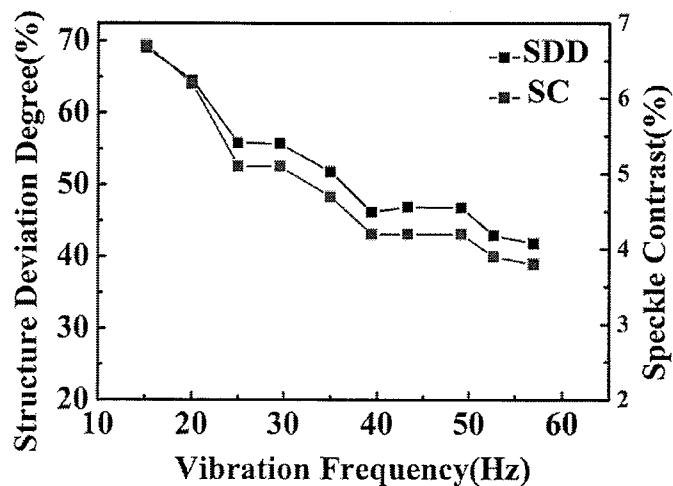


图 4.13 SDD 和 SC 随屏幕振动频率变化的曲线

Fig. 4.13 SDD and SC as a function of vibrating frequency of screen

表 4.5 不同振幕频率时的散斑对比度(SC)和结构偏离度(SDD)

Table 4.5 Speckle Contrast (SC) and Structure Deviation Degree (SDD) in terms of vibrating frequency of Screen

Vibrating Frequency (Hz)	SC	SDD
15.18	0.067	0.69
20	0.062	0.645
25	0.051	0.558
29.57	0.055	0.592
35	0.047	0.518
39.4	0.042	0.462
43.31	0.042	0.469
49.16	0.042	0.469
52.71	0.039	0.429
56.98	0.038	0.418

6. SDD 评价不同散斑尺寸的散斑图像

图 4.14(a)为用于计算 SDD 的参考图像, 字母“CAS”为中国科学院(Chinese Academy of Science)的英文缩写, 图 4.14(b)-(h)是采用模拟算法生成的散斑图像, 散斑尺寸分别为 1.77、3.93、5.73、8.09、9.70、14.09、19.93pixels, 平均强度为 (80 ± 4.8) graylevels, 图(i)为散斑图像(b)、(d)和(e)的归一化自协方差函数, 其半

高全宽为散斑尺寸。图 4.14(j)和表 4.6 描述了散斑对比度和结构偏离度与散斑尺寸的关系。

从图中可以看出,随着散斑尺寸的增加,散斑对比度值在 84.76%–88.10%之间基本保持稳定不变,结构偏离度由 94.52%降至 85.38%。然而,从人眼的主观视觉角度而言,随着散斑尺寸的增加,图像的真实信息逐渐被完全隐藏,因此,就散斑尺寸对散斑的影响而言,散斑对比度和结构偏离度均不能表征散斑尺寸对人眼感知散斑图像的影响。

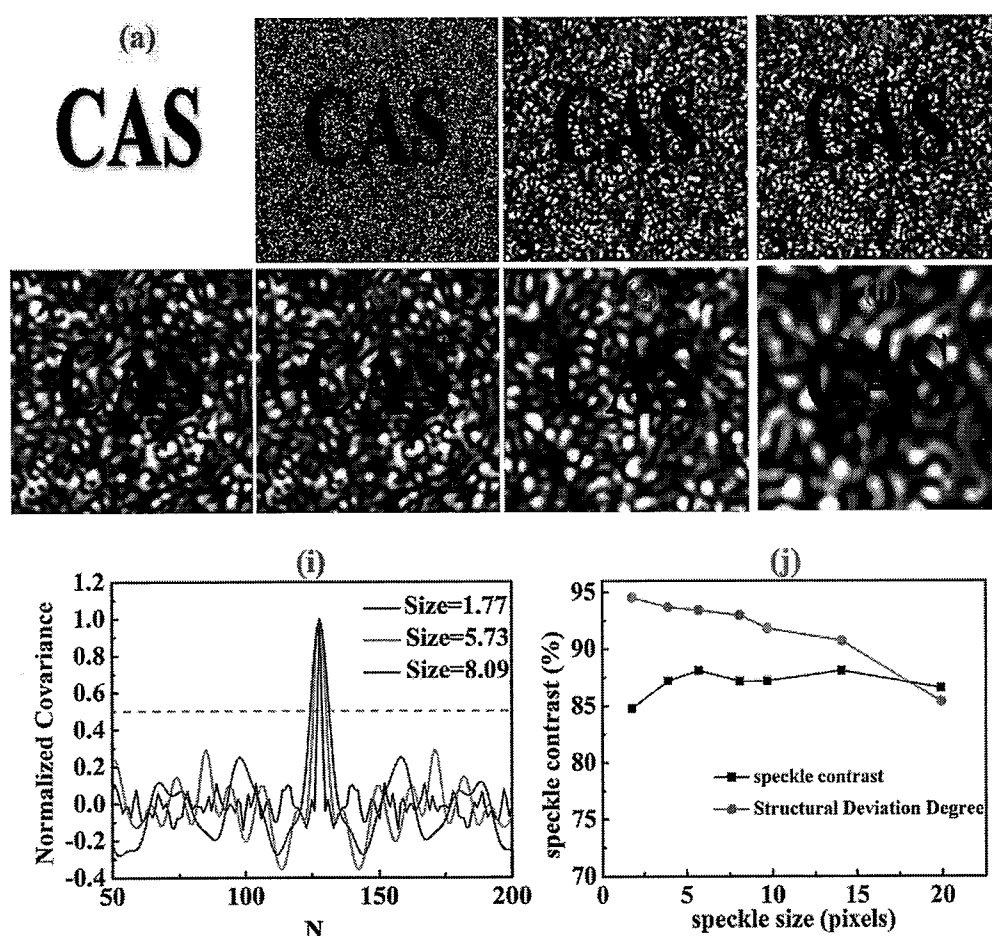


图 4.14 (a) 参考图像, 不同散斑尺寸的散斑图像(b) 1.77pixels, (c) 3.93pixels, (d) 5.73pixels, (e) 8.09pixels, (f) 9.70pixels, (g) 14.09pixels, (h) 19.93pixels, (i) 散斑图像(b)、(d)和(e)的归一化自协方差函数。(j) SDD 和 SC 随散斑尺寸变化的曲线

Fig. 4.14 (a) Reference image, speckle images with different speckle size of (b)1.77pixels, (c)3.93pixels, (d)5.73pixels, (e)8.09pixels, (f) 9.70pixels, (g) 14.09pixels, (h) 19.93pixels, (i) normalized autocovariaion function of speckle image (b), (d) and (e), (j) SDD and SC as a function of speckle size

表 4.6 不同散斑尺寸散斑图像的散斑对比度(SC)和结构偏离度(SDD)

Table 4.6 Speckle Contrast (SC) and Structure Deviation Degree (SDD) in terms of speckle size

Speckle Size (pixels)	SC	SDD
1.77	0.8476	0.9452
3.93	0.8719	0.9369
5.73	0.8810	0.9341
8.09	0.8717	0.9297
9.70	0.8718	0.9181
14.09	0.8810	0.9071
19.93	0.8658	0.8538

7.小结

测试了入射光平均强度、成像镜头 F 数、CCD 曝光时间、成像镜头聚焦状态、散斑对比度和散斑尺寸对散斑的影响，对比了结构偏离度和散斑对比度两种方法对散斑图像的评价结果。结果显示，在入射光平均强度、成像镜头 F 数、CCD 曝光时间、成像镜头聚焦状态、散斑对比度对散斑的影响方面，结构偏离度和散斑对比度均能有效的表征散斑，但对散斑尺寸的影响而言，结构偏离度表征方法与散斑对比度表征方法均不能表现散斑尺寸对人眼感知散斑图像的影响。

4.3 散斑影响度(speckle influence degree, SID)评价散斑

实验中发现，除了散斑尺寸和散斑对比度以外，图像清晰度也会对人眼感知散斑图像产生影响。本节内容研究了散斑影响度表征方法，散斑影响度方法综合考虑了散斑尺寸、散斑对比度和图像清晰度的影响，使用其评价散斑图像，并与散斑对比度和结构偏离度的表征结果进行对比。

本节中均采用单色散斑图像作为研究对象，每个散斑图像的像素数为 255×255 ($N \times N$) pixels，像素灰度阶数为 8-bit，也即最高灰度值为 255graylevels。还需要说明的是，选取原图计算图像清晰度，如图 4.15(a)所示，本节中提到的“散斑图像”是指原图图像受到散斑噪声干扰后的图像，并选取仅有散斑噪声的区域（不包含图像内容“CAS”）计算散斑尺寸和散斑对比度，如图 4.15(b)所示。

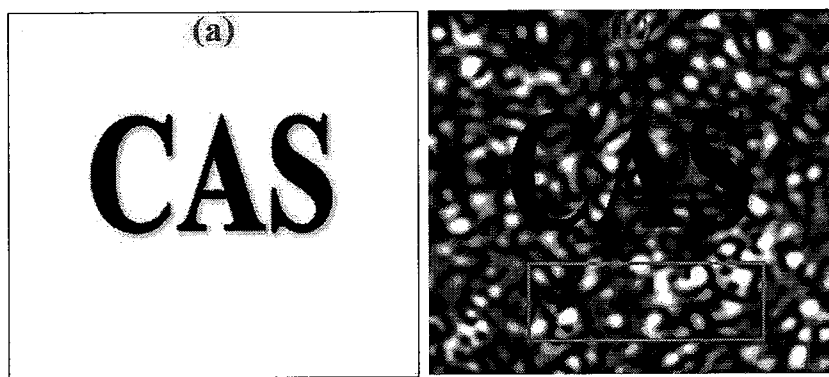


图 4.15 (a)原图图像, (b)散斑图像

Fig. 4.15 (a) Origin image, (b) speckle image

4.3.1 SID 理论分析

为了进一步完善对散斑的评价, 提出了散斑影响度方法(speckle influence degree, SID), 该方法同时考虑了散斑对比度、散斑尺寸和图像清晰度三个因素的影响, 表达式为,

$$SID = (1 - \frac{1}{w}) \cdot SC \cdot (2 - \gamma) \quad \dots (4.5)$$

式中, w 代表一维散斑尺寸, 单位为 pixels, 定义为散斑的归一化自协方差函数的半高全宽。因为散斑尺寸小于 1pixels 时, CCD 相机无法分辨, 所以在这里限定散斑尺寸 $w \geq 1\text{pixels}$ 。 γ 代表图像清晰度, 为无量纲单位 $a.u.$, γ 的定义为,

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad \dots (4.6)$$

式中, $I_{\max}$ 是原图图像的最高灰度值, 指图 4.15(a)的背景灰度值, $I_{\min}$ 是原图图像的最低灰度值, 指图 4.15(a)中字母“CAS”所占像素的灰度值, γ 的取值范围为 $[0, 1]$ 。与散斑对比度表征方法和结构偏离度表征方法类似, 散斑噪声越严重, 散斑影响度越大。

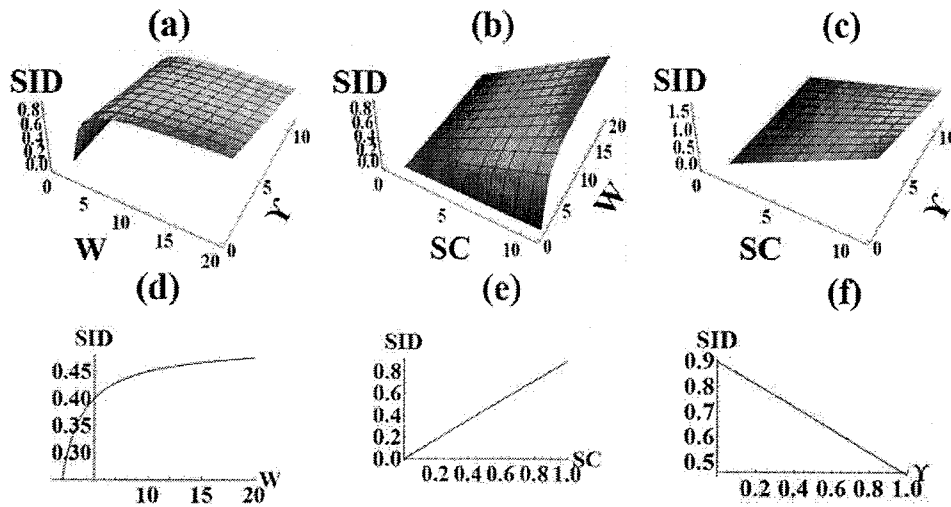


图 4.16 散斑影响度公式的理论分析。(a) 固定散斑对比度, SID 与散斑尺寸和图像对比度的关系; (b) 固定图像对比度, SID 与散斑尺寸和散斑对比度的关系; (c) 固定散斑尺寸, SID 与散斑对比度和图像对比度的关系; (d) $SC = 0.5$ a.u., $\gamma = 1$ a.u. 时, SID 与散斑尺寸的关系; (e) $\gamma = 0.5$ a.u., $w = 10$ pixels 时, SID 与散斑对比度的关系; (f) $SC = 0.5$ a.u., $w = 10$ pixels 时, SID 与图像对比度的关系

Fig. 4.16 Theoretical analysis of Eq. (2). speckle influence degree as a function of (a) speckle size and image contrast with a speckle contrast (SC)=0.5a.u. (b) SC and speckle size with $\gamma=1$ a.u., (c) SC and γ with speckle size=10pixels. (d) Speckle size with SC=0.5a.u. and $\gamma=1$ a.u., (e) SC with $\gamma=1$ a.u. and width=10pixels, and (f) image contrast with SC=0.5 a.u. and width=10pixels

理论分析散斑影响度与散斑对比度、散斑尺寸和图像清晰度的关系, 分析结果如图 4.16 所示。图(a)-(c)描述了散斑影响度与其中两个变量的三维关系图, 比如图(a)为散斑对比度不变时, 散斑影响度与散斑尺寸和图像对比度的关系。图(d)-(e)为图(a)-(c)的切线图, 从图中可以得出以下三条结论:

首先, 随着散斑尺寸从 1pixels 增加至 20pixels, 散斑影响度逐渐增加, 增加速度逐渐降低, 最终趋于饱和值。这与散斑尺寸对散斑对比度的影响一致, 当散斑尺寸小于 2pixels 时, 空间采样率不符合奈奎斯特采样定律, 导致 CCD 记录的散斑噪声偏小, 随着采样率的增加, 也即散斑尺寸的增加, CCD 能够准确地记录散斑, 测得的散斑影响度也随之保持恒定。

然后, 随着散斑对比度的增加, 测得的散斑影响度呈线性增长趋势, 这说明, 采用散斑影响度表征散斑能够完整地包含散斑对比度所能表征的内容。

最后,随着图像清晰度的增加,散斑影响度呈线性减少的趋势,这与实际情况相符合,也即图像清晰度的增加时,人眼对图像内容的识别能力也随之增加。

综上所述,采用散斑影响度方法评价散斑,不仅具有散斑对比度的表征能力,而且能够表征散斑尺寸和图像清晰度对人眼感知散斑图像的影响。

4.3.2 结果与讨论

使用散斑影响度方法评价散斑图像,并从散斑尺寸、散斑对比度以及图像清晰度三个方面,将散斑影响度方法与散斑对比度方法和结构偏离度方法对比。

1. 散斑尺寸的影响

散斑尺寸定义为散斑的归一化自协方差函数的半高全宽,不仅体现了采集图像过程中的空间采样率,也体现了相邻像素之间的相关度。

如图 4.17 所示,图(a)为无散斑干扰的图像,图(b)-(h)是散斑尺寸分别为 1.77、3.93、5.73、8.09、9.70、14.09 和 19.93pixels 的散斑图像,图像的平均灰度值保持在 (80 ± 4.8) graylevels,图像清晰度 γ 设置为 1。图(i)画出了其中三个散斑图像的自协方差函数,分别对应图(a)、图(d)和图(e)。

当散斑尺寸较小时,如 1.77pixels,图像内容尚可被清晰地识别,随着散斑尺寸的增加,图像内容逐渐被散斑噪声隐藏而变得模糊,当散斑尺寸增加至 19.93pixels 时,图像内容难以识别。产生此结果的原因:散斑的出现导致原图图像的边缘灰度重新分布,当散斑尺寸较小时,引起局部高频分量的变化,当散斑尺寸较大时,引起局部低频分量的变化,因为人眼对低频分量的敏感程度高于高频分量,所以在散斑尺寸较大时的影响更大,图像更模糊难辨。

针对不同散斑尺寸的散斑图像,分别使用散斑对比度、结构偏离度和散斑影响度三个方法评价散斑,结果如图(j)和表 4.4 所示。可以得出以下几点结论:

一,随着散斑尺寸的增加,散斑对比度基本保持不变,在 0.87–0.88 之间浮动,与人眼主观感受不一致。由于当散斑尺寸小于 2pixels 时,违背了奈奎斯特采样定律,所以我们忽略散斑尺寸为 1.77pixels 时计算的散斑对比度(0.8476)。

二,结构偏离度由 0.9452 降至 0.8538,也即待测试图像(b)-(h)相对于参考图像(a)偏离的程度越来越小,该计算结果也与人眼主观感受不符。

三,随着散斑尺寸的增加,散斑影响度由 0.4165 增加至 0.9403,表征的结果与人眼的主观感受一致。

通过上述所述的结论可知,在表征散斑尺寸对人眼对散斑图像感知的影响方面,散斑影响度方法明显优于散斑对比度和结构偏离度两个方法,表征结果符合人眼主观感受。

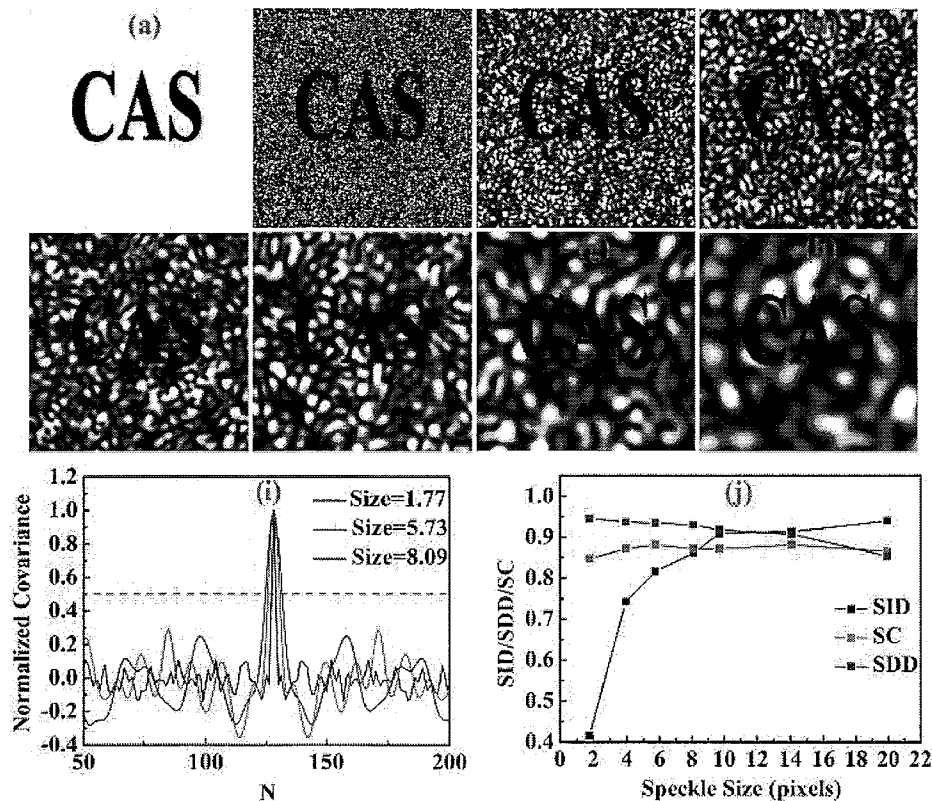


图 4.17 (a) 无散斑干扰的图像, 不同散斑尺寸的散斑(b) 1.77, (c) 3.93, (d) 65.73, (e) 8.09, (f) 9.70, (g) 14.09, and (h) 19.93pixels, (i) 图(b)、(d)和(e)的归一化自协方差函数曲线, (j) SC、SDD 和 SID 随散斑尺寸变化的曲线

Fig.4.17 (a) Free-speckle image. Speckle images at different speckle sizes equal to (b) 1.77, (c) 3.93, (d) 65.73, (e) 8.09, (f) 9.70, (g) 14.09, and (h) 19.93pixels. (i) Normalized autocovariance functions for different speckle patterns, and (j) variations of the speckle influence degree (SID) and SC as a function of speckle size

表 4.7 不同散斑尺寸下的散斑对比度(SC)、结构偏离度(SDD)和散斑影响度(SID)的对比

Table 4.7 Comparison between Speckle Contrast (SC)、Structure Deviation Degree (SDD) and Speckle Influence Degree (SID) in Terms of Speckle Size

Speckle Size (pixels)	SC (a.u.)	SDD (a.u.)	SID (a.u.)
1.77	0.8476	0.9452	0.4165

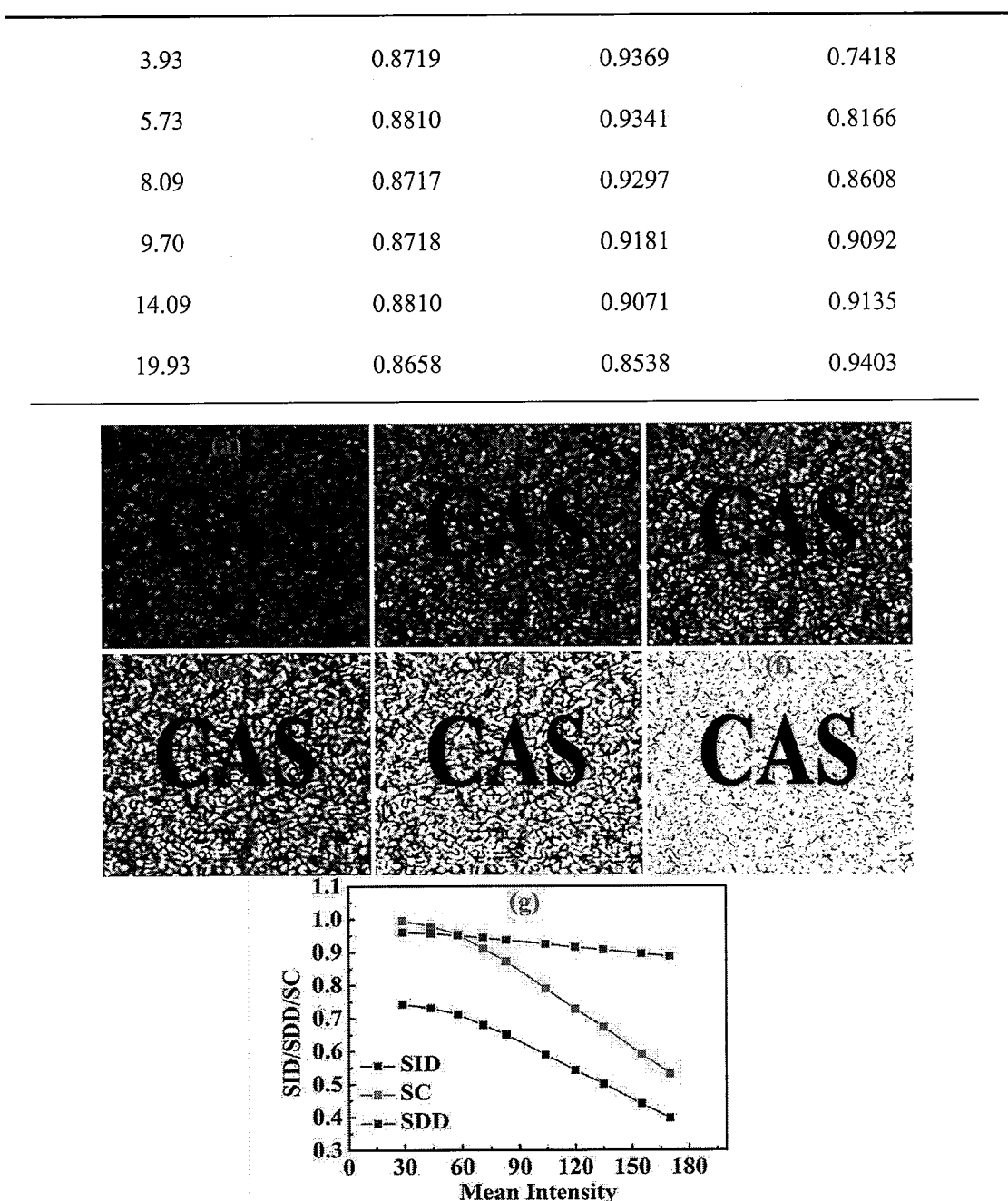


图 4.18 不同平均强度的散斑图像, (a) 29, (b) 58, (c) 83, (d) 120, (e) 170, and (f) 237 graylevels。

(g) SC、SDD 和 SID 随着平均强度变化趋势的对比

Fig. 4.18 Speckle patterns of different mean intensities equal to (a) 29, (b) 58, (c) 83, (d) 120, (e) 170, and (f) 237 graylevels. (g) Comparison between SC, SDD and SID in terms of mean intensity

2. 散斑对比度的影响

通过改变图像的平均灰度值来改变散斑对比度。图 4.18(a)-(f)描述了平均灰度值分别为 29、58、83、120、170 和 237(graylevels)的散斑图像, 它们的散斑尺寸均为 3.93pixels, 图像清晰度 γ 设置为 1。图(g)和表 4.8 描述了使用散斑对比度、

结构偏离度和散斑影响度三个方法评价不同图像平均灰度值的散斑图像结果，得出的结果如下：

随着图像平均灰度值的增加，三者都呈现下降的趋势。这是因为图像灰阶的限制，随着图像灰度值的增加，图像的灰度涨落幅度降低，导致散斑对比度降低，也导致结构偏离度和散斑影响度的降低。也就是说，在表征散斑对比度对人眼感知散斑图像的影响方面，三个表征方法对散斑图像的评价结果一致，均与人眼主观感受相符合。

表 4.8 不同平均强度下的 SC, SDD and SID 值的对比

Table 4.8 Comparison between SC, SDD and SID in Terms of Mean Intensity

Mean Intensity (graylevels)	SC (a.u.)	SDD (a.u.)	SID (a.u.)
29	0.9951	0.9609	0.7409
44	0.9795	0.9568	0.7303
58	0.9545	0.9507	0.7116
71	0.9107	0.9435	0.6790
83	0.8719	0.9369	0.6500
104	0.7900	0.9250	0.5890
120	0.7274	0.9152	0.5423
135	0.6731	0.9073	0.5005
155	0.5911	0.8953	0.4407
170	0.5321	0.8864	0.3967

3. 图像清晰度的影响

图 4.19 为不同图像清晰度的散斑图像，图像清晰度分别为(a) 1.00, (b) 0.60, (c) 0.3 和(d) 0.14，散斑尺寸均为 3.93pixels，图像平均灰度值均为 170graylevels。表 4.9 列出了散斑对比度、结构偏离度和散斑影响度对散斑图像的评价结果，由表可以得出以下结论：

一、随着图像清晰度的降低，散斑对比度保持恒定不变，为 0.5321，表征结果与人眼对散斑图像的主观感受不一致。

二、随着图像清晰度的降低，结构偏离度由 0.8864 增加至 0.9642，即，相对于参考图像，测试图像偏离程度越来越大，表征结果与人眼感受一致，但是结

构偏离度的变化程度很小,也就是说,在图像清晰度的表征上,结构偏离表征方法的灵敏度较低。

三、随着图像清晰度的降低,散斑影响度由 0.3967 增加至 0.7367,既符合人眼的主观感受,也有足够的表征灵敏度。

基于上述结论,相对于散斑对比度和结构偏离度两种表征方法,在表征图像清晰度对人眼感知散斑图像的影响方面,结构偏离度的表征结果与人眼的主观感受一致,且能够更有效地表征散斑图像的变化。

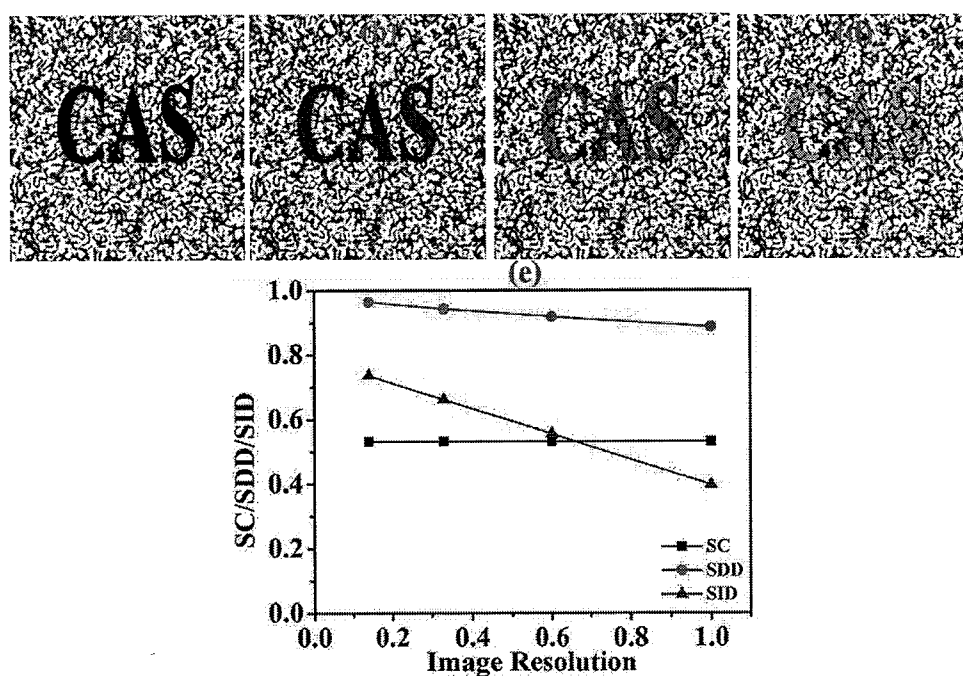


图 4.19 不同图像清晰度 γ 的散斑图像, (a) 1.00, (b) 0.60, (c) 0.33 和 (d) 0.14, 它们的散斑尺寸为 3.93pixels, 平均强度为 170graylevels, (e) SC, SDD 和 SID 随着图像清晰度的变化曲线

Fig.4.19 Speckle images at different image contrasts γ of (a) 1.00, (b) 0.60, (c) 0.33, and (d) 0.14a.u., their speckle size is 3.93pixels and mean intensity is 170graylevels, (e) SC, SDD and SID as a function of image resolution.

表 4.9 不同图像对比度时的 SC, SDD 和 SID 值的比较

Table 4.9 Comparison between SC, SDD and SID in Terms of Image Contrast

Image Contrast (a.u.)	SC (a.u.)	SDD (a.u.)	SID (a.u.)
1.00	0.5321	0.8864	0.3967
0.60	0.5321	0.9187	0.5554

0.33	0.5321	0.9424	0.6612
0.14	0.5321	0.9642	0.7367

4.4 本章小结

本章研究了模拟人眼的散斑评价方法，主要研究内容如下：

1. 研究了对评价散斑产生干扰的非均匀背景光噪声和 DMD 周期噪声，设计了环形陷波滤波器消除非均匀背景光噪声的方法，以及陈列式陷波滤波器消除 DMD 周期噪声的方法，得到了消除噪声的散斑图像。
2. 从入射光平均强度、成像镜头 F 数、CCD 曝光时间、成像镜头聚焦状态、散斑对比度以及散斑尺寸六个方面对散斑的影响角度，对比分析了结构偏离度和散斑对比度两种方法评价散斑的能力，结果显示，二者在散斑评价上有相近的性能。
3. 提出了散斑图像的散斑影响度评价方法，分别从散斑尺寸、散斑对比度和图像清晰度三个方面，研究了散斑对比度、结构偏离度和散斑影响度三种方法评价散斑图像的性能，结果显示，散斑影响度能够更有效地表征人眼对散斑图像的感知，更适合作为模拟人眼主观视觉的散斑评价方法。

第5章 Ce:YAG 透明陶瓷的荧光特性及其消除散斑的应用研究

白光 LED (white light emitting diodes, WLED) 照明具有高效率、长寿命等优点, 在市内照明、液晶背光模组、投影显示、户外幕墙等领域得到了广泛应用。传统 WLED 由蓝光 LED 与掺 Ce^{3+} 的荧光粉粉末构成, 分散于有机胶中的荧光粉被涂覆于 LED 上端, 将吸收的蓝光转换成黄光, 与未吸收的蓝光混合后产生白光[91-97]。但是有机胶具有导热率低、耐热性差、易老化等缺点, 导致 WLED 的发射功率受到限制, 并在长时间使用后出现光转换效率降低、颜色偏移等现象[98-100]。

固态照明 (solid state lighting, SSL) 作为另外一种照明解决方案, 使用稀土掺杂的无机透明衬底代替 WLED 中的有机胶, 具有导热性好、耐高温、稳定性好等特点, 是实现高亮度、高效率照明的一种有效途径。无机衬底材料主要由玻璃[101-103]、陶瓷[104-113]、单晶[114-116]等构成。玻璃是制备方法最为简单的衬底材料, 容易获得大尺寸产品, 但是玻璃的导热率低, 耐高温能力弱, 不易掺杂, 加之荧光粉的分散性很弱, 导致不易实现高效率的白光输出; 单晶成本较高[117], 不易于制作大尺寸成品且容易发生热淬效应[118, 119]; 相比而言, 陶瓷材料具有制备工艺简单、掺杂浓度可控、导热性好、耐高温等优点, 非常适合用于固态照明。

除此之外, 陶瓷材料产生的荧光线条宽较大, $\sim 100\text{nm}$, 论文中第 2 章介绍了散斑对比度与光源线宽的关系, 即相同的屏幕粗糙度下, 显示光源的线宽越大散斑对比度越小。因此, 可采用陶瓷荧光来增加激光显示光源的波长多样性, 以抑制散斑, 本章中选择 Ce:YAG 透明陶瓷作为研究对象。

将 Ce:YAG 透明陶瓷应用于激光显示中消除散斑之前, 需要制备、选择最佳参数的 Ce:YAG 透明陶瓷样品。本章内容中, 首先, 介绍了 Ce:YAG 透明陶瓷样品的制备工艺, 分析了样品的结构特征, 测量了样品的光学特性。然后, 设计并搭建了一套实验装置, 用于研究不同 Ce^{3+} 浓度、不同温度、不同厚度的 Ce:YAG 透明陶瓷在蓝光激发后的荧光发光特性。最后, 将 Ce:YAG 透明陶瓷样品应用于激光显示, 研究了其散斑消除的效果。

5.1 Ce:YAG 透明陶瓷材料

YAG 基质材料因其具有优良的综合性能, 通过在透明陶瓷基质中掺杂稀土发光离子可以有效实现光谱调节, 使稀土离子掺杂 YAG 透明陶瓷成为一种优异的荧光转换材料。本节介绍了 YAG 透明陶瓷的物理特性和 Ce:YAG 透明陶瓷材料的制备工艺, 分析了陶瓷样品的结构特征, 并测量了其光学特性。

5.1.1 YAG 透明陶瓷的物理特征

表 5.1 列出了钇铝石榴石 (Yttrium Aluminum Garnet, YAG) 透明陶瓷的物理特征。主要特征如下:

- (a) YAG 透明陶瓷的化学式为 $Y_3Al_5O_{12}$, 是由 Y_2O_3 和 Al_2O_3 按照摩尔比 3:5 化合生成的, 具有稳定的立方结构, 光学各向同性, 无双折射;
- (b) 高熔点, 化学稳定性好, 光学透过的光谱范围较宽;
- (c) YAG 在 1064 nm 处的折射率为 1.82, 使其具有高达 84% 的理论透过率;
- (d) YAG 中 Y^{3+} 半径与大多数稀土离子的半径接近, 容易实现稀土离子的掺杂;
- (f) 进行三价稀土离子掺杂时不存在电荷补偿问题;
- (g) 热导率较高, 约为 14 W/(m.K);
- (h) 硬度较高, 约为 9 (金刚石硬度为 10, 石墨硬度为 1)。

表 5.1 YAG 透明陶瓷的物理参数[120]

Table 5.5 Physical parameters of YAG transparent ceramics[120]

Properties	Data
化学式	$Y_3Al_5O_{12}$
相对分子质量	593.7
晶体结构	$O_h^{10}(Ia3d)$
熔点($^{\circ}C$)	1950
理论密度 (g/cm^3)	4.56
理论透过率@1064 nm	84%
折射率@1064 nm	1.82
23 $^{\circ}C$ 比热容/J/ (g·K)	0.59
23 $^{\circ}C$ 热导率 W/(m.K)	14
硬度	9

5.1.2 Ce:YAG 透明陶瓷的制备

Ce:YAG 透明陶瓷的光学性能不仅与材料的本征特性有关,还与材料的制备工艺密切相关。采用 Al_2O_3 (99.99%, Taimei Chemistry Co., Ltd., Japan)、 Y_2O_3 (99.9%, Rare-chem Hi-tach Co., Ltd., China) 和 CeO_2 (99.9%, Beijing DK Nano technology Co., Ltd., China)作为原材料,采用固态真空烧结法制作了不同 Ce^{3+} 离子浓度和不同厚度的陶瓷片。制作过程如下[111]:

首先,利用高纯度金刚砂球将原材料粉末混合在酒精中,加入 0.5 wt %正硅酸乙酯作为助烧剂后,球磨 12h。将混合好的泥浆放入 80°C 烤箱中放置 12h,使得酒精溶剂挥发完全;

随后,将干燥的粉末用玛瑙研钵研磨,并经过 200 目筛过滤,在低压条件下,将过滤后的粉末在刚模中压制成圆形。然后等温升压至 250Mpa,在真空($1.0 \times 10^{-5}\text{Pa}$)、 1700°C 下,在钨网真空炉中煅烧 10h;

最后,将不同浓度的陶瓷双面抛光,得到所需厚度的 Ce: YAG 透明陶瓷样品,陶瓷直径均为~20mm。

制备出 Ce:YAG 透明陶瓷样品后,我们分析了样品的结构特性[121]。首先,使用 XRD 分析仪 (Bruker Advanced D8) 测试了样品的衍射图谱,如图 5.1 所示,由图中可知,制备的 Ce:YAG 样品均为单相结构,没有其他晶相,说明了材料结构的完整性。然后,采用场发射扫描电子显微镜 (Hitachi S-4800, Japan) 对样品形貌进行分析,插图 (a) 展示了 0.5mol%Ce 离子掺杂的 YAG 透明陶瓷的表面形貌图可以看出,其晶粒大小相对均匀,平均晶粒尺寸为 $14\mu\text{m}$,具有相对清晰的晶界。插图(b)为 0.5mol%Ce 离子掺杂的 YAG 透明陶瓷样品实物图,具有很高的透明度。

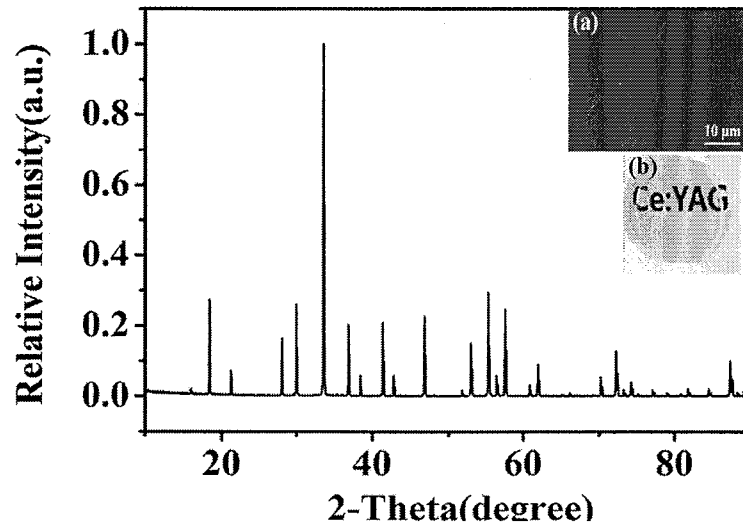


图 5.1 Ce^{3+} 浓度为 0.5mol% 的 Ce:YAG 透明陶瓷样品 XRD 衍射图; 插图 (a) 为 0.5mol% 的 Ce:YAG 透明陶瓷样品的表面形貌图; 插图 (b) 为 0.5mol% 的 Ce:YAG 透明陶瓷样品

Fig. 5.1 XRD patterns of standard Ce:YAG transparent ceramic with 0.5mol% Ce^{3+} ; the inset (a) the surface morphologies of Ce:YAG transparent ceramic with 0.5mol% Ce^{3+} ; the inset (b) picture of Ce:YAG transparent ceramic with 0.5mol% Ce^{3+}

5.1.3 Ce:YAG 透明陶瓷的光学特性

采用波长范围为 200nm–1200nm 的分光光度计 (Lambda 950, Perkin Elmer), 对 0.5mol% 掺杂浓度的 Ce:YAG 透明陶瓷的光学特性进行了测试。图 5.2(a) 展示了测试样品的吸收光谱 (以样品的透过率表征), 可以看到, 在 500 nm~800 nm 范围内, 掺 Ce^{3+} 离子的 YAG 透明荧光陶瓷的最高透过率达到了 82%。并且, 由于 Ce^{3+} 在 $4f \rightarrow 5d_2$ 和 $4f \rightarrow 5d_1$ 跃迁, 使得 YAG:Ce 透明陶瓷在 340nm 附近和 440nm~470nm 范围内, 分别有一个吸收带。Ce:YAG 透明陶瓷被蓝光激发后, 能够透射出中心波长为 550nm 的黄光, 其荧光发射光谱如图 5.2(b) 所示, 从图中可知, 发射荧光的带宽极高, 半高宽度达到 ~100nm。

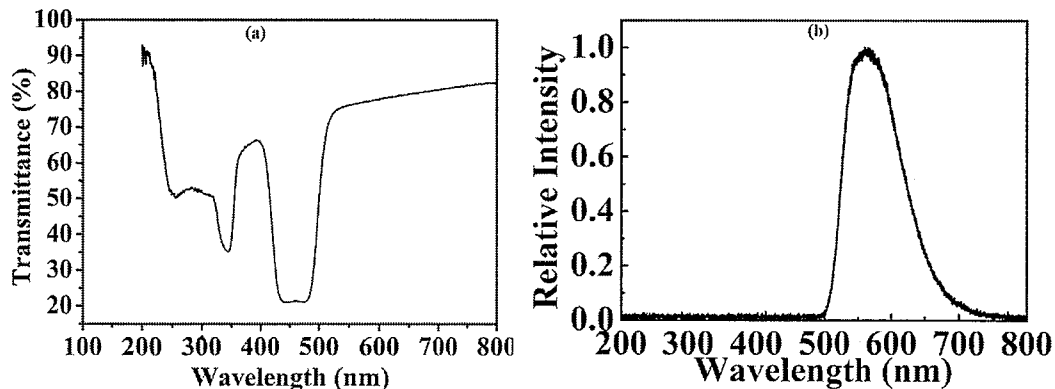


图 5.2 (a)0.5mol% Ce: YAG 透明陶瓷样品的透过率曲线(b)蓝光 LD 激发 0.5mol% Ce:YAG 陶瓷产生的荧光光谱

Fig. 5.2 (a) Transmittance spectrum and (b) Fluorescence spectra of 0.5mol% Ce:YAG ceramics excited by blue LD

此外,为了表征 Ce:YAG 透明陶瓷发射荧光的时间特性,我们还测量了透明陶瓷的荧光衰减曲线,如图 5.3 所示[121]。从图 5.3 中可以看出,在 53.5ns 时刻开始光激发,随后 550nm 发射峰值处的荧光快速衰减,其 1/e 寿命为~69ns。

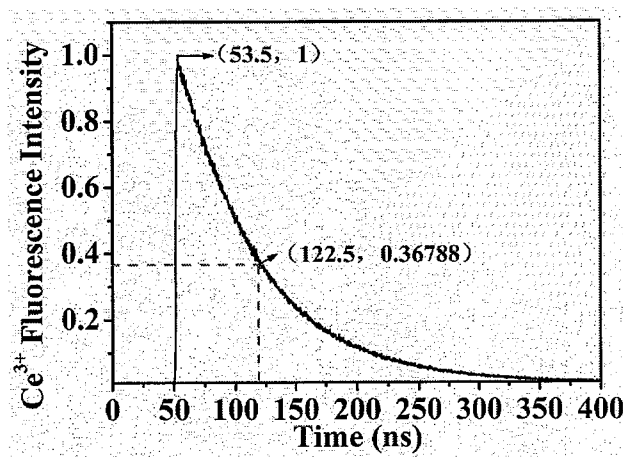


图 5.3 Ce³⁺发射峰 550 nm 荧光衰减曲线

Fig. 5.3 Fluorescence decay curves of Ce³⁺ emission peak at 550 nm

5.2 蓝光激发 Ce:YAG 透明陶瓷的荧光特性研究

5.2.1 实验方案

5.2.1.1 实验装置

图 5.4 为测试陶瓷样品荧光特性的实验装置图。待测试的 Ce: YAG 透明陶瓷固定于无氧铜制作的散热固定架上,荧光从陶瓷样品中透射后,被直径 500cm 的积分球(CGJFQ500, Hefei Xingyue Luminous Technology Applications Institute, China)收集,利用照度计测量(CL-500A, KONICA MINOLTA, Japan)荧光的亮度、色坐标和色温,使用光纤光谱仪测试荧光的光谱。

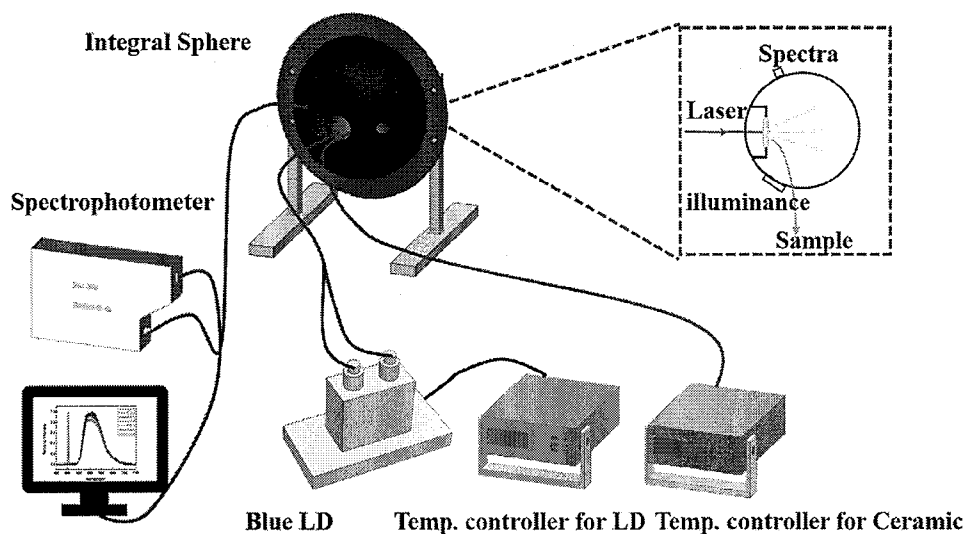


图 5.4 实验装置图

Fig. 5.4 Diagram of experimental device

5.2.1.2 蓝光激光器 (blue laser diode, blue LD)

实验中采用光纤耦合蓝光半导体激光模组 (杭州中科极光股份有限公司生产), 光纤芯径为 $400\mu\text{m}$, $\text{NA}=0.22$, 激光器实物图见图 5.5(a)插图。

测试了 25°C 条件下, 蓝光激光器输出功率与驱动电流的关系, 如图 5.5(a)所示, 激光器的阈值电流约为 0.4A , 对应的激光输出功率为 0.573W , 可以看出, 当激光器驱动电流大于阈值电流后, 激光输出功率与驱动电流呈线性关系。

还测试了输出激光的波长和输出功率的关系, 如图 5.5(b)所示。采用光纤光谱仪(HR400CG-UV-NIR, Ocean Optics, USA)测试蓝光 LD 的光谱, 可以看出, 随着激光输出功率的增加, 激光光谱出现了少许红移, 且激光线宽基本不变, 当功率由 0.573W 增至 15W 时, 激光中心波长由 452.5nm 变为 456nm , 与 Ce:YAG 陶瓷的激光吸收带宽相比很小, 对陶瓷荧光特性的影响可以忽略不计。

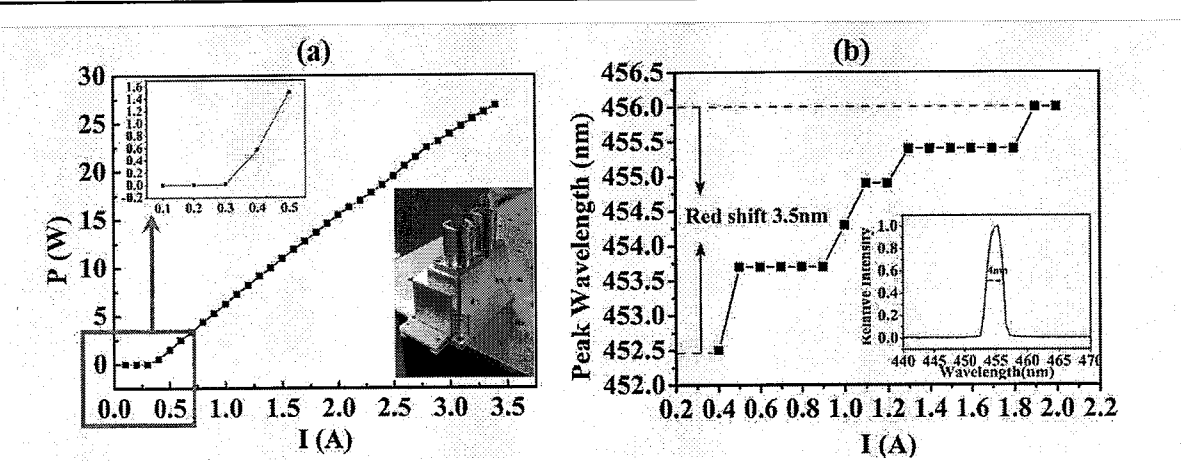


图 5.5 不同驱动电流下的蓝光光谱

Fig. 5.5 Spectra of blue LD under different driving currents

5.2.1.3 温控系统

本节从温控器的核心部件——半导体制冷器(thermo electric cooler, TEC)的工作特性开始, 介绍了温控器的工作原理和搭建的用于透明陶瓷样品和半导体激光器的温控系统。

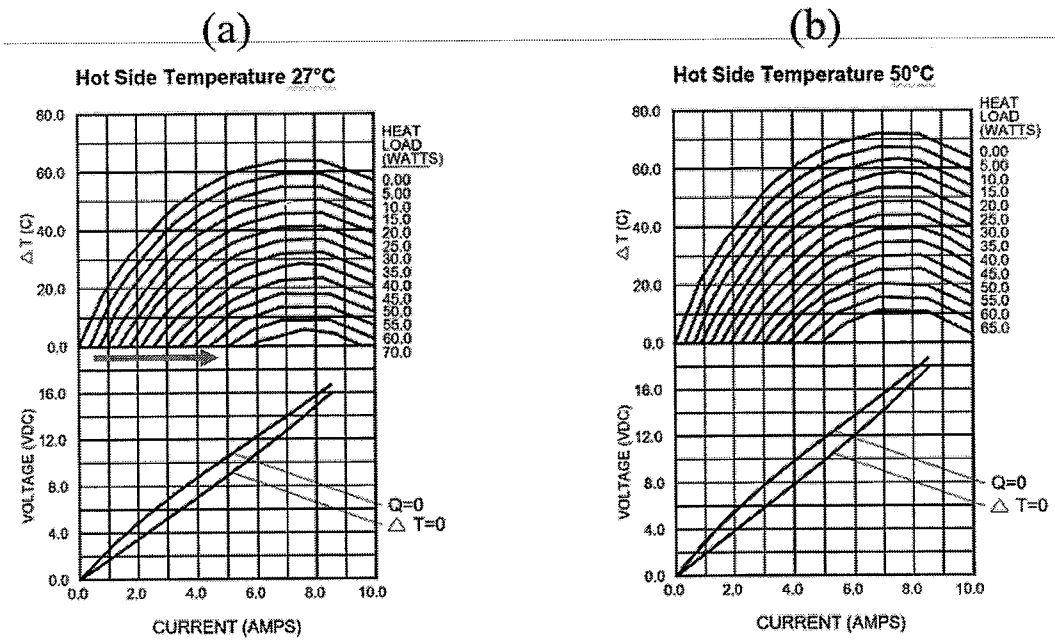


图 5.6 TEC 12708 分别在热端温度(a) 27°C和(b) 50°C时的工作曲线

Fig. 5.6 Performance curves at hot side temperature (a) 27°C和(b) 50°C of TEC 12708

1. TEC 的选型

实验室内的待控温器件是陶瓷样品和半导体激光器,根据器件的特点和使用条件,选择半导体致冷器(TEC)作为控温元件,TEC 是利用半导体材料的珀尔帖效应制成的,根据所通电流的方向,TEC 既可制冷又可加热,具有无滑动部件、可靠性高、控制方便等优点。

本文选取的 TEC 型号为 12708 (marlow industries, inc.),其中,127 代表致冷器件的电偶对数,致冷器的工作极限电压 $V = \text{电偶对数} \times 0.12V = 15.24V$,08 表示允许通过的最大电流值为 8A。

图 5.6(a)(b)第一行图描述了热端(以下称散热端)温度分别为 27°C 和 50°C 时,负载产热量、负载控制温度与工作电流的关系。其中,纵坐标 ΔT (左)表示负载控制温度与散热端的温度差,纵坐标 Heat Load (右)表示负载产热量。以图 5.1(a)为例,说明 TEC 的工作特性,详情如下所示:

一、当控制负载端温度与散热端温度相同($\Delta T = 0$)时(曲线与横坐标的交点),随着负载产热量由 0W 增加至 70W (红色箭头),TEC 的工作电流由 0A 增加至 6A。

二、当负载的产热量恒定时,以产热量为 70W 的曲线为例,说明温度差 ΔT 与 TEC 工作电流的关系:当 TEC 电流为 6A 时,温度差 ΔT 为 0,即,负载温度与散热池温度均为 27°C ;随着 TEC 工作电流的增加,温度差 ΔT 随之增加,即,负载温度增加,这是由 TEC 内部的电阻产热导致的;继续增加 TEC 的电流至 9.5A,负载端温度再次降低至 27°C ($\Delta T = 0$)。显然,当不同的 TEC 工作电流,达到相同的控温效果时,应采用较低的电流驱动,以避免不必要的能量消耗。

图 5.6 第二行图描述了散热池温度控制在 27°C 和 50°C ,负载产热量为零($Q = 0$)和热端、冷端温度相同 ($\Delta T = 0$)时,TEC 的 I-U 关系曲线。可以看到, I-U 曲线基本呈线性关系。

可以根据负载的产热量和控制温度确定 TEC 的驱动电流,根据 I-U 曲线确定 TEC 的驱动电压。需要注意的是,在 TEC 的使用过程中,最大供电电压最好等于或稍小于 TEC 的额定电压,以保证 TEC 的安全使用,不至出现电压输入过高导致 TEC 烧毁的情况。

2. 温控器的制作

图 5.7 描述了以比例-积分-微分控制器(proportional-integral-derivative control, PID)为核心的温控电路板工作原理图。图(a)中,在控制界面输入控制温度 T_{set} ,

T_{set} 数值转换为电压值 U_{set} , 温度传感器 NTC 探测到负载温度为 T_{act} , T_{act} 转换为电压值 U_{act} 。单片机将两个电压做减法, 电压差放大后加在 H 桥上 ($V_1 = V_4 = V$, $V_2 = V_3 = -V$), 控制 4 个金属 - 氧化物半导体场效应晶体管 (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET, 简称 MOS 管), 的开启和关断, MOS 管在饱和导通和截止状态快速切换, 生成脉冲宽度调制波 (Pulse Width Modulation, PWM), PWM 波经过电感线圈滤波后, 转换为 TEC 所需的直流驱动电压。如果电压差 $\Delta U > 0$, 则 $V_{c++} > 0$, TEC 产热; 如果 $\Delta U < 0$, 则 $V_{c++} < 0$, TEC 制冷。

5.8(a)和 5.9(a)为实验所用的温度控制板, 以单片机实现 PID 控制功能, 以 PWM&LC 模式双向控制温度, 支持加热制冷两种工作模式, 也可以协议为单向工作模式, 支持最常用的 10k NTC 温控传感器, 温度控制范围为 -20°C 至 100°C , 温度控制精度可达 0.01°C , 可以通过串口设定及检测温度 (ASCII 码协议, 支持电脑自带的超级终端控制), 性能指标完全能满足实验需求。

同时, 在实验中也可以使用温控显示板设定温度值、电压占空比等相关参数, 并用于实时观察温度信息, 装置实物图如图 5.8(c)和 5.9(c)所示, SV 为设定温度, PV 为实际温度。

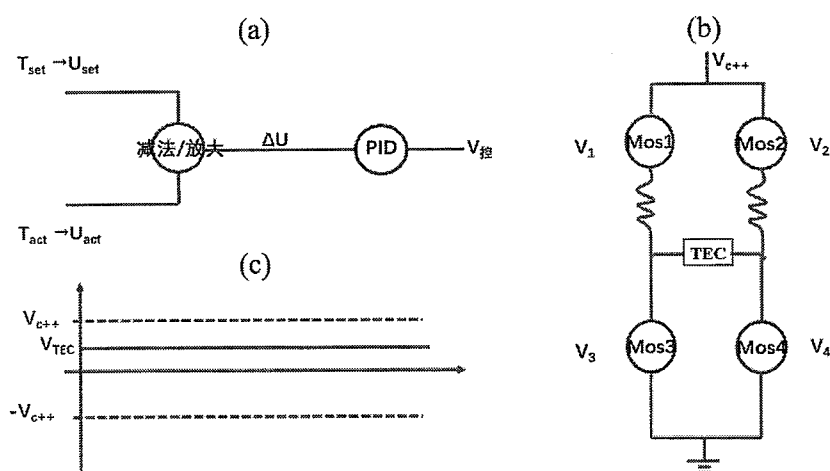


图 5.7 温度控制板的工作原理图

Fig. 5.7 Working principle of temperature control board

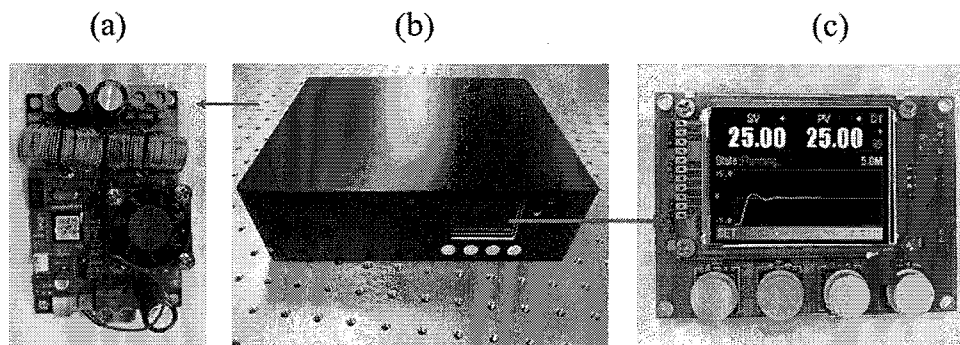


图 5.8 温控器 A，额定工作电压电流为 24V 10A。(a) 温控电路板，(b)温控器，(c)温度显示面板

Fig. 5.8 Temperature controller A: the rated working voltage and current of 24V 10A . (a) temperature control circuit board, (b) Temperature controller, (c) temperature display panel

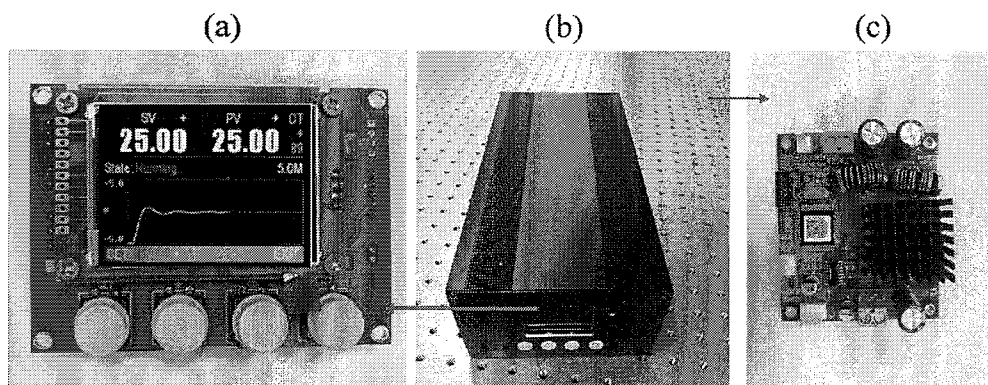


图 5.9 温控器 B，额定工作电压电流为 12V 10A。(a)温度显示面板，(b)温控器，(c)温控电路板

Fig. 5.9 Temperature controller B, the rated working voltage and current of 12V 10A . (a) temperature display panel, (b) Temperature controller, (c) temperature control circuit board

3. 温控系统搭建

制作了具有不同额定功率的两种温控器。温控器 A 的额定工作电压电流为 24V、10A，用于控制蓝光 LD 的温度，装置示意图如图 5.8 所示。温控器 B 的额定工作电压电流为 12V、10A，用于控制陶瓷样品的温度，装置示意图如图 5.9 所示。

(1) 蓝光 LD 温度控制

根据蓝光 LD 的工作特性制作了温度控制装置，装置实物图如图 5.10(a)所示。选择具有足够散热量的散热池，并安装风扇辅助散热，以确保散热池的温度维持

在室温 25℃。设置蓝光 LD 的温度也为 25℃，这是因为，当 TEC 冷热两端的温差 ΔT 为零时，在 TEC 最大耗电量一定的情况下，系统可承受的热负载最高。

本文中使用的蓝光 LD 的最高激光输出功率为 32W，功率最大时的产热量约为 70W，系统的热负载很大。当负载产热速率高于 TEC 制冷速率时，会出现热崩溃现象，导致 LD 温度急剧上升，使系统不稳，甚至烧坏 LD。为了避免上述问题，我们在 TEC 冷端与蓝光 LD 之间加入了无氧紫铜板，用来减缓导热速率，减弱 TEC 负担，铜板尺寸为 100mm×100mm×7mm，并在表面覆盖黑色盖板防止铜板与空气交换热量。

(2) 陶瓷样品温度控制

根据 Ce: YAG 透明陶瓷样品的尺寸（直径为 20mm，厚度 0.5mm–3mm）和工作特性，制作了温度控制装置，装置实物图如图 5.10 (b) 所示。将陶瓷样品放置在散热装置的凹槽内，中间填充一层导热硅脂，用两个包裹铝箔片的 L 型压条将样品固定。NTC 热敏电阻探头穿过无氧铜支架，使其靠近陶瓷中心位置，以准确探测陶瓷的实际温度。

需要注意的是，在陶瓷片和压条安装时需要排出空气气泡，以增大导热率，理由如下：无氧铜散热装置的导热系数约为 400W/m·K，Ce:YAG 透明陶瓷的导热系数约为 20W/m·K，而空气的导热系数只有 0.024W/m·K，因此，若陶瓷与散热装置和压条接触表面存在空气间隙，会极大的降低有效导热系数，使系统的控温性能降低，甚至无法工作。

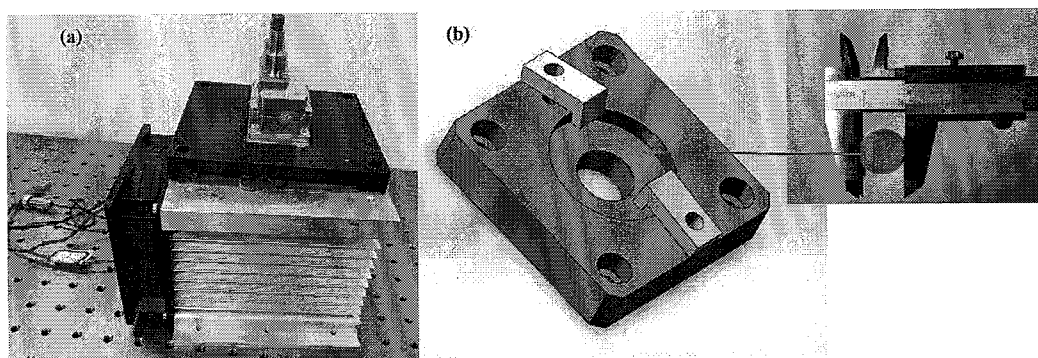


图 5.10 (a) 蓝光 LD 散热装置，(b) Ce: YAG 透明陶瓷散热装

Fig. 5.10 Heat sink of blue LD, (b) heat sink of Ce: YAG transparent ceramic

5.2.2 蓝光激发 Ce:YAG 透明陶瓷的荧光特性

利用上述实验方案，首先研究不同掺 Ce^{3+} 浓度、不同厚度的 Ce: YAG 透明

陶瓷的荧光特性, 包括最高流明值大小、流明效率、光谱、色温和色坐标等。随后, 选择产生最高荧光功率的样品, 改变样品的温度, 测试不同温度下陶瓷样品产生的荧光的流明值大小、色坐标和色温等特性。

5.2.2.1 Ce^{3+} 浓度对发光特性的影响

相比于 $\text{Ce}:\text{YAG}$ 单晶, 陶瓷能够掺杂更高浓度的 Ce^{3+} , 因此, 可使用更薄的样品产生相同的荧光光通量[122-124]。低 Ce^{3+} 掺杂浓度的样品光转换效率较低, 增加 Ce^{3+} 的浓度有助于增加样品的光转换效率, 但是过高 Ce^{3+} 掺杂浓度的样品会出现淬灭现象, 使光转换效率下降。本节对 1mm 厚度样品的最佳掺 Ce^{3+} 浓度进行了实验研究, 陶瓷温度控制在 20°C , 测试了 Ce^{3+} 掺杂浓度分别为 0.5、0.8、1、1.2 和 1.5mol %时的陶瓷样品发光特性。实验结果如下所示。

首先, 使用 XRD 测试 0.5mol%掺 Ce 浓度的陶瓷样品的结构, 如图 5.11(a)所示, 结果显示制备的 $\text{Ce}:\text{YAG}$ 样品均为单相结构, 没有其他晶相, 说明了材料结构的完整性。

然后, 测试陶瓷样品的吸收光谱。图 5.11(b)是 1mm 厚的 0.5mol% $\text{Ce}:\text{YAG}$ 陶瓷样品的透射光谱, 可以看到样品对 420–470nm 范围内的激光有极强的吸收, 说明此样品可以使用多种波段的蓝光激发, 应用范围广。

之后, 测试不同掺 Ce^{3+} 浓度样品发生荧光的流明随着蓝光功率的变化曲线, 如图 5.11(c)所示。从图中可以看出:

1. 当蓝光 LD 的功率为 14.6W 时, 0.5mol%掺杂浓度的 $\text{Ce}:\text{YAG}$ 透明陶瓷可以产生 2087lm 的荧光, 此时的荧光效率为 143lm/W, 继续增加激光功率可能产生淬灭效应, 且此时已经可以较为明显的看到, 荧光光通量随激光功率增加而增长的速度开始变慢, 所以认为 2087lm 就是此样品产生的最大荧光光通量。

2. 当 Ce^{3+} 掺杂浓度大于 0.5mol %时 (0.8、1、1.2 和 1.5mol %), 透明陶瓷产生的荧光亮度降低。以 1.5mol%掺杂浓度的样品为例, 当蓝光功率为 8.2W 时, 样品可以产生 775lm 的荧光, 继续增加蓝光功率, 产生的荧光光通量不再增加, 反而呈下降趋势。这是由于材料内部的荧光淬灭导致的: 当蓝光 LD 激发陶瓷样品时, 一部分能量作为转换为荧光发射出来, 另一部分则转换为晶格振动, 产生热量, 使得陶瓷内部温度升高, 电子碰撞加剧, 当热量损耗增加速率大于发生荧光功率的增加速率时, 出现激光功率增加, 荧光功率反而降低的现象, 也即淬灭

现象。

最后，采用相同的蓝光功率（7.3W）激发，测试不同 Ce^{3+} 掺杂浓度的陶瓷样品产生的荧光光通量，如图 5.11(d)所示。实验结果呈现了无序的趋势，尽管如此， Ce^{3+} 掺杂浓度为 0.5mol% 的陶瓷样品可以产生最高的荧光光通量，具有最高的光转换效率。随着 Ce^{3+} 浓度的增加，陶瓷内部结构的缺陷增加，尤其散射点数量的增加导致光损耗的增加。插图列出了 Ce^{3+} 浓度分别为 0.5mol% 和 1.5mol% 的陶瓷样品实物图。

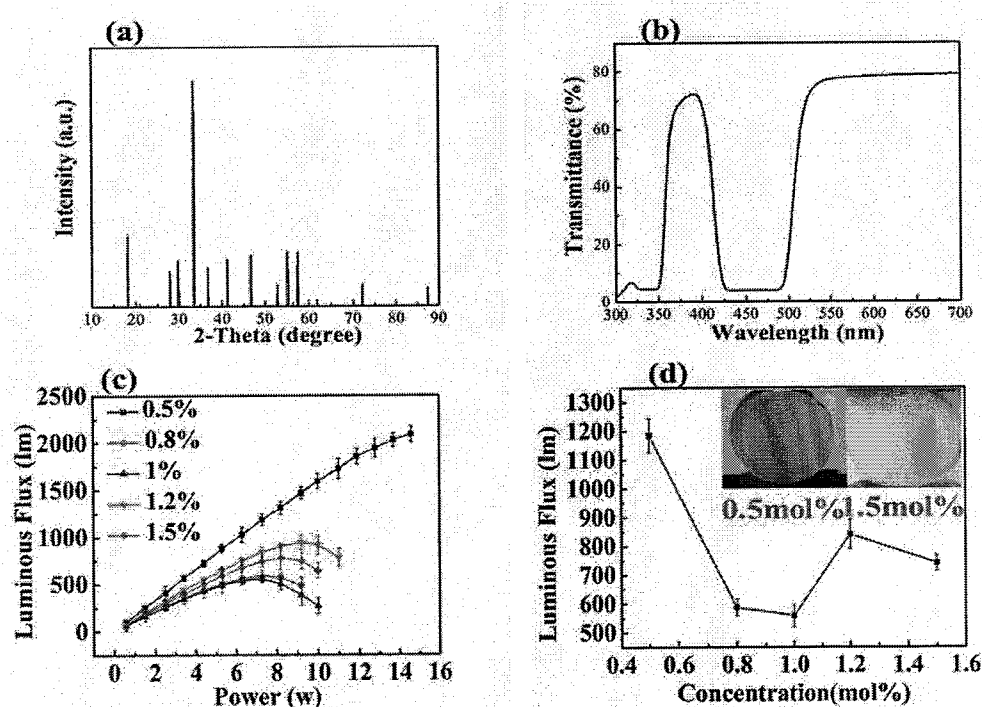


图 5.11 (a) Ce^{3+} 浓度为 0.5mol% 的 Ce:YAG 透明陶瓷的 XRD 测试图；(b) 0.5mol%，1mm 厚 Ce:YAG 陶瓷样品的透射吸收光谱；(c) 0.5、0.8、1、1.2 和 1.5mol% Ce^{3+} 浓度，1mm 厚度的 Ce:YAG 陶瓷样品发射的荧光光通量；(d) 相同的蓝光功率，7.3 W，激发陶瓷，掺 Ce 浓度为 0.8、1、1.2 和 1.5mol% 的陶瓷样品产生的荧光光通量，插图为 Ce 浓度为 0.5mol% 和 1.5mol% 陶瓷样品实物图

Fig. 5.11 (a) the XRD pattern of Ce:YAG ceramics with a Ce^{3+} concentration of 0.5mol% ; (b) the transmission spectrum of 1-mm thick Ce:YAG with Ce concentration of 0.5mol% ; (c) Variation in the luminous flux of 1-mm thick Ce:YAG ceramics with respect to the power for Ce concentrations of 0.5, 0.8, 1, 1.2, and 1.5mol% ; (d) Variation in the luminous flux of the ceramics at a fixed blue light power of 7.3W for Ce concentrations of 0.8, 1, 1.2, and 1.5mol%. The insets in the top show images of the 0.5 and 1.5mol% Ce:YAG ceramics

5.2.2.2 厚度对发光特性的影响

本节中,研究了不同厚度的 Ce: YAG 陶瓷样品的发光特性, Ce^{3+} 掺杂浓度均为 0.5mol%, 样品温度均为 20°C。图 5.12 是 6 种不同厚度(1mm–1.8mm)的陶瓷样品发射的荧光光通量随着蓝光功率变化的曲线, 当 Ce: YAG 陶瓷片的厚度从 1mm 增加至 1.6mm 时, 激光功率 0–10W 范围内的样品光转化效率基本不变, 随着激光功率进一步增加, 样品出现了淬灭现象, 其中 1.6mm 厚样品的淬灭功率最高, 对应的荧光光通量也最高。继续增加陶瓷片厚度至 1.8mm, 荧光光通量与激光功率变化曲线的斜率明显降低, 这主要是因为陶瓷内部结构缺陷增加, 导致散射增强使光损失增加。

从上述研究结果可知, 0.5mol%Ce 掺杂浓度、1.6mm 厚度的样品, 能够产生最高的荧光光通量, 具有最高的光转换效率, 该样品产生的荧光光通量和光转换效率随着蓝光功率的变化曲线如图 5.13 所示, 从图中可知, 当蓝光功率达到 19.5W 时, 产生荧光的光通量最高, 为 2690lm, 对应的光转换效率为 137.9lm/W, 色坐标为(0.481, 0.524)。将产生的荧光(黄光)与蓝光以合适的比列混合, 即可实现白光照明(0.3444, 0.3134)。

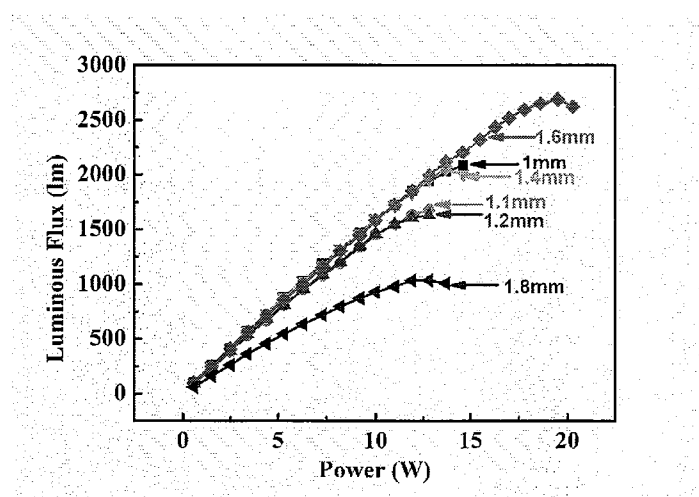


图 5.12 不同厚度的陶瓷样品(1 mm–1.8 mm)随着蓝光功率的增加产生的荧光光通量

Fig. 5.12 Luminous flux as a function of the exciting laser power for samples with thicknesses ranging from 1 to 1.8mm

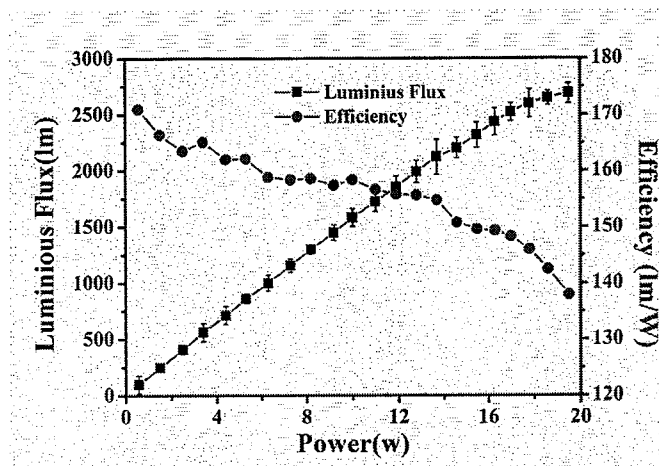


图 5.13 掺 Ce^{3+} 浓度 0.5mol%、样品厚度 1.6mm 的 Ce:YAG 透明陶瓷随着蓝光 LD 功率增加产生的荧光光通量和荧光效率

Fig. 5.13 Emitting flux and light-conversion efficiency of a 1.6-mm Ce:YAG transparent ceramic (with a Ce^{3+} dopant concentration of 0.5%) as a function of the exciting laser power

5.2.2.3 温度对发光特性的影响

在固态照明技术中,热管理技术至关重要,温度处理不当会导致陶瓷寿命和荧光效率降低。本节中,选择 1.6mm 厚、0.5mol% Ce^{3+} 浓度的样品作为研究对象,探究温度对发光特性的影响。

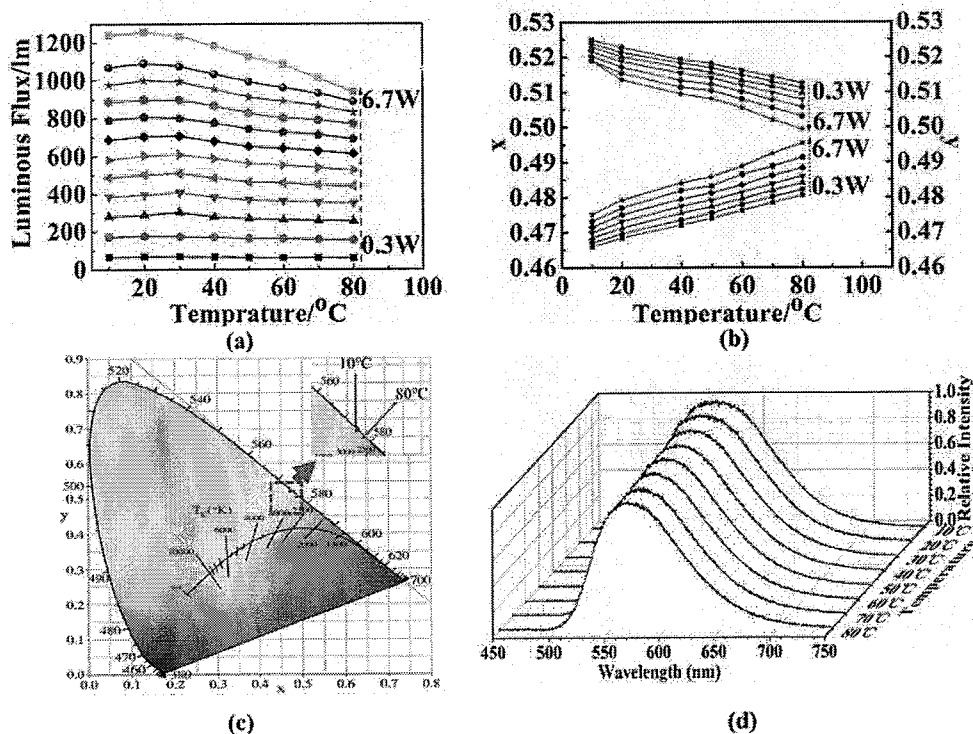


图 5.14 (a) 温度对产生的荧光光通量的影响; (b) 0.5mol%、1.6mm 厚的 Ce:YAG 陶瓷样品产生的荧光色坐标在温度 10°C–80°C 之间的变化; (c) 控制陶瓷温度在 10°C 和 80°C 时, 荧光颜色在色域图上的位置; (d) 不同温度下, 陶瓷产生的荧光光谱

Fig. 5.14 (a) Temperature dependence of luminous flux; (b) color coordinates of the emitting yellow light under different controlled temperatures of 10–80 °C for the sample with 1.6mm thickness and 0.5mol% dopant concentration; (c) shift between working at 10 and 80°C when the exciting laser power is 6.732W; (d) emission spectra with respect to the change in the temperature

图 5.14(a) 是不同蓝光功率激发下, 荧光光通量随温度变化的曲线。当蓝光功率较低时, 激发陶瓷样品产生的荧光光通量不随温度改变而变化, 温度稳定性很好。当蓝光功率较高时, 随着陶瓷温度从 10°C 增加至 80°C, 陶瓷发射荧光光通量降低。这是因为, 温度的升高加剧了粒子之间的碰撞, 增加了光损耗, 导致产生的荧光光通量降低。

图 5.14(b) 是荧光色坐标随温度的变化曲线, 随着温度由 10°C 增加至 80°C, 色坐标 x 数值逐渐增加, y 数值逐渐减小, 且 x 增加的速率与 y 降低的速率几乎相同, 也就是说, 样品温度的升高会导致荧光光谱红移。从图中还可以看出, 蓝光功率的增加也会导致荧光光谱的红移。图 5.14(c) 展示了颜色空间中荧光颜色坐标随着透明陶瓷温度的变化。图 5.14(d) 展示了荧光光谱随样品温度增加的变化, 可以看到, 随着温度从 10°C 增加至 80°C, 荧光中心波长由 559.0nm 红移至 565.7nm, 荧光光谱宽度为 ~100nm。陶瓷样品产生的荧光光谱随着样品温度的变化而变化, 可以利用此特性对 Ce:YAG 透明陶瓷产生荧光的颜色进行调控, 这对于高亮度固态照明和投影显示行业具有重要的应用价值。

5.2.3 小结

本节研究了蓝光激发 Ce:YAG 透明陶瓷样品在不同 Ce^{3+} 掺杂浓度、不同厚度、不同温度下的发光特性, 结果表明, 0.5mol% Ce^{3+} 掺杂浓度、1.6mm 厚 (直径 20mm) 的透明陶瓷样品, 在蓝光激发功率为 19.5W, 温度控制为 20°C 的条件下, 产生了最高为 2690lm 的荧光光通量。该实验结果对于照明、液晶背光模组和投影显示等方面具有重要的应用前景。

5.3 Ce:YAG 透明陶瓷消除散斑

基于上述对 Ce:YAG 透明陶瓷样品在蓝光激发下的荧光光谱和荧光光通量特

性的研究, 本节将 Ce:YAG 陶瓷应用于激光显示设备, 进行了散斑消除的实验研究。

5.3.1 实验方案设计

如图 5.15 所示[125], 红绿蓝(上)三色半导体激光器(杭州中科极光科技有限公司生产)经由两个二向色镜合束, 红绿蓝激光器的中心波长分别为 638nm、520nm 和 455nm, 当红绿蓝激光器的功率以 6:4:2.4 的比例混合时, 产生白光。

图中的另一台蓝色半导体激光器(下)出射的激光经由二向色镜反射后, 入射至 Ce:YAG 陶瓷样品, 发出的黄色荧光与三色半导体激光器产生的光合束, 根据掺入的黄色荧光比例, 调整三色半导体激光器输出激光的比例, 最终合成应用于激光显示照明的白光光源。

因为绿光激光产生的散斑最突出, 为了简化实验, 仅令绿光 LD 开启, 研究绿色激光与黄色荧光混合比例不同时的散斑消除效果。

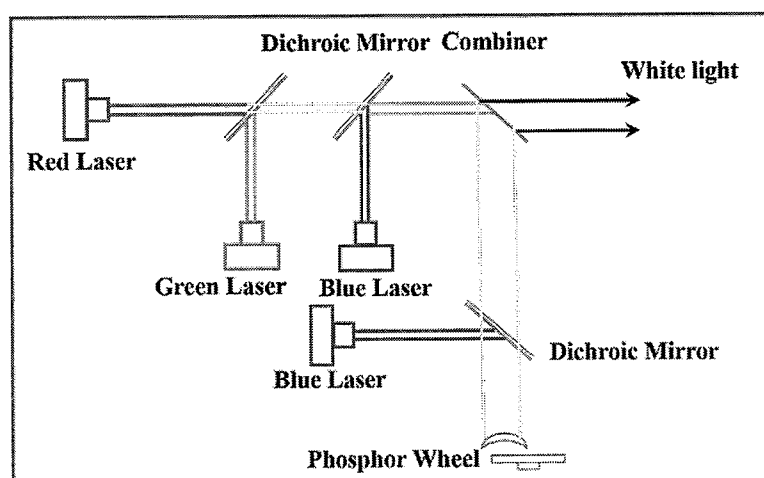


图 5.15 Ce:YAG 陶瓷消散斑实验光路图[125]

Fig. 5.15 Experimental optical path map for Ce:YAG ceramics reducing speckle [125]

5.3.2 Ce:YAG 陶瓷消散斑测试结果

采用上述简化的实验装置, 研究了 Ce:YAG 荧光对散斑的消除效果。如图 5.16 所示, 首先分别记录陶瓷黄色荧光、半导体绿色激光和全固态绿色激光作为光源时的散斑图像灰度图, 散斑对比度计算值分别为 3.5%、8.6%和 21%: Ce:YAG 陶瓷发射的荧光光谱线宽约为 100nm, 相干长度极短, 以此荧光作为光源, 投影的图像不存在散斑干扰(散斑对比度低于人眼分辨阈值); 半导体绿光激光器的

激光线宽约为 5nm，相干长度居中，产生的散斑噪声较少；全固态绿光激光器的线宽最小，约为 1nm，相干长度最长，易发生干涉，产生的散斑干扰最严重。

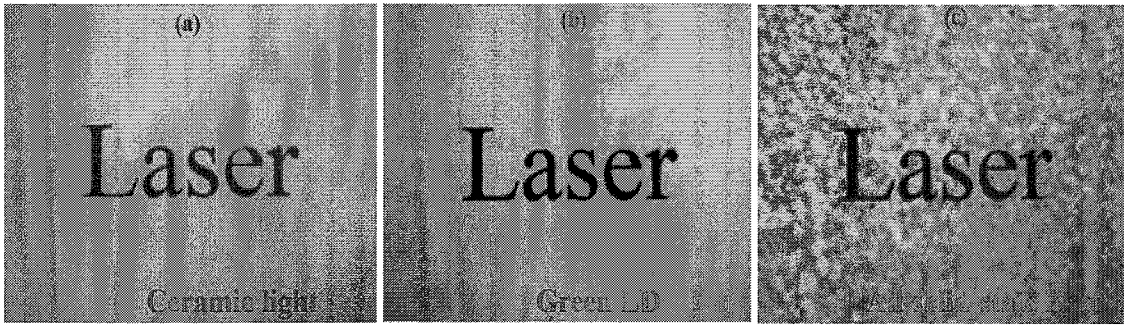


图 5.16 不同照明光源的投影图像，(a)Ce:YAG 透明陶瓷产生的荧光，(b)半导体激光器产生的绿光和(c)全固态激光器产生的绿光

Fig. 5.16 images projected by different lighting source, (a) yellow fluorescence emitted by Ce:YAG transparent ceramics, (b) green laser emitted by laser diode and(c) green laser emitted by all-solid-state laser

然后，将荧光与绿色激光按照不同比例混合，研究不同比例时的散斑消除效果，实验结果如图 5.17 所示。图 5.17(a)为只有陶瓷发射的荧光作为照明光源时的散斑图像，此时的散斑对比度为 3.5%。图(b)为开启绿色半导体激光器，荧光与绿色激光的比例为 $I_{\text{荧光}}:I_{\text{激光}} = 1:4$ ，用 CCD 记录散斑图像，散斑对比度为 $SC = 6.5\%$ ，也即半导体激光的加入导致了散斑对比度的增加。继续增加半导体激光的比例，结果如下：图(c)，混合比例为 $I_{\text{荧光}}:I_{\text{激光}} = 1:8$ ，散斑对比度为 $SC = 6.8\%$ ；图(d)，混合比例为 $I_{\text{荧光}}:I_{\text{激光}} = 1:9$ ，散斑对比度也为 $SC = 8.4\%$ ；图(e)，混合比例为 $I_{\text{荧光}}:I_{\text{激光}} = 1:13$ ，散斑对比度为 $SC = 9.3\%$ ；图(f)，混合比例为 $I_{\text{荧光}}:I_{\text{激光}} = 0:1$ ，散斑对比度为 $SC = 12\%$ 。实验结果表明，在激光投影光路中，加入 Ce:YAG 陶瓷产生的荧光做为部分光源，可以有效的降低散斑对激光显示的影响。

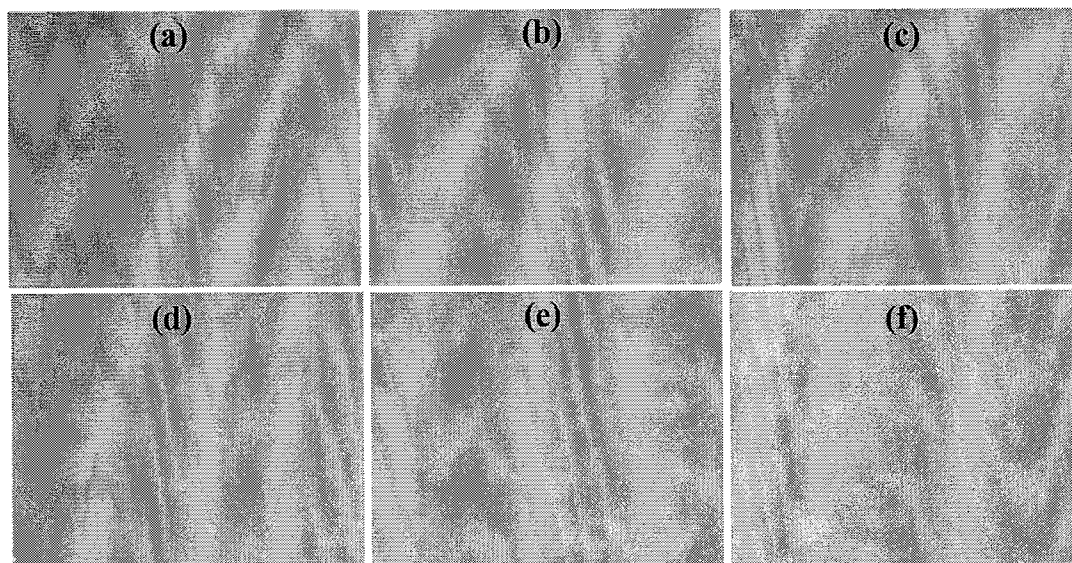


图 5.17 荧光与激光不同照度混合比例时投影的散斑图像, (a) $I_{\text{荧光}}:I_{\text{激光}} = 1:0$, $SC = 3.5\%$, (b) $I_{\text{荧光}}:I_{\text{激光}} = 1:4$, $SC = 6.5\%$, (c) $I_{\text{荧光}}:I_{\text{激光}} = 1:8$, $SC = 6.8\%$, (d) $I_{\text{荧光}}:I_{\text{激光}} = 1:9$, $SC = 8.4\%$, (e) $I_{\text{荧光}}:I_{\text{激光}} = 1:13$, $SC = 9.3\%$, (f) $I_{\text{荧光}}:I_{\text{激光}} = 0:1$, $SC = 12\%$

Fig. 5.17 projected speckle images with different propotions of fluorescence and laser, (a) $I_{\text{fluorecence}}:I_{\text{laser}} = 1:0$, $SC = 3.5\%$, (b) $I_{\text{fluorecence}}:I_{\text{laser}} = 1:4$, $SC = 6.5\%$, (c) $I_{\text{fluorecence}}:I_{\text{laser}} = 1:8$, $SC = 6.8\%$, (d) $I_{\text{fluorecence}}:I_{\text{laser}} = 1:9$, $SC = 8.4\%$, (e) $I_{\text{fluorecence}}:I_{\text{laser}} = 1:13$, $SC = 9.3\%$, (f) $I_{\text{fluorecence}}:I_{\text{laser}} = 0:1$, $SC = 12\%$

5.4 本章小结

本章介绍了 Ce:YAG 透明陶瓷材料的制备工艺, 研究了陶瓷的荧光发光特性及其在激光显示中消除散斑的效果, 主要内容如下:

1. 介绍了 Ce:YAG 透明陶瓷的制备工艺, 分析了陶瓷的结构特性, 测量了陶瓷的光学特性。
2. 研究了 Ce:YAG 透明陶瓷在蓝光激光激发下, 不同 Ce^{3+} 掺杂浓度、不同厚度、不同温度下的 Ce:YAG 透明陶瓷的发光特性, 结果显示, 陶瓷样品具有良好的温度稳定性, 最高可产生 2690lm 的黄色荧光, 光谱半高带宽为~100nm。
3. 研究了 Ce:YAG 透明陶瓷与半导体激光器输出激光混合时的散斑消除效果, 实验结果表明, 陶瓷样品产生的荧光可以有效地抑制激光显示中的散斑。

第6章 振动屏幕消除散斑

为了提高激光显示画质,多种散斑消除方法被相继提出,主要包括基于波长多样性[126-128]、角度多样性[40, 129, 130]、偏振多样性[131]和空间多样性原理的散斑抑制方法[42, 68]。然而,波长多样性的抑制散斑方法,需要重新设计激光器的发光特性,成本较高且难度大;角度多样性的抑制散斑方法,需要光学元件旋转或振动,这会占据很多空间,且动态器件的存在会导致激光损耗并影响设备稳定性;偏振多样性的抑制散斑方法,散斑对比度最多降低 $1/\sqrt{2}$ 倍。除此之外,这些抑制散斑的方法减少的仅仅是投影散斑,而人眼接收的是屏幕散斑,即,投影散斑经过屏幕粗糙表面再次散射、干涉所形成的散斑。工程上,普遍采用振动屏幕的方法来消除屏幕散斑,当振动振幅达到一个波长 λ ,也即 2π 相位变化时,两个散斑图样之间失去相关性,散斑叠加后被平均,使人眼感受到无散斑噪声的清晰图像。

1947年, Mason 和 Hauber 等人使用移动式单屏来减少散斑。1967年, Eric G. Rawson 等人提出了基于移动屏幕法的几种配置,包括移动一个屏幕,或移动两个空间分离的屏幕,两个屏幕之间呈圆形或线性运动。2009年, Riechert 等人使用胶体分散填充投影屏幕消除散斑,但是使用该方法存在图像模糊的问题[42]。随后,工程师们发现,通过电机使屏幕沿 x 或 y 方向移动 $\sim 1\text{mm}$ 距离,或在屏幕背面安装振动器振动屏幕,可以有效地减少散斑。然而,几种典型的振幕方法没有系统的对比测试,缺乏科学的数据支撑。

本章中,设计搭建了一套可分别利用声波振幕、框架振幕和贴片电机振幕三种方法消除散斑的装置,研究了三种方法屏幕振动频率与散斑对比度的关系,测量了对应的振源功耗和噪声[132]。

6.1 实验装置

1. 激光投影与自动化图像采集、处理系统

实验装置如图6.1(a)所示。采用中心波长为532nm的半导体激光器(杭州中科极光科技有限公司生产),激光通过光纤耦合输出,经过发散角为 24° 的高斯型散射片和匀光棒后,由投影镜头投影至屏幕上,产生了强度均匀分布的散斑图像。采用Manta-G201B CCD相机和焦距 $f=50\text{mm}$ 的成像镜头搭建了模拟人眼的散斑

测量平台，记录不同实验条件下的散斑图像，利用软件实时控制CCD，实现测试系统的开启、图像采集、保存、数据处理以及关闭等自动化功能。振幕系统和振动频率的测量详见下文。

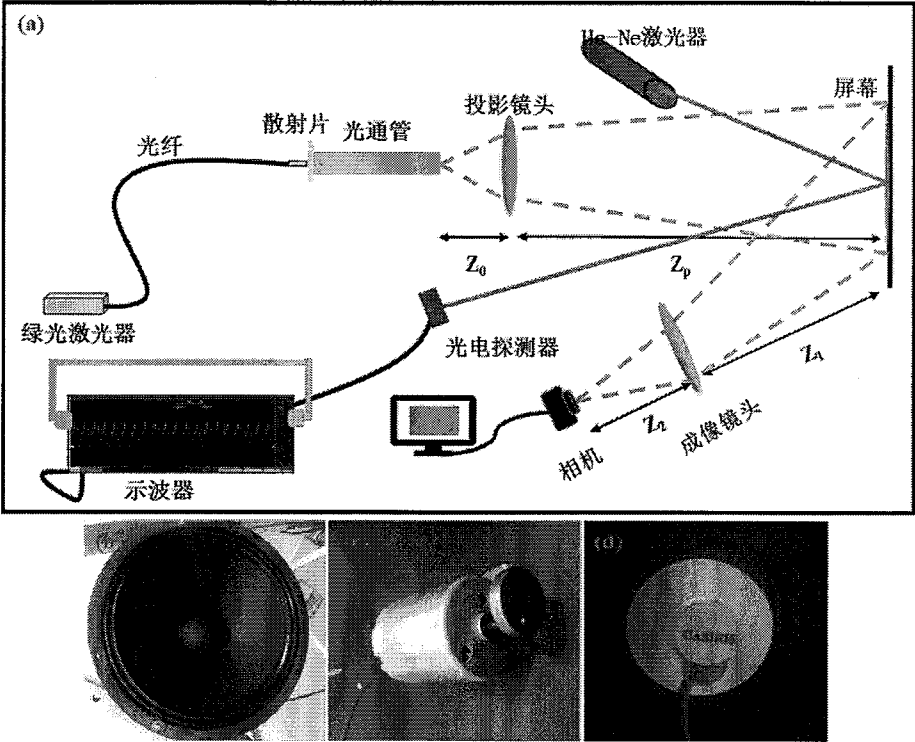


图6.1 (a) 实验光路图, (b)喇叭, (b)偏心振子, (d) 贴片电机

Fig. 6.1 (a) Experimental optical path, (b) horn, (c)feccentric oscillator, (d) patch motor

2. 振幕系统

实验选用84英寸(200cm×115cm)的白塑幕，为了防止其他振动因素对屏幕振动的干扰，四周使用框架将白塑幕布紧固，并选择稳固性好的支架将屏幕挂起。

将口径30cm的喇叭垂直固定在距离屏幕5cm处，通过蓝牙连接手机后，可以使用手机自由控制声波的幅度和频率，喇叭实物如图6.1(b)所示。

两个额定电压12V的偏心转子分别固定于屏幕的水平框架和竖直框架，实验中可在一维框架振动和二维框架振动两种方式间任意切换，通过调节电压控制偏心转子的转动频率，偏心转子实物如图6.1(c)所示。

贴片电机的额定电压为3.0V，额定负载下最大电流为80mA，该电机的工作模式为0.5s ON/OFF间歇式旋转，旋转方式为逆时针正弦式旋转。图6.2为贴片电机的测试结果，当施加3.0V电压时，180ms后电机转速达到15000rpm，250ms后转速达到最高值16500rpm，400ms后转速稳定至16000rpm。具体实验时，采用6

个贴片电机驱动屏幕振动，电机在水平和竖直方向的间隔均为50cm，以2×3矩阵的形式粘于屏幕背面，通过调节电压控制电机转速。贴片电机（LBQ-08VM02，NIDEC SEIMITSU CORPORATION, Japan）实物如图6.1(d)所示。

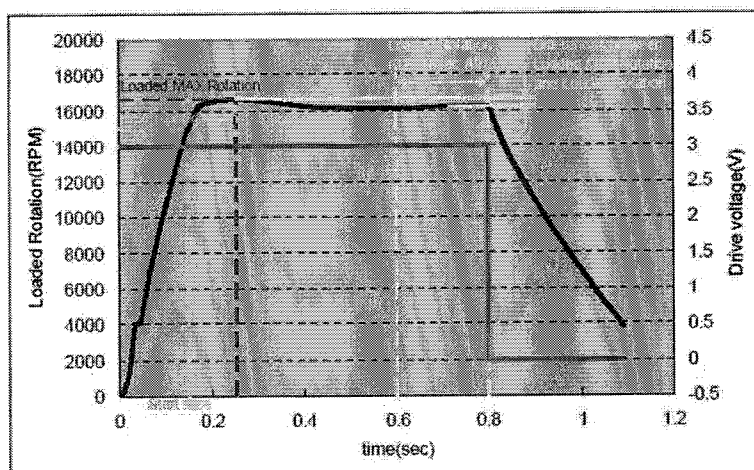


图6.2 贴片电机转速测试

Fig. 6.2 Rotating measurement of the patch motor

3. 实时监测屏幕频率与振动噪音系统

选用单模线偏振He-Ne激光器的出射激光作为探测光（杭州谱镭光电，SPL-HN310P），激光输出功率为3mW，激光波长为632.5nm，使激光入射至粘有铝箔的屏幕上，反射光束被光电探测器(Thorlabs, DET10A/M)接收，探测器输出显示在示波器(Tektronix 5 Series)上，以实时监测屏幕的振动频率。以框架振动为例，如图6.3(a)(b)分别描述了偏心转子工作在2.0V和6.5V电压时，屏幕振动的波形，从图中可知，当偏心转子转速变化时，屏幕振动波形随之发生较大的变化，屏幕振动模式接近正弦波，振动频率可以直接在示波器上读出。

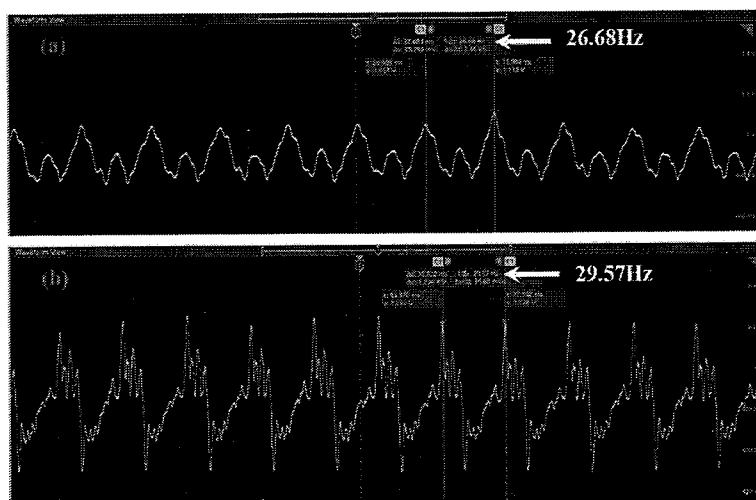


图6.3 偏心振子工作在 (a) 6.5V, 和 (b) 7.0V电压时, 屏幕振动波形以及频率

Fig. 6.3 The waveform and frequency of screen when eccentric rotator works under (a) 6.5 V, and (b) 7.0V

采用数字噪音计(BENETECH GM1357)在垂直距离屏幕60cm处测量振幕系统产生的噪声, 选择“人耳所感觉噪音量”模式, 单位为dB。测试过程中, 保证只存在振幕声音, 屏蔽一切杂音。

6.2 三种振幕方式消除散斑

6.2.1 声波振动

声波振动频率对散斑的影响如图 6.4(a)所示, 音量为-20dB 或-8dB 时, 随着声波频率从 10Hz 增加至 100Hz, 散斑对比度先减小后增加。散斑对比度减小的原因: 随着屏幕振动频率的增加(10Hz 至 30Hz), 产生的散斑图样数量增加, 在人眼积分时间 30ms 内, 更多的散斑图样参与图像强度平均, 导致图像进一步匀化, 使得人眼感知的散斑减少, 当频率增加至 30Hz 时, 对应的散斑对比度最小。振动频率继续增加时, 散斑对比度出现增加的趋势, 原因如下: 第一, 屏幕框架处机械波反射形成驻波, 减弱了屏幕振动的随机性, 减少了独立散斑图样的数量; 第二, 随着声波频率的增加, 引起了屏幕框架、屏幕支架等配件的振动, 使得屏幕振动模式复杂化甚至出现共振现象, 产生不可量化的影响。

除此之外, 我们发现, 10Hz-100Hz 频率范围内, 音量-8dB 对应的散斑对比度小于音量-20dB 对应的散斑对比度, 这是因为在相同振动频率下, 音量为-8dB 的声波引起的屏幕振幅大于音量为-20dB 的声波, 假设人眼在观察距离 L 处, 人眼在屏幕的最小分辨单元为 d , 当屏幕振幅大于 d 时, 产生了独立的散斑图样, 而当屏幕振幅小于 d 时, 产生的散斑图样之间仍然存在相关性, 导致显示图像仍存在散斑。因此, 振幕消除散斑效果不仅与振动频率有关, 而且与屏幕的振动幅度有关。

将散斑对比度计算结果和人眼主观感受对比, 当散斑对比度小于 5%时, 人眼看不到散斑, 具体到我们的实验结果, 当声波音量为-8dB 时, 在 20Hz-50Hz 屏幕振动频段, 散斑消除。

图 6.4(b)对比了声波振幕频率为 30Hz 和 70Hz 时, 散斑对比度随音量的变化,

离散点为实验数据,实线为线性拟合曲线。当振幕频率为 30Hz,音量升高至-8dB 时,散斑消除;当振幕频率为 70Hz,音量升高至-3.74dB 时,散斑消除。该实验结果进一步证明,振幕消除散斑受到声波振幕频率和振幅的共同影响。

图 6.4(c)(d)分别描述了 30Hz 和 70Hz 屏幕振动频率下,随着音量的增加,喇叭的功耗和噪声变化。由图中可知,相同音量下,振幕频率为 70Hz 时的喇叭功耗低于频率 30Hz 时的功耗,但是其噪声较高。综合考虑散斑消除效果、功耗和噪声,选择振幕频率 30Hz、音量为-8dB,此时散斑对比度为 4.60%,功耗 30.1W,系统噪声为 48.6dB。

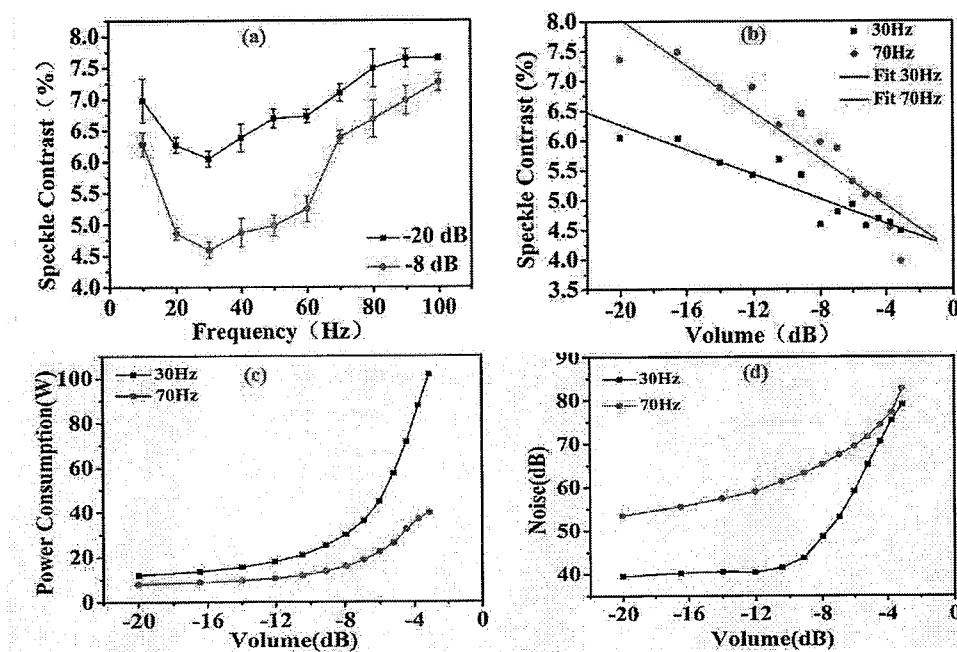


图 6.4(a)声波振幕频率对散斑对比度的影响, (b)相同频率下,喇叭音量对散斑的影响, (c)不同音量下,喇叭功耗, (d)不同频率,不同音量时喇叭产生的噪声

Fig. 6.4 (a) the influence of acoustic frequency on speckle contrast, (b) the influence of volume on speckle contrast under the same frequency, (c) the power consumption of horn under different volumes, (d) the noise produced by the horn under different frequencies and volumes

6.2.2 框架振动

图 6.5(a)描述了一维框架振动和二维框架振动对散斑消除的影响。实验上实现的最大框架振动频率为 35Hz,随着振动频率由 10Hz 增加至 35Hz,散斑对比度呈现下降趋势。从图中可以看出,一维框架振动和二维框架振动时,散斑对比度最低分别为 6.19%和 5.60%,此时,人眼仍然能看到细沙状散斑,也就是说,

在当前实验条件下, 框架振动不能完全消除散斑。

图 6.5(b)和图 6.5 (c)对比了一维框架振幕和二维框架振幕消散斑的功耗和噪声。散斑对比度分别降至 6.19%和 5.60%时, 一维偏心转子工作的耗能为 0.77W, 噪声为 43.1dB; 二维偏心转子同时工作的耗能为 0.85W, 系统噪声 43.3dB。

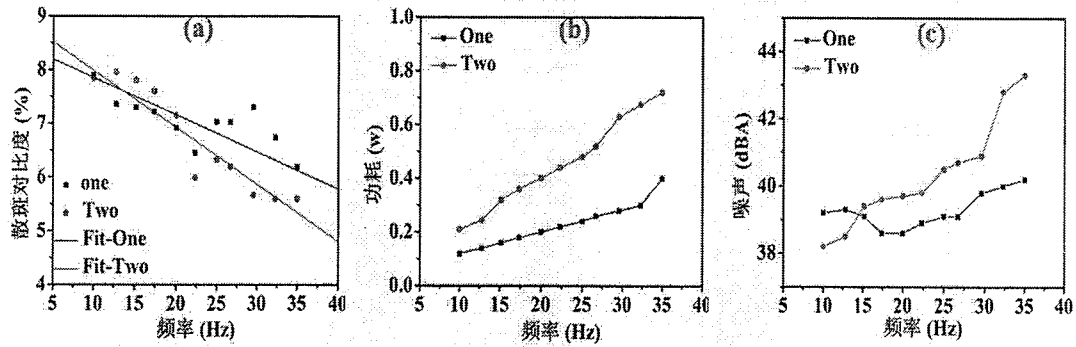


图 6.5 (a) 框架振动频率对散斑的影响; (b) 一维框架振动和二维框架振动的功耗随频率的变化; (c) 一维框架振动和二维框架振动噪声随频率的变化

Fig. 6.5 (a) the influence of frame vibrating frequency on speckle contrast, (b) the power consumption of one-dimension and two-dimension as a function of frequency, (c) the noise produced by one-dimension and two-dimension as a function of frequency

6.2.3 贴片电机振动

贴片电机平行于屏幕做逆时针正弦转动, 电机粘于屏幕背面, 位置间隔为 50cm, 安装方式如图 6.6(e)所示。图 6.6(a)描述了单个振动电机和六个振动电机振幕时, 振幕频率对散斑的影响。相比于上述两种振动方式, 电机方式的屏幕起振频率较高(110 Hz), 随着振幕频率的增加, 散斑对比度增加, 这是由于随着振幕频率的增加, 屏幕振动幅值减小, 导致人眼积分时间内形成的独立散斑图样数目变少, 影响了散斑的消除。图 6.6(b)描述了振动电机数目对散斑的影响, 贴片电机振动组合分别为②、①⑥、①③④⑥、①③④⑤⑥和①②③④⑤⑥, 随着振动电机数目的增加, 最低散斑对比度由 6.89%降为 4.97%, 也即散斑消除。从图 6.6(c)和图 6.6(d)的功耗和噪声曲线可以看出, 在六个电机同时振动, 散斑对比度达到 4.97%时, 电机的功耗为 1.51W, 系统噪声为 43.1dB。

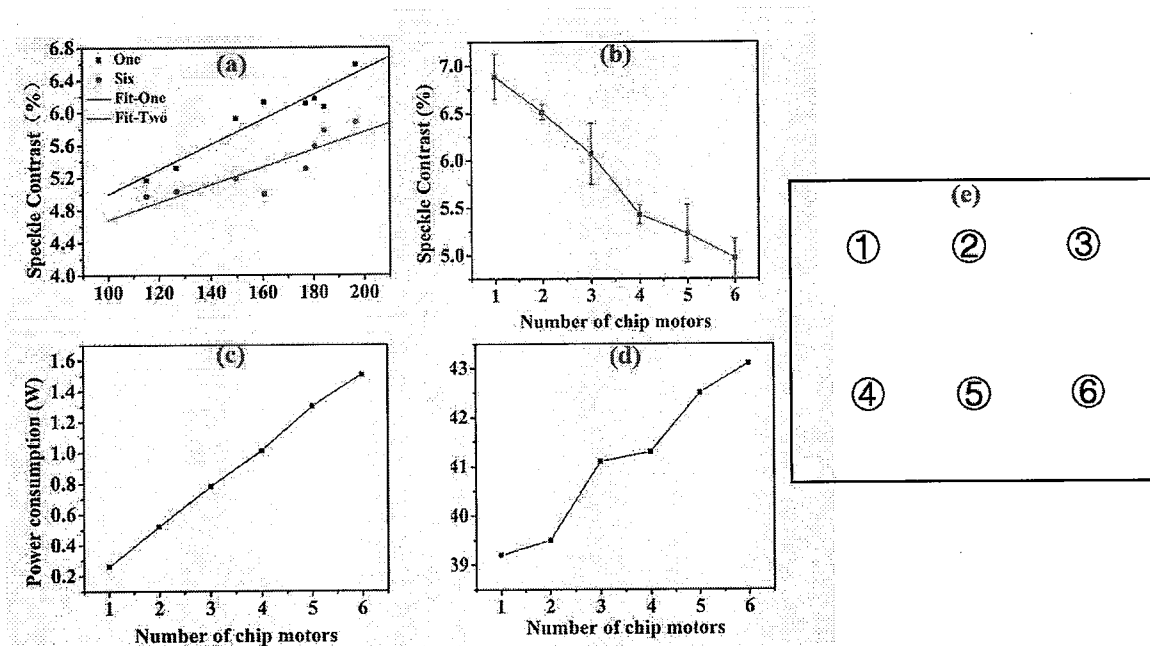


图 6.6 (a)贴片电机振动频率对散斑的影响, (b)贴片电机振动数目对散斑的影响, (c)贴片电机振动的功耗, (d)贴片电机振动的噪声

Fig. 6.6 (a)the influence of patch motor frequency on speckle contrast, (b)the influence of the number of patch motors on speckle contrast, (c)the power consumption of patch motor, (d)the noise produced by chip motors

表 6.1 三种振幕方法对比

Table 6.1 Comparison between three methods of vabriting screen

	Acoustic wave vabration	Frame Vibration	chip motor Vibration
Speckle Contrast (%)	4.90	5.60	4.97
Power Consumption (W)	30.1	0.85	1.51
Noise (dB)	48.6	43.3	43.1

表 6.1 对比了三种振动幕方法散斑最小时的散斑对比度、功耗和噪声。其中声波振动和贴片电机振动达到散斑消除时的散斑对比度分别为 4.90%、4.97%，框架振动达到的最小散斑对比度为 5.60%，对应的功耗分别为 30.1W、1.51W 和 0.85W；产生的噪声分别为 48.6dB、43.1dB 和 43.3dB。综合对比，贴片电机振动方法不仅能消除散斑，而且功耗低和噪音小，更适合用于激光显示中的散斑消

除。

6.3 本章小结

本文研究了声波振动、框架振动和贴片电机振动，三种振幕方式的消散斑效果，详情如下：

1. 搭建了一套自动采集、处理散斑图像的实验装置，设计了三种振动屏幕消除散斑的方法，也即声波振动屏幕、框架振动屏幕、贴片电机振动屏幕，同时搭建了屏幕振动频率实时测量以及系统噪音测量装置。该散斑测试系统测得的散斑对比度 $<5\%$ 时，人眼看不到散斑。

2. 研究了三种不同振幕方式下，振幕频率、幅度与散斑消除效果的关系，并测试了三种方式的振源功耗和系统噪音，结果显示，贴片电机振动屏幕消除散斑的方法，不仅能够将散斑完全消除（ 4.97% ），且具有功耗低（ 1.51W ）、噪音小（ 43.1dB ）的特点。

第7章 总结

由于激光具有方向性强、单色性好和亮度高等三个基本特性,激光显示技术可实现大色域、双高清(几何、颜色)的视频图像显示,是唯一能够实现 BT2020 超高清电视标准的显示技术。同时,激光显示产品的功耗小,寿命长,采用反射式成像,与自然万物反射光成像进入人眼原理相同,观看舒适度好,具有护眼功能。

由于激光固有的相干属性,采用激光作为照明光源投影图像时,激光光束经过粗糙表面散射进入人眼,产生散斑。散斑导致图像的强度灰度重新分布,隐藏了图像的细节信息,干扰人眼提取图像信息,影响了人眼的主观视觉感受。

本论文围绕激光散斑问题,重点研究了模拟人眼的散斑测量、散斑评价以及散斑消除等亟待解决的关键问题,论文主要内容如下:

1. 介绍了激光显示和激光散斑的研究现状。
2. 介绍了散斑的产生机理、表现形式、研究历史、散斑的分类和散斑尺寸,并在对散斑影响因素的分析基础之上,对散斑抑制方法进行了分类。
3. 介绍了人眼的生理学结构和分辨能力,分析了人眼的成像过程,推导了人眼光学传递函数;结合散斑的影响因素和人眼生物学特征,首次搭建了一套与人眼生物学特征高度匹配的散斑测量系统,并实现了系统的自动化设计,初步解决了现有散斑测量方法测试结果与人眼主观感知不一致的问题;测试了 EM-MSM 器件的性能,将其用于散斑抑制,使用搭建的模拟人眼散斑测量系统测量了其散斑抑制的效果。
4. 研究了对评价散斑产生干扰的非均匀背景光噪声和 DMD 周期噪声,并设计了噪声消除方法,得到了消除噪声的散斑图像;从入射光平均强度等六个方面对散斑的影响角度,对比分析了结构偏离度和散斑对比度两种方法评价散斑的能力,结果显示,二者在散斑评价上有相近的性能;首次提出了散斑影响度的散斑评价新方法,研究了散斑对比度、结构偏离度和散斑影响度三种方法评价散斑图像的性能,结果显示,散斑影响度能够更有效地表征人眼对散斑图像的感知,更适合作为模拟人眼主观视觉的散斑评价方法。
5. 介绍了 Ce:YAG 透明陶瓷材料的制备工艺,分析了陶瓷的结构特性,并

测量了陶瓷的光学特性；研究了 Ce:YAG 透明陶瓷在蓝光激发下，不同掺 Ce 浓度、不同厚度、不同温度的陶瓷样品的发光特性，结果显示，样品最高可产生 2690lm 的黄色荧光，光谱半高全宽可达 100nm；研究了将 Ce:YAG 陶瓷样品发射的荧光与绿色激光按不同比例混合时的消散斑效果，表明陶瓷样品荧光可以应用于激光显示中，有效的消除散斑。

6. 搭建了一套自动采集、处理散斑图像的实验装置，设计了三种振动屏幕消除散斑的方法，也即声波振动屏幕、框架振动屏幕、贴片电机振动屏幕；研究了三种不同振幕方式下，振幕频率、幅度与散斑消除效果的关系，并测试了三种方式的振源功耗和系统噪音，结果显示，贴片电机振动屏幕消除散斑的方法，不仅能够将散斑对比度降低至人眼分辨阈值之下，且具有功耗低、噪音小的特点，是一种用于散斑消除的理想方式。

本论文完成了一套完整的模拟人眼的散斑测量、评价和消除的解决方案，提供了较为准确的散斑测量方法和量化评价方法，散斑评价结果与人眼的主观感受一致，为散斑问题的解决以及激光显示行业的发展奠定了良好的基础。

然而，关于模拟人眼的散斑测量、评价和消除，仍然存在许多待解决的问题：

1. 模拟人眼的散斑测量系统，需要进一步提高其与人眼的匹配程度，比如能模拟人眼瞳孔大小的自适应功能，提高 CCD 相机的动态范围等等。

2. 模拟人眼的散斑评价方法需进一步在多个实验平台，多台激光整机进一步验证，使新的评价方法具有普适性。

3. 基于模拟人眼的散斑测量和评价的研究结果，需要制作一台模拟人眼的散斑测量和评价的嵌入式设备样机，以提高测试评价系统的便捷性和实用性。

4. 关于 Ce:YAG 透明陶瓷，下一步工作是，加入 RGB 三种激光器与 Ce:YAG 陶瓷荧光混合，优化光路设计，加入 PWM 信号调制，研究激光显示整机中的陶瓷荧光消散斑方案。

5. 关于贴片电机振幕消散斑方法，在激光影院巨幕厅的升级改造中，安装贴片电机的工作量大，人工成本高，下一步工作是从屏幕入手，研究新型简便、低成本的散斑解决方案。

6. 论文中仅对单色散斑进行了探究，而实际上，激光显示整机采用 RGB 三基色激光照明，因此，后续工作需对彩色散斑的原理、人眼感知彩色的视觉特点以及彩色散斑测量、消除和评价进行深入详细的研究。

第8章 博士期间的其他工作

博士期间,除了关于激光散斑的研究工作,还参与了《国家高端智库——新型显示产业发展报告》的撰写工作,主要负责了电子纸显示和三维显示两部分内容的研讨和写作。主要阐述了这两种新型显示技术的原理、历史与现状、优缺点、发展方向和发展建议。

8.1 电子纸显示

1. 原理

电子纸(E-paper)显示,又称为数码纸显示,是电场驱动带电材料(电子墨水,或胆固醇液晶)实现双稳态,通过反射环境光达到的类纸型显示技术[133, 134]。

2. 历史与现状

电子纸显示技术主要有三种:电泳、液晶、电润湿[135]。其中电泳黑白显示技术已实现了产业化,彩色显示正在开发。

(1) 黑白电子纸显示:1975年,美国施乐(Xerox)公司率先制成电子墨水材料;1996年,麻省理工学院确立电泳式的微胶囊电子墨水技术;2004年,SONY公司推出了首款采用电子墨水技术的电子书;2007年,亚马逊(Amazon)推出了基于6英寸电子墨水(E-ink)显示屏的第一代(Kindle)电子书[136];

(2) 彩色电子纸显示:2001年,E-Ink公司与Toppan Printing公司合作,宣布利用Toppan的滤镜技术,生产彩色电子纸;2002年3月的东京国际书展上,出现了第一个彩色电子书籍;2007年,日本推出轻型可弯曲彩色电子纸,色彩数可达4096色;2015年,国内华南师范大学陈国富研究团队合成了色谱广泛、性能优良的彩色油墨材料。

基于电子墨水的电子纸材料与制作工艺已较为成熟,在电子书(如Kindle阅读器)、广告牌、电子价签等领域已形成一定规模市场[137]。2018年,全球电子纸显示屏应用产品产值达到31.07亿美元,其中,台湾元太科技(E-Ink)占据了全球电子纸市场95%;国内电子纸显示行业起步较晚,现已初具批量供货能力,但电子墨水、基板等核心材料仍被国外控制。

胆固醇液晶显示对比度较差,面板抗压性低;电湿润显示技术尚未成熟,因

此这两种电子纸显示技术产业化尚不可预期。彩色显示尚在开发中。

3. 优缺点

优点:结构简单,超低功耗,价廉;环境光反射式显示,作为文字显示,观看舒适度高,可避免视觉疲劳;信息存储量大等。

缺点:对比度低(16:1)、分辨率较低(150ppi-300ppi),灰阶低,尚不能显示精细图画和彩色图画;响应时间慢(50-100ms)[138-140],尚不能显示动态图像等。

4. 发展方向

(1) 电子纸显示在人眼健康(类纸显示)、超低功耗、低成本等方面有显著优势,有可能成为类纸显示产品的主市场。

(2) 探索快速响应和彩色显示技术[141, 142]

5. 建议

发展电泳电子纸产业在电子书、广告牌、电子价签等领域的应用市场,包括材料、元器件等的创新开拓。

8.2 三维显示

1. 原理

三维(3-Dimension, 3D)显示,也称立体显示,主要分为四类:

双目视差三维显示技术,根据双目视差原理,外界物体的光从两个不同角度分别进入人的两只眼睛并且经过大脑复杂处理得以实现[143, 144]。

集成成像三维显示技术,是利用透镜阵列获取和显示立体图像的一种三维显示技术[145-147]。

体三维显示,利用视觉残留(1/24s)原理,光学元器件的高速运动和高频光投影等技术产生的立体显示[148]。

全息真三维显示,再现物波信息的波长、振幅和相位,可完整再现三维场景[149, 150]。

2. 历史与现状

(1) 双目视差三维显示 1838年,惠斯通发明了世界上第一个立体眼镜;1900年,F. E. Ives发明了分色式的3D图像技术;2002年夏普公司研制出光栅式三维显示器。

目前,国内外 3D 技术以双目视差立体显示技术为主,(如游戏、电视、电影行业)。由于视觉疲劳、观看舒适度差等问题难以发展大众消费市场[151, 152],处于市场发展的没落期。

(2) 集成成像三维显示 1908 年, Lippmann 提出了集成摄影术的概念; 1997 年, NHK 公司采用数码相机和微透镜阵列对 3D 场景记录; 2004 年, J.H.Park 等人发明了可切换的 2D/3D 集成成像显示技术。

目前, 集成成像 3D 显示理论较为成熟, 但是实现商业化仍需攻关多种技术难点, 包括分辨率、视场角、深度范围等。

(3) 体三维显示 1996 年, Downing E A 等人研发出静态体三维显示技术; 2001 年, 美国 Actuality Systems 公司发明了动态扫描体三维显示技术。

目前, 体三维显示技术研究尚处于原理性探索或实验演示阶段。

(4) 真三维显示 1948 年, Gabor 提出了全息术的概念; 1962 年, 雷斯等人发明了离轴全息技术; 1969 年, 本顿发明了彩虹全息术; 20 世纪 60 年代末, 古德曼等人提出了数字全息技术。

目前为止, 精细的数字化记录和再现成为全息立体显示的主要研究方向。

3. 优缺点

优点: 3D 显示能够实现三维视觉效果。全息真三维显示和体显示能够再现物波的波长、振幅和相位, 实现真三维显示。等等。

缺点: 视差 3D 真实感差, 舒适度很低, 易诱发眩晕等身体不适, 可视距离和可视角受限, 分辨率低, 存在串扰问题; 集成成像三维显示分辨率、视场角、深度范围受制约; 体显示和全息三维显示信息带宽大, 尚存宽带压缩等信息处理问题等。

4. 发展方向

(1) 3D 显示技术不断地向立体感更强, 观看限制更少更接近自然显示的方向发展, 全息真三维显示技术将成为未来产业的主要方向, 在视频显示军事、导航、生物医疗、教育、社交网络和娱乐游戏等领域中具有广泛的市场。

(2) 由于面临空间调制器件空间带宽积小、信息图巨大的计算量、海量数据存储、技术上散斑抑制以及数据传输等大量核心关键技术的制约, 全息真三维显示技术还处于技术研发阶段, 市场化尚需长的时间。

5. 建议

- (1) 不发展双目视差和集成成像三维显示产品。双目视差三维显示产品舒适度很差，并易诱发眩晕等身体不适。
- (2) 继续开展全息真三维显示技术和体三维显示技术的探索研究，特别是大带宽问题和记录/再现问题。