

中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

博士学位论文



Y3508420



论文题目 激光显示系统关键技术研究

作者姓名 李根

学科专业 光学工程

导师姓名 许祖彦 教授 许立新 副教授

完成时间 二〇一八年五月

Y3508420

中国科学技术大学
博士学位论文



激光显示系统关键技术研究

作者姓名：李根
学科专业：光学工程
导师姓名：许祖彦 教授 许立新 副教授
完成时间：二〇一八年五月八日

University of Science and Technology of China
A dissertation for doctor's degree



**Research of the key technologies
in laser display system**

Author's Name: Gen Li
Speciality: Optical Engineering
Supervisor: Prof. Zuyan Xu Prof. Lixin Xu
Finished time: May 8, 2018

中国科学技术大学学位论文原创性声明

本人声明所提交的学位论文,是本人在导师指导下进行研究工作所取得的成果。除已特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含任何他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中作了明确的说明。

作者签名: 李根

签字日期: 2018.5.25

中国科学技术大学学位论文授权使用声明

作为申请学位的条件之一,学位论文著作权拥有者授权中国科学技术大学拥有学位论文的部分使用权,即:学校有权按有关规定向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅,可以将学位论文编入《中国学位论文全文数据库》等有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。本人提交的电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。

保密的学位论文在解密后也遵守此规定。

公开 保密(____年)

作者签名: 李根

导师签名: 许立群

签字日期: 2018.5.25

签字日期: 2018.5.25

摘 要

激光显示是继数字显示之后的第四代显示技术,它以红绿蓝三基色激光作为光源,具有大色域、高亮度和超高清等突出特点,具有广阔的市场前景,也是近年来的研究热点。本文基于激光显示系统,对散斑抑制技术、投影屏幕散斑特性、光源谱宽优化等方面进行了深入的研究与创新的设计,获得的成果对激光显示整体设计有着重要的指导意义。

本文的研究工作主要包括:

1. 针对单片式 DLP 激光投影系统,提出了一套基于偏心球透镜的新型散斑抑制系统。通过使用光学设计软件对系统进行模拟仿真,发现整个消散斑和匀光系统具有很高的光学效率与照明均匀性。基于上述的设计方案,搭建了基于偏心球镜散斑抑制系统的激光投影样机,并进行照度测试和散斑测试。测试结果表明,通过加入这套高度集成化的散斑抑制装置,能够得到照度均匀性 90%以上,光光效率达到 95 lm/W,散斑对比度低于 3%的激光投影画面,这说明我们设计的新颖散斑抑制系统具有很高的实用价值。

2. 从理论入手,对漫散射屏幕的散斑特性进行了分析和测量,研究投影屏幕散斑对比度与表面形貌之间的关系。实验中利用精密的探针式表面轮廓仪对 17 种投影屏幕的表面起伏高度与表面三维形貌进行测量,并对白塑幕、玻珠幕、金属幕等三种不同类型的投影屏幕进行分析,发现所测量屏幕的表面起伏高度标准差均大于照明光波长尺度,且不同类型屏幕的表面形貌有着很大的差别。利用模拟人眼视觉的散斑测试平台,对 17 种屏幕的散斑对比度进行测量,发现除了玻珠幕以外,其它 13 种屏幕的散斑对比度都与理论预测较为相符,因此对于普通的投影屏幕我们可以使用它的表面起伏高度对其散斑对比度进行估计。另外,对玻珠幕和金属幕的增益及散斑对比度参数分析表明,玻珠幕更适合作为激光投影显示中的屏幕使用。

3. 基于色度学及视觉心理物理学原理,针对高饱和度颜色设计了新的颜色阈值实验,对激光显示光源谱宽进行了优化。实验中利用激光显示系统对两个高饱和度颜色进行显示和对比,并且根据阈值实验中的界定法和恒定刺激法确定了人眼能分辨的颜色阈值。进一步地,利用激光显示系统,对中心波长为 520nm,谱宽为 0.1nm-50nm 的一系列光源颜色进行了重现,并测得当中心波长为 520nm 时,颜色分辨阈值对应的光谱宽度为 10nm 左右。因此,在激光显示系统的设计中,使用 10nm 谱宽的 520nm 绿光光源能够兼顾高颜色饱和度与低散斑对比度两个方面,是更优化的选择。

本论文的主要创新点包括：

1. 本文设计了一套基于偏心球透镜的新型散斑抑制系统，并基于这套系统搭建了单片式 DLP 激光投影显示样机，得到了照度均匀性 90%以上，光光效率达到 95 lm/W，散斑对比度低于 3%的激光投影画面，表面我们的设计方案具有很高的实用价值。
2. 本文对激光投影显示屏幕的表面形貌和散斑特性进行了研究，通过测量和分析得到了屏幕散斑对比度与表面起伏高度标准差之间的量化关系，这有助于激光投影显示屏幕的优化选择与设计。
3. 本文设计了针对高饱和度颜色的颜色阈值实验，得到了特定波长下的最优化光源光谱宽度，这对激光显示的光源设计有着重要的指导意义。

关键词：激光显示，散斑抑制系统，屏幕散斑特性，颜色阈值，光谱宽度

ABSTRACT

Laser display, which uses red, green and blue laser as the three primary light source, is the fourth generation display technology after digital display. It has outstanding characteristics such as large color gamut, high brightness and ultra-high definition. Due to its broad market prospects, it becomes a hot research in recent years. Based on the laser display system, this paper conducts in-depth research and innovative design on speckle suppression technology, speckle characteristics of the projection screen, and spectral width optimization of the light source. This research has important guiding significance for the design of the laser display.

The research work of this article mainly includes:

1. A new speckle suppression system based on eccentric ball lens is proposed for the monolithic DLP laser projection system. By using optical design software to simulate the system, it was found that the entire speckle suppression and uniform light system has high optical efficiency and illumination uniformity. Based on the above design scheme, a laser projection prototype based on an eccentric spherical speckle suppression system was built, and the illuminance test and speckle test were performed. The test results show that by using this highly integrated speckle suppression device, it is possible to obtain a laser projection with an illuminance uniformity of 90% or more, an optical/optical efficiency of 95 lm/W, and a speckle contrast ratio of less than 3%. This indicates that the new speckle suppression system we designed has a high practical value.

2. Based on the theory, the speckle characteristics of the diffuse scattering screen were analyzed and measured, and the relationship between speckle contrast and surface topography of the projection screen was studied. In the experiment, the surface height and surface topography of 17 kinds of projection screens were measured using a sophisticated probe surface profiler, and three different types of projection screens such as white-plastic screens, bead screens, and metal screens were analyzed. It is found that the standard deviation of surface undulations of the measured screens is larger than the wavelength scale of the illumination light, and the surface topography of different types of screens is highly different. Using a speckle test platform that simulates human eye vision, the speckle contrast of 17 screens was measured. It was found that speckle contrasts of 13 screens were consistent with theoretical predictions, except bead screens.

Therefore, for ordinary projection screens, we can use its surface undulation height to estimate its speckle contrast. In addition, the analysis of the gain and speckle contrast parameters of the bead screen and metal screen shows that the bead screen is more suitable for laser projection display.

3. Based on the principle of colorimetry and visual psychophysics, a new color threshold experiment was designed for high saturation colors, and the spectral width of the laser display light source was optimized. In the experiment, two high saturation colors were displayed and compared using a laser display system, and the color threshold was measured according to the definition method and the constant stimulus method. Further, using a laser display system, a series of light source colors having a center wavelength of 520 nm and a spectrum width of 0.1 nm to 50 nm are reproduced for the color threshold experiment. The experiment shows that, the color threshold corresponds to a spectrum width of about 10 nm when the center wavelength is 520 nm. Therefore, in the design of the laser display system, the use of a 10 nm spectral width of the 520 nm green light source can achieve both high color saturation and low speckle contrast, which makes it a more optimal choice.

The main innovations of this paper include:

1. This article designed a new speckle suppression system based on eccentric ball lens. Based on this system, we build a monolithic DLP laser projection display prototype, with more than 90% illumination uniformity, optical/optical efficiency of 95 lm/ W, and speckle contrast less than 3%, which indicates our design has a high practical value.
2. The surface topography and speckle characteristics of the laser projection display screen are studied. The quantitative relationship between the speckle contrast of the screen and the standard deviation of surface undulations is obtained through measurement and analysis. This helps to optimize the selection and design of laser projection display screen
3. The color threshold experiment for high saturation color is designed, and the optimized spectrum width of the light source at a specific wavelength is obtained. This has important guiding significance for the design of laser display light source.

Key Words: laser display, speckle suppression system, speckle characteristics of screens, color threshold, spectral width

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 激光显示技术的发展历程及研究进展	2
§ 1.2 激光显示技术的优点	3
§ 1.3 激光显示技术中仍需解决的问题	6
§ 1.3.1 激光光源与耦合	6
§ 1.3.2 激光散斑	7
§ 1.3.3 色彩的还原与校正	11
§ 1.4 本文的主要内容	13
参考文献	14
第二章 激光投影显示新型散斑抑制系统设计	17
§ 2.1 激光散斑的基本理论	17
§ 2.1.1 激光散斑的成因及分类	17
§ 2.1.2 散斑的统计性质与散斑对比度	18
§ 2.2 激光投影显示中的散斑抑制技术	21
§ 2.2.1 激光投影显示的基本结构与工作原理	21
§ 2.2.2 针对激光投影显示的散斑抑制方案	29
§ 2.3 基于旋转偏心球镜的新型散斑抑制系统	30
§ 2.3.1 系统的结构与工作原理	30
§ 2.3.2 系统的散斑抑制机制分析	31
§ 2.4 偏心球透镜散斑抑制系统的具体实现及测试结果	37
§ 2.5 本章小结	44
参考文献	45
第三章 激光投影显示屏幕的散斑特性研究	47
§ 3.1 投影显示屏幕	47
§ 3.1.1 投影屏幕的分类与重要参数	47
§ 3.1.2 前投影屏幕简介	49
§ 3.2 激光散斑与散射体间的关系	51
§ 3.2.1 面散射中散斑的性质	51
§ 3.2.2 体散射中散斑的性质	55
§ 3.3 投影显示屏幕的表面特性测量	56

§ 3.3.1 测量对象与测量仪器	56
§ 3.3.2 测量结果与分析	58
§ 3.4 投影显示屏幕的散斑特性测量	62
§ 3.4.1 模拟人眼视觉的散斑测量平台	62
§ 3.4.2 散斑对比度测量结果与分析	64
§ 3.5 本章小结	66
参考文献	67
第四章 基于激光显示颜色阈值实验的光源谱宽优化	69
§ 4.1 颜色科学的基本概念	69
§ 4.1.1 视觉生理基础	69
§ 4.1.2 视觉心理物理实验	72
§ 4.1.3 颜色匹配实验与三刺激值	73
§ 4.1.4 CIE 1931 标准色度系统	75
§ 4.1.5 人眼的颜色分辨能力	77
§ 4.1.6 显示系统中的颜色重现	79
4.2 基于激光显示系统的人眼高饱和度颜色阈值研究	81
§ 4.2.1 基于激光显示系统的人眼色觉分辨力测试	81
§ 4.2.2 基于光谱宽度变化的颜色阈值测试	83
4.3 本章小结	86
参考文献	87
第五章 总结与展望	89
§ 5.1 全文总结	89
§ 5.2 研究展望	90
攻读博士学位期间的主要工作	91
致谢	93

第一章 绪论

显示技术作为人类获得图像信息的基本手段，一直随着社会科技的进步不断发展。从最早的显像管（CRT）显示开始，到如今广泛应用的液晶显示、再到新型的量子点显示和激光显示，显示技术的发展始终向着画面更大、分辨更清晰、色彩更丰富的方向前进[1]。显示器的大小由原来的几英寸、十几英寸，到现在的几十上百英寸的大屏幕显示；屏幕的分辨率由早期 PAL 制的 720*576, 到现在的 1920*1080 和更高的 4K 显示；画面色彩从黑白到简单上色，再到现在的全彩色、真彩色。显示技术随着光电子技术、信息技术的不断成熟，已经发展到新一代的数字显示技术，也使得显示产业成为了当今的主流产业。但是，即使是现在应用最广泛的液晶显示技术，也仍然在色彩的重现能力方面有所缺陷。目前常用的显示方式仅能重现人眼所能观察到总色彩的 33%，而有大量的颜色是无法展现出来的。因此，在未来的显示技术发展中，对色彩的高还原度显示将是主要的研究方向[2]。

显示技术中能还原颜色的数量一般用覆盖色域的大小来衡量。而显示色域的大小主要与光源的光谱宽度相关。由于现今普遍使用的光源都是宽谱光源，单色性不好，因此难以达到很大的色域覆盖范围。而激光光源天生具有极窄的光谱宽度，使用激光作为光源的显示技术能够令色域覆盖范围轻易达到普通显示技术的两倍以上，如图 1-1 所示[3]。因此，作为大色域显示技术的代表，激光显示技术将是未来显示技术发展的重要方向。

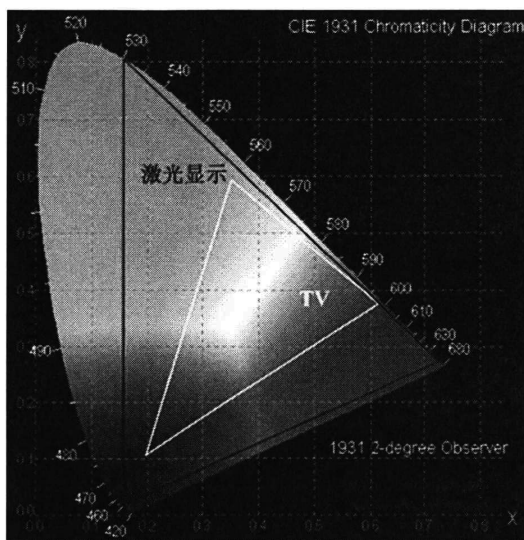


图 1-1 激光显示——大色域显示技术

§ 1.1 激光显示技术的发展历程及研究进展

激光器是上个世纪 60 年代被发明出来的,从那时候开始,激光显示技术就进入了发展的轨道[4]。在早期,激光器的种类很少,大部分是气体激光器,因此只能用它们作为光源开发激光显示技术[5]。利用激光具有良好方向性的特点,许多公司开发了扫描式激光显示。在 1960-1970 年间,美国 Texas 公司、美国通用电话电子公司、日本日立公司分别提出了各自的 525 行扫描激光显示技术[6]。但由于气体激光器体积庞大、能耗很高、容易损坏,不适合作为显示光源使用,因此激光显示的发展受到了限制,难以大规模推广。直到上世纪 80 年代末,激光光源技术,由于是全固态激光技术和大功率半导体激光技术得到了很大的发展[7],使得激光显示技术突破了光源落后的限制,开始逐渐走向商业化、产业化道路。而激光投影显示技术作为代表,更是进入了快速发展期。

对激光显示专利的分析表明[8],从 2001 年开始由于全固态激光技术的突破,激光显示技术开始高速发展,到 2008 年到达顶峰。自从 2010 年以来,激光显示技术进入成熟期,开始有大量商业化激光投影产品涌现。2012 年第一季度,明基率先推出了一款基于激光光源技术的商教投影机,该机器配备了业界领先的蓝核光引擎技术。日本三菱电机在 2013 年 4 月发布了系列混合光源投影机,采用了独立的蓝色与绿色激光光源。日本松下公司也推出了多款混合型激光投影机,并于 2013 年 8 月推出全球第一款高清混合型激光投影机。日本索尼公司 2013 年 4 月北京国际视听集成设备与技术展 (InfoComm China 2013) 上新发布 3LCD 激光投影机,此款激光投影机为世界上第一台 3LCD 激光投影机,纯激光光源,亮度可以达到 4000 流明,分辨率达到 1920×1200,成为业内同类产品中最亮的激光投影仪。它的工作寿命最高可长达 20000 小时以上。受益于小型化三基色激光器的发展,微型激光投影系统也出现了新产品。美国 Microvision 公司推出了手持微型激光投影机[9],其整体体积非常小;上海三鑫发布了面向市场的移动激光投影机,在仅手机大小重量 196 克的机身中革命性地实现了亮度 20-50 流明、15 至 100 英寸、分辨率 800×600 的高清投影。而影院级别的激光投影是一个重要的发展方向,主要是追求高亮度显示。2012 年中比利时巴可 (Barco) 推出 55000 流明的激光光源的原型机,随后 NEC 发布了 50000 流明的激光影院工程机,最后在 2012 年下半年美国科视推出 72000 流明亮度的激光电影原型机[10]。

值得一提的是,我国在激光显示技术领域已经处于世界先进水平,所拥有的激光显示方面的公开专利数量为全球第四[8]。在激光显示的很多领域,中国都走在了前面。2002 年,中科院在国内首次实现了全固态激光显示;2005 年成功研制 140 寸激光背投样机,如图 1-2 所示。2006 年通过了中科院和信息产业部联合主持的成果鉴定,其中 140 寸的激光投影样机使用了新研制的全固态激光光

源，使得投影输出光功率达到 23W，色域覆盖率达到 79%，超过世界上的同类研究水平[6]。2016 年，中国科学技术大学成功研制了“高亮度大色域的三基色全半导体激光投影机”，并通过了安徽省科技成果鉴定。其主要性能指标达到：光通量 6400 流明，色域 149.7% NTSC，散斑对比度 2.25%，光光效率 108 流明/瓦，分辨率 1920*1080。这个成果的整机技术达到国际先进，散斑抑制与光光效率达到国际领先。可见，激光显示技术在我国有着坚实的研究基础与良好的发展前景。

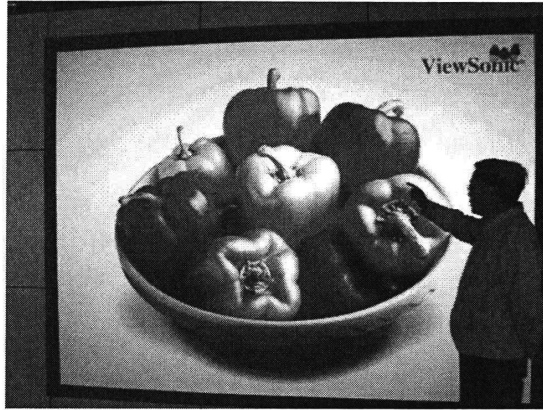


图 1-2 中科院研制的 140 寸大屏幕背投激光投影样机



图 1-3 中国科学技术大学研制的三基色全半导体激光投影机

§ 1.2 激光显示技术的优点

作为继数字显示之后第四代大色域显示技术的代表，激光显示技术具有几个无可比拟的显著优点：窄光谱激光光源带来的高饱和度、大色域显示；光源良好

的方向性带来的高亮度显示；以及相比传统光源的长寿命时间[11]。下面我们将对这几个优点进行说明：

1. 高饱和度、大色域

由于激光显示使用激光器作为光源，因此天生具有高单色性的特点。而由色度学知识我们知道，单色性越好的光源，其色饱和度越高，人眼能观察到更鲜艳的色彩[12]。如图 1-4，将传统光源的光谱与三基色激光器的光谱进行对比[13]，我们可以看到，传统的显示光源如荧光灯管、投影汞灯灯泡等，普遍的光谱宽度在 40nm 以上，单色性非常差，而三基色激光器的光谱均能够达到 5nm 以下。因此在显示效果方面，激光光源能够实现数倍于传统光源的饱和度提升，最终得到色彩更为鲜艳的画面。如图 1-5 所示，激光投影电视相比于高压汞灯（UHP）投影电视的画面有着质的飞跃[14]。

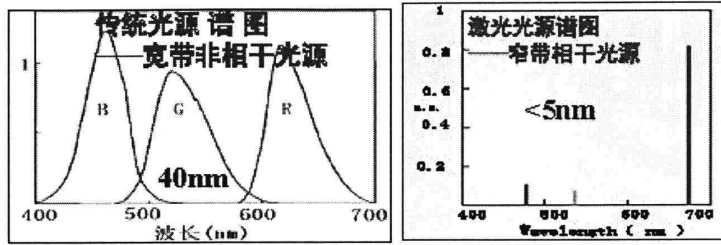


图 1-4 传统光源与激光显示光源光谱的比较

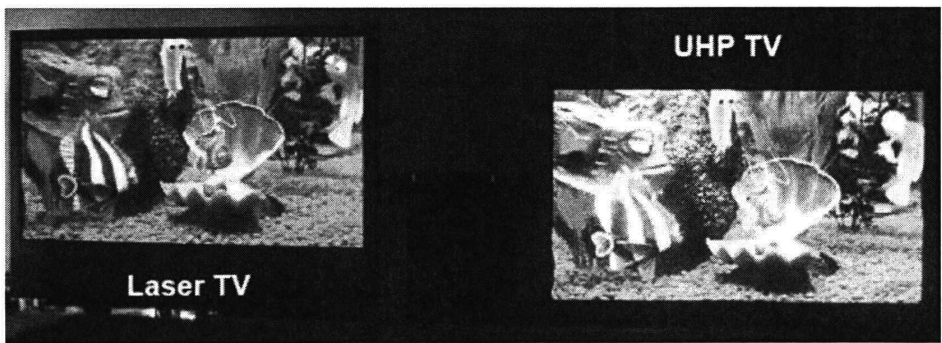


图 1-5 激光投影电视与高压汞灯（UHP）投影电视画面效果对比

激光的高单色性不仅带来了高饱和度画面，而且极大的扩展了显示的色域覆盖范围。如图 1-6 所示[15]，马蹄形曲线内包含了人眼所能察觉的所有色彩，而色域三角形的覆盖面积越大则表明能够显示的颜色数量越多。可以看到，激光显示的色域三角形面积不仅数倍于老式的 CRT 显示色域，而且相比最新的 LCD、LED 显示技术同样更为优秀。大色域的激光显示技术减少了显示色彩还原中的颜色“盲区”，能够更加真实地重现自然界中五彩缤纷的色彩。

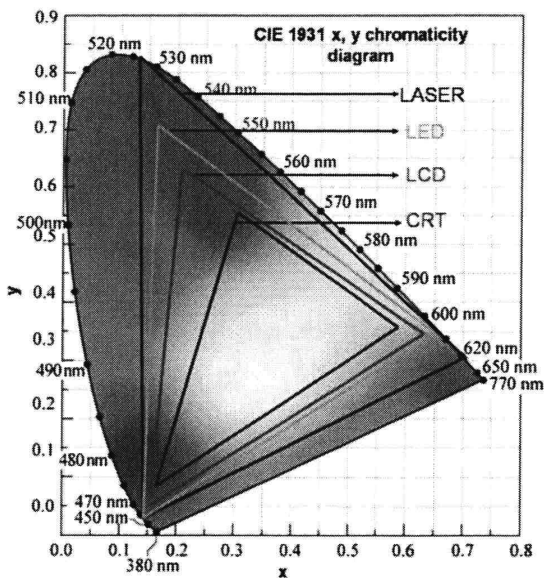


图 1-6 激光显示色域与其他显示方式色域对比

2. 高亮度

由于激光源于受激辐射发光，本身具有很好的方向性。相比其他光源，激光器的发散角很小，因此能量能够轻易地集中到所需的区域[16]。另外，激光器的能量利用率很高，其中激光二极管的电光转换效率可以高达 30% 以上[17]。再者，激光的光谱都集中在可见光波段，不存在人眼不可见的红外和紫外光。激光光源以上的优点使得在激光显示系统中光源的光损耗和热损耗非常小，与传统光源相比在相同的能耗下能够达到更高的亮度。

高亮度显示的意义是，在大屏幕显示的条件下满足亮度需求。人眼的视野中存在着清晰视场和余光视场。清晰视场是指视场中央的区域，其范围大概是纵向 20 度，横向 35 度，也就是人眼视线集中的区域；在这个区域以外纵向 60 度，横向 120 度的范围，人眼不能清晰成像，被称为人眼的余光视场[18]。余光视场虽然在视野中并不清晰，但仍然极大地影响着人们对显示画面的“真实感”。在影院级别的应用中，大屏幕常常是一个重要指标。例如在最新的 IMAX 影院中，为了使得画面充满余光视场，一般使用 22 米宽、16 米高的超大屏幕[19]。这种屏幕要求投影机的亮度达到 50000 流明以上，才能有比较好的观影感受。因此，高亮度的激光投影显示技术在进行大屏幕显示时有着更为良好的发展前景。

3. 长寿命时间

对于显示系统而言，最核心的部件是光源部分，因此光源的寿命影响着显示系统的整体寿命。一些传统的光源在使用时常常受到工作寿命的限制。以传统的

高压汞灯（UHP）投影系统为例，传统投影机的灯泡寿命在高亮度应用时寿命只能达到 500-800 小时，因此常常在使用一段时间后，随着灯泡亮度衰减、色饱和度和对比度降低等原因而使图像变暗变黄。而激光投影显示系统所使用的是激光二极管光源，其寿命可达 10000-20000 小时以上[20]，其衰退过程也是缓慢的。长寿命激光光源带来的成本降低使其在商业化市场上更加具有竞争优势。

§ 1.3 激光显示技术中仍需解决的问题

激光显示技术尽管已经经历了长时间的发展，并且在近 20 年迎来了高速发展期，目前正在走向市场化的前期，但在目前的阶段仍然有着不少急需解决的科学与技术问题。其中，以激光光源与耦合、激光散斑、色彩还原与校正等几个方面最为突出。下面将结合实例进行详细的介绍。

§ 1.3.1 激光光源与耦合

由于激光光源是激光显示的核心器件，因此激光显示的发展进程与激光器息息相关。从最早期的气体激光器光源，到后来的固态激光器光源，激光显示技术得到了长足的进步。但是，这两种光源仍然没有解决体积、能耗及成本的问题，难以进一步推动激光显示的发展。随着光电子技术领域取得的突破，新型的激光器逐渐向小型、高效、低成本的方向发展，也推动着激光显示的进一步成熟。其中，边发射激光二极管（LD）、垂直腔面发射激光器（VCSEL）[21]、二极管泵浦固态激光器[22]和光泵浦半导体激光器[23]是激光显示系统中最为常见的光源，而目前应用最广泛，产品最成熟的是 LD 光源。

经过几十年的研究改进，激光二极管技术已经逐渐迈向成熟并走向市场。只要选择合适的半导体材料，激光二极管只需通电就能高效率地发光，十分适合于激光显示系统中。一般而言，蓝光波段的激光二极管基于 GaInN 或 GaN 材料，红光波段的激光二极管基于 AlGaInP 或 GaAs 材料[24]。这两个波段的激光二极管已经开发了很长时间，产品稳定性很高，已经实现大规模量产。而绿光激光二极管一般基于 InGaN 材料[25]，在研究早期一直存在技术上的难点，使得它没有与红光和蓝光激光二极管在同一时间大规模应用。主要问题有两个：第一是当红移激光器的波长到大于 500nm 范围时，InGaN 材料中的量子点效率会显著地降低；第二是在激光器工作时的发热导致腔内波导结构被破坏，引起了光学参量失配。上述两点都会造成绿光激光二极管的发光效率过低，不能正常使用[26][27]。但这些技术难点在近年来都得到了突破。日亚（Nichia）公司已经研制成功了新型的绿光激光二极管产品并投放市场，并有望迅速实现大规模量产。

但是,使用激光二极管作为激光显示系统的光源会面临一个问题:激光器单管功率不足。由于目前市面上较大功率的红光激光二极管单管功率只有 3.5W,蓝光只有 1.5W,绿光只有 1W,因此,对于一般的激光显示系统而言,只使用三个单管三基色激光器并不足以令最终的显示亮度满足实际需求。通常的解决方法是用一定数量的激光二极管组成阵列光源。这就涉及到激光器阵列的耦合与整形问题。以激光投影系统为例,由于光源输出的激光都需要均匀地照明到空间光调制器上,因此多个激光器输出的光束必须合束成为一束均匀白光,才能使得最终的投影画面不会出现局部偏色、发暗等现象。一般的激光合束方法有光纤合束[28]、棱镜合束[29]和透镜阵列等[30]。通过选择最佳的激光阵列耦合方式,能提高整体的光学效率,并更加合理地利用空间,利于开发更高效更小型化的激光显示系统。

§ 1.3.2 激光散斑

在以激光为光源的应用中,由于激光具有很高的时间和空间相干性,会出现激光散斑的现象。当高相关性的光源照射到物体表面时,由于表面对光波长而言是粗糙的,因此这种粗糙的随机起伏会带来光相位的随机涨落,最终形成一种无序的颗粒状斑点图样[31]。在某些应用中,散斑现象能作为计量的手段[32]。但是在显示应用中,激光散斑图样会影响人们对图像信息的获取,是一种有害的图像噪声,如图 1-7 (a) 所示。为了消除激光散斑对显示效果的影响,必须将散斑抑制到人眼的可分辨阈值以下。研究表明,必须将衡量散斑大小的散斑对比度降低到 4% 以下才能达到要求[33]。消除散斑后的显示效果如图 1-7 (b) 所示。对激光显示散斑抑制方法的研究一直是这个领域的热点方向,下面将对几种典型方法作详细的介绍。

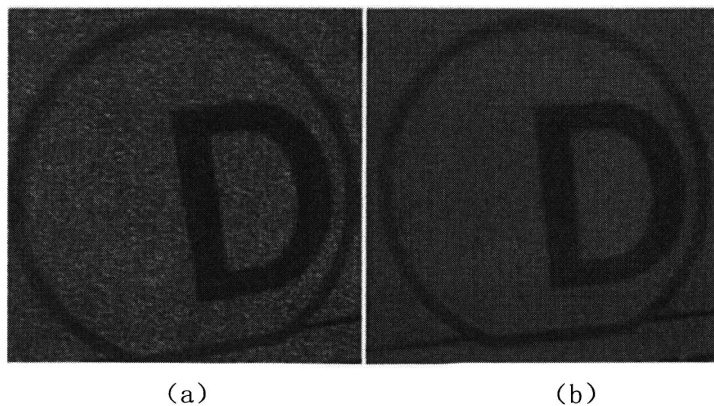


图 1-7 (a) 带有激光散斑的显示画面 (b) 消除激光散斑后的显示画面

1. 减弱光源的时间相干性

光源的时间相干性与其光谱宽度有关。光谱宽度越窄，则光源的相干长度越长，时间相干性也越强。由于激光是受激辐射发光，光谱宽度一般很窄，因此带来了很强的时间相干性。如果采用合适的方法对激光的光谱进行展宽，就能够在一定程度上减弱其时间相干性，达到抑制散斑的效果。

一种光谱展宽的方法是利用交变电流对激光二极管的中心波长进行快速调制，从而在整体上展宽光源的光谱[14]。如图 1-8 (a) 所示，由于激光二极管的中心波长与其工作电流相关，因此在对激光二极管施加经过高频调制的驱动电流时，其中心波长会随着调制电流快速改变。在一个积分时间内，相当于形成了一个光谱展宽的光源。利用这种方法，激光二极管的光谱宽度能从 0.17nm 被展宽到 2nm，如图 1-8 (b) 所示。

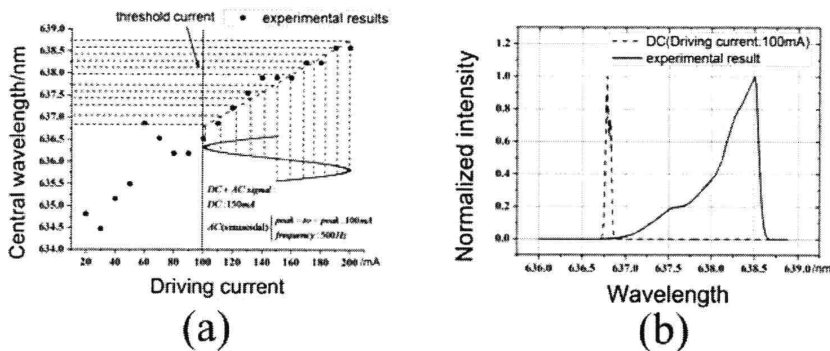


图 1-8 (a) 工作电流变化使得激光器中心波长改变 (b) 电流高频调制导致光谱展宽

另外一种常见的方法是对激光器进行宽带倍频操作，得到宽光谱的绿光光源。例如，通过使用多块倍频晶体级联的方式，并合理控制各个晶体的厚度及温度，能够提高总体的倍频带宽和倍频效率，从而获得宽光谱的倍频绿光[34]。如图 1-9 所示，利用两块和三块倍频晶体的级联，可以将倍频绿光的光谱拓宽一倍左右。另外，还有通过使用特殊设计的级联极化铌酸锂晶体 (TPLN)，得到 6.5nm 的宽

谱绿光的报道[35]。

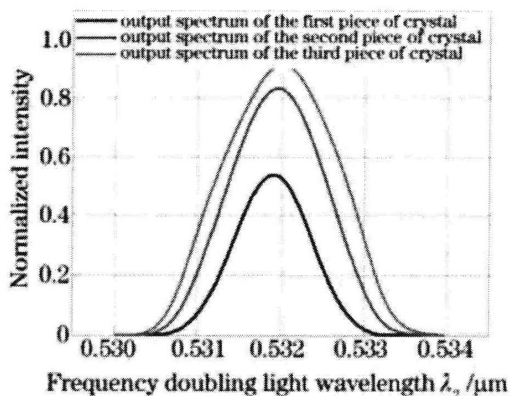


图 1-9 级联晶体的倍频光谱

2. 减弱光源的空间相干性

通过减弱光源的空间相干性同样可以抑制散斑对比度。由于两个空间上相互分开的光源形成两幅非相干的散斑图样后，会产生散斑的强度叠加，使得散斑对比度降低，因此能够通过增加非相干光源的数目来降低整体的空间相干性来抑制散斑。通常的方式是使用一个包含多个激光器的阵列式光源。在经过设计后，不同激光器产生的散斑图样是互不相关的，假设总共有 M 个光源，那根据理论计算，散斑对比度会降低到 $1/\sqrt{M}$ [36]。另外可以通过在不同光源间引入相位延迟，使得它们成为非相干光源组。例如，如果将多个具有不同相位延迟的光源通过光纤耦合到一起，就能构成一个空间相干性很低的新光源，从而减弱散斑。这种光源的机构如图 1-10 所示。

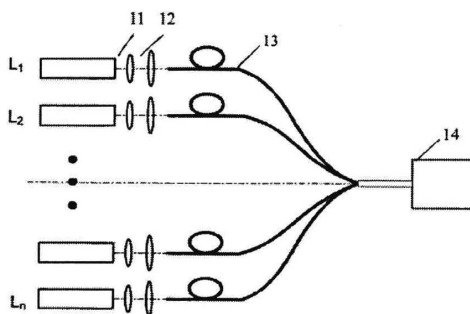


图 1-10 引入相位延迟减弱光源空间相干性

也有研究人员提出一种新型的低空间相干性光源——随机激光。随机激光是指在共振腔内引入随机散射介质的新型激光器，其原理如图 1-11 所示[37]。

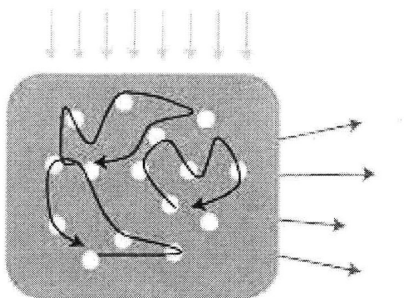


图 1-11 随机激光的原理

由于在激光器腔内引入了随机散射介质，激光在腔内会产生多次随机散射，因此出射光的相位是混乱而无序的。这最终表现为随机激光具有很低的空间相干性。利用随机激光器作为激光显示的照明光源，能够在很大程度上消除散斑现象的影响[37][38]。如图 1-12 所示，随机激光生成的图像相比于普通宽带激光光源，散斑现象基本已经不可分辨。因此，随机激光是作为激光显示的理想光源。但目前还没有出现商用化的随机激光器产品，有待进一步研究开发。

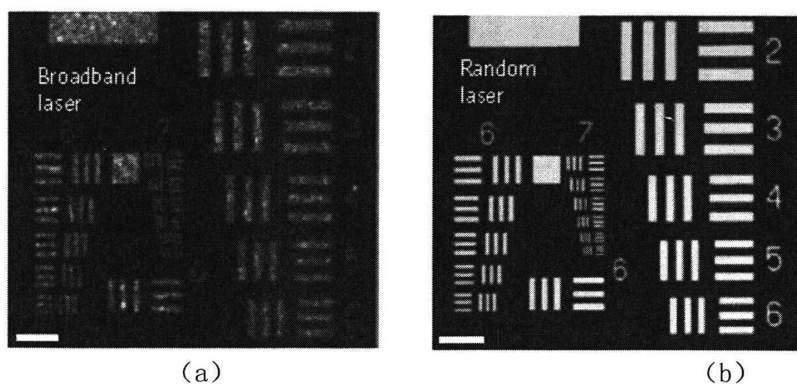


图 1-12 (a) 使用宽带激光光源生成的图像 (b) 使用随机激光光源生成的图像

3. 引入动态元件

当我们在激光显示光路中的一些元件引入平动、转动或振动等动态过程时，就会使散斑出现类似的运动。如果运动的幅度足够大，就能够在人眼积分时间内产生多幅非相关散斑图样，它们的相互积分叠加能够抑制散斑对比度[36]。这种方法的具体例子有很多，比如在光路中加入胶体散射介质[39]、铁电振动单元[40]等元件。如图 1-13 所示，还能在光路中引入旋转的积分方棒[41]。或者可以通过振动投影屏幕的方式抑制散斑[42]。以上的散斑抑制方案由于思路简单，便于实施，有的已经被广泛运动。但是，对某些元件（如积分方棒和屏幕）加入运动

驱动装置会大大提高系统的复杂度，引起整个系统的损耗增加，因此需要更加优化的设计方案。

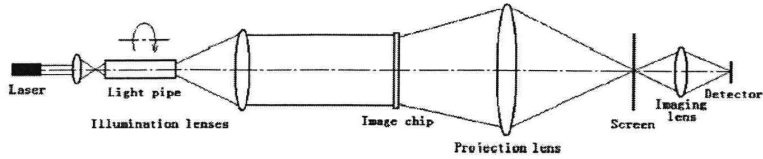


图 1-13 使用转动光通进行散斑抑制的方案

可见，对激光散斑现象进行抑制的方案是多种多样的。值得注意的是，在进行具体的激光显示系统设计时，单使用一种散斑抑制方案常常不能满足需求。我们希望在尽可能减少系统复杂度的前提下，引入多样化的散斑抑制机制，从而将散斑抑制到人眼阈值以下。我们将在第二章对此进行详细讨论。

§ 1.3.3 色彩的还原与校正

在利用显示系统还原真实世界的图景时，我们希望能还原出更丰富、更真实的颜色。由于激光显示是大色域显示，能还原人眼所有感知颜色的 70% 以上[6]，因此激光显示色彩十分丰富，在还原高饱和度的场景时也会更加真实。但是，显示实际上是一个信号还原的最终手段，而信号还需要先经过采集和处理两个阶段才能达到显示设备中[43]。在这个过程中，图像颜色信号的采集设备（照相机、摄像机）、处理设备（计算机）和显示设备（电视机、投影仪等）都具有自身的色域系统。因此，单单使用大色域的激光显示设备并不能保证颜色的真实还原，还需要各个设备间的色域匹配[44]，否则就会引起颜色的失真。如图 1-14 所示，当计算机输出画面信号的色域与激光显示色域不匹配时，就会造成画面某些颜色过于饱和，影响观影感受。

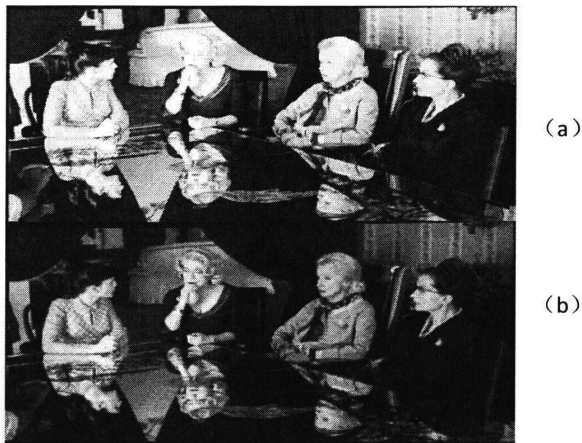


图 1-14 同样小色域信号输入下，(a) 激光投影仪的输出画面

(b) 普通投影仪的输出画面

解决激光显示色域匹配问题的方法包括两个方面。一个方面是，令图像信号的采集设备、处理设备和显示设备都采用同样的大色域系统。这样一来，图像颜色信息在整个还原过程中都不会产生失真和畸变，激光显示系统就能够对其进行直接显示。为此，需要规定一种大色域的图像标准，以便统一各个设备之间色域。国际电信联盟无线电通信部门（ITU-R）在 2014 年提出的 Rec. 2020 超高清广播系统与节目源制作国际标准就是一种支持大色域显示的图像标准。如图 1-16 所示，Rec. 2020 标准与之前的 Rec. 709 标准相比，使用了更加接近激光显示的大色域三角形。如果拍摄设备和图像处理设备都参照这个标准进行校准，就能够减少激光显示中的颜色偏差，实现更真实的色彩还原。

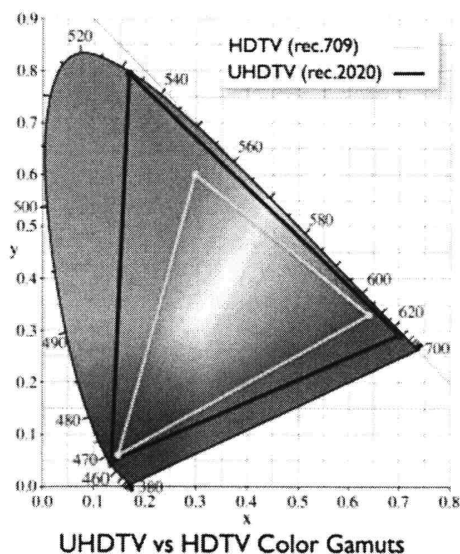


图 1-15 Rec. 709 标准与 Rec. 2020 标准的色域三角形对比

另一方面，如果需要将一个已经拍摄好的小色域图像信号在一个大色域显示设备中播放，就必须先进行色彩的校正，否则就会出现图 1-14 所示的颜色失真现象。常用的色彩校正方法是进行色域映射，也就是通过特殊设计的算法，将小色域中的颜色坐标映射到大色域中去，并尽量使映射前后的颜色信息保持不失真。色域映射的算法包括模糊逻辑算法[46]、多元线性回归算法[47]、神经网络算法[48]等。由于这类算法通常设计大量的数据计算，仅使用软件进行处理影响画面的显示速度，因此可以通过专门的色彩管理芯片来实现色域映射的功能[49]。另外，为了保证色域映射的校正过程中，人眼始终能获得真实的颜色信息，需要进

行相应的视觉心理物理实验来保证色域映射的准确性[50]。

综上所述，在激光显示中，激光光源与耦合、激光散斑、色彩的校正与还原三个问题必须加以解决，否则便会阻碍激光显示技术的进一步发展。针对这些问题，我们在本文中会进行详细的讨论研究，具体的工作内容将在下一小节中进行介绍。

§ 1.4 本文的主要内容

激光显示技术被称为第四代新型显示技术，具有十分广阔的市场前景。随着光电子技术的不断进步，激光显示在近年来得到了极大的发展，并逐渐走向成熟。然而，一些关键性的技术难题仍阻碍着激光显示的实用化进程。本文针对激光显示技术中仍存在的科学与技术问题，进行了一系列的研究与设计。

本论文开展的主要工作有：

第一章：对激光显示技术的发展历程进行了回顾，并对激光显示技术目前的研究进展进行了介绍。总结了激光显示技术的优点，对大色域、高亮度、长寿命时间等突出优点进行了详细说明。另外，特别指出激光显示技术仍存在激光光源与耦合、激光散斑、色彩的校正与还原等方面的问题，并对这些问题的具体解决方案进行了分析说明。

第二章：本章我们详细介绍了激光散斑的基本原理，并由激光投影显示的基本结构与原理开始，介绍了激光投影显示中的散斑抑制技术。针对单片式 DLP 激光投影系统，我们设计并开发了一套基于偏心球透镜的新型散斑抑制系统，通过偏心的转动球透镜装置，能够实现高效率的匀光照明以及良好的散斑抑制效果。利用这套系统搭建的激光显示样机，具有集成化、高光效、低散斑对比度等特点。

第三章：本章我们对投影显示屏幕进行了详细的介绍，并从散斑的理论出发，得到了漫散射面的散斑对比度与表面起伏程度之间的关系。在分别对投影屏幕的表面形貌与散斑对比度进行了一系列的测量与分析之后，我们发现实际的测量结果一定程度上与理论符合。因此在理论的指导下，我们能够更合理地选择适合激光投影显示系统的投影屏幕。

第四章：本章我们从颜色科学的基本概念着手，着重介绍了基本的色度学原理和视觉心理物理学原理。在理论的指导下，我们设计了基于激光投影显示平台的人眼高饱和度颜色分辨力实验。利用设计好的实验方法，我们进行了基于光谱宽度变化的颜色阈值测试实验，得到了颜色阈值对应的光谱宽度值。这些结果对于激光显示系统的最佳光源谱宽选择非常有意义。

参考文献

- [1] 王天及, 杨世宁, 李耀裳. 2004. 现代显示技术的进展[J]. 光电子技术与信息. 17(4):1-7.
- [2] 毕勇. 2009. 激光全色显示技术[J]. 新材料产业. 4:61-65.
- [3] 刘伟奇, 魏忠伦, 康玉思, 等. 2004. 全固态激光彩色视频显示技术[J]. 液晶与显示. 18(5): 325-328.
- [4] Charles E. Baker. 1968. Laser display technology [J]. IEEE Spectrum. 5(12): 39-50.
- [5] A. Korpel, R. Adler, P. Desmares, et al. 1966. A television display using acoustic deflection and modulation of coherent light[J]. Appl. Opt. 5:1667-1675.
- [6] 许祖彦. 2006. 激光显示—新一代显示技术[J]. 激光与红外. 36: 737-741.
- [7] 许祖彦. 1999. 光电晶体与全固态激光器及其应用[J]. 中国工程科学, 1(2):72 - 77.
- [8] 柴燕, 毕勇, 颜博霞, 等. 2011. 全球激光显示技术专利分布格局与态势分析[J]. 26(3): 329-333.
- [9] Jason Tauscher, Wyatt O. Davis, Dean Brown, et al. 2010. Evolution of MEMS scanning mirrors for laser projection in compact consumer electronics[C]. Proc. SPIE 7594: MOEMS and Miniaturized Systems IX.
- [10] CHRISTIE Corp. 2012. Laser Illumination Technology[EB/OL]. <http://www.christiedigital.co.uk/emea/display-technology/laser-projection/pages/default.aspx>
- [11] Guang Zheng, B. Wang, T. Fang, et al. 2008. Laser Digital Cinema Projector[J]. J. of Display Tech. 4(3): 314-318.
- [12] 胡威捷, 唐顺青, 朱正芳. 2007. 现代颜色技术原理及应用[M]. 北京理工大学出版社.
- [13] A. Neumann, J. J. Wierer, W. Davis, et al. 2011. Four-color laser white illuminant demonstrating high color-rendering quality[J]. Opt. Express. 19(S4):982-990.
- [14] 崔哲. 2015. 激光显示中关键科学技术问题的研究. [D:[博士]]. 合肥: 中国科学技术大学.
- [15] Chellappan K V, Erden E, Urey H. 2010. Laser-based displays: a review[J]. Applied optics, 49(25): F79-F98.
- [16] 吴强. 2006. 光学 [M]. 科学出版社.
- [17] Kazuo Kuroda. 2013. Laser display technologies: light sources and systems[C]. 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim(CLEO-PR).
- [18] 李景镇. 2010. 光学手册[M]. 陕西科学技术出版社.
- [19] Alter L. 1995-11-28. Theater design: U.S. Patent 5,469,669[P].
- [20] 苏美开, 高稚允, 左昉, 等. 2004. 激光二极管寿命测试方法研究[J]. 激光与红外, (2):124-127.

- [21] H. Soda, K.-I. Iga, C. Kitahara, and Y. Suematsu. 1979. "GaInAsP/InP surface emitting injection lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.* 18, 2329–2330.
- [22] Nebel A, Wallenstein R E. 2000. Concepts and performance of solid state RGB laser sources for large-frame laser projection displays[J]. *SPIE*. 3954: 163-166.
- [23] Lutgen S, Albercht T, Brick P, et al. 2003. 8W high-efficiency continuous-wave semiconductor disk laser at 1000 nm[J]. *Appl. Phys. Lett.* 82: 3620-3622.
- [24] Y. Suematsu and K. Iga. 2008. "Semiconductor lasers in photonics," *J. Lightwave Technol.* 26, 1132–1144.
- [25] Takao Nakamura. 2013. Recent Progress of Green Laser Diodes[C]. 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim(CLEO-PR).
- [26] Stephan Lutgen, Dimitri Dini, Ines Pietzonka, et al. 2011. Recent results of blue and green InGaN laser diodes for laser projection[C]. *Proc. SPIE 7953: Novel In-Plane Semiconductor Lasers X*.
- [27] Uwe S, Thomas Hager, Georg B, et al. 2014. Recent advances in c-plane GaN visible lasers[C]. *Proc. SPIE 8986: Gallium Nitride Materials and Devices IX*.
- [28] K. Du, M. Baumann, B. Ehlers, H. G. Treusch, and P. Loosen. 1997. "Fiber-coupling technique with micro step-mirrors for highpower diode laser bars," in *Advanced Solid State Lasers*, C. Pollock and W. Bosenberg, eds. Optical Society of America, Vol. 10.
- [29] P. Y. Wang, A. Gheen, and Z. Wang. 2002. "Beam shaping technology for laser diode arrays," *Proc. SPIE 4770*, 131–135.
- [30] T. R. M. Sales. 2003. "Structured microlens arrays for beam shaping," *Opt. Eng.* 42, 3084–3085.
- [31] Costa G D, Ferrari J. 1997. Anisotropic speckle patterns in the light scattered by rough cylindrical surfaces[J]. *Appl. Opt.* 36: 5231-5237.
- [32] Erf R K. 1978. *Speckle metrology*[M]. New York: Academic Press.
- [33] Yun Mi Lee, Dong Uk Lee, Jong Myoung Park, et al. 2008. A study on the Relationships between Human Perception and the Physical Phenomenon of Speckle[J]. *SID symposium Digest of Technical Papers*. 39(1): 1347-1350.
- [34] 张新,张恒利,毛叶飞,桑思晗. 2016. 高效短脉冲宽带倍频绿光实现方法[J].*中国激光*, 43(02):19-25.
- [35] Yu N E, Choi J W, Kang H, et al. 2014. Speckle noise reduction on a laser projection display via a broadband green light source[J]. *Optics express*, 22(3): 3547-3556.
- [36] Goodman J W. 1976. Some fundamental properties of speckle[J]. *JOSA*, 66(11): 1145-1150.
- [37] Brandon Redding, Michael A. Choma, Hui Cao. 2012. Speckle-free laser imaging using

- random laser illumination[J]. *Nature Photonics*. 6: 355-359.
- [38] M. Nixon, B. Redding, A. A. Friesem, et al. 2013. Efficient method for controlling the spatial coherence of a laser[J]. *Opt. Lett.* 38(19): 3858-3861.
- [39] Riechert F, Bastian G, Lemmer U. 2009. Laser speckle reduction via colloidal-dispersion filled projection screens[J]. *Appl. Opt.* 48: 3742-3749.
- [40] Kompanets I N, Andreev A L, et al. 2010. Invited Paper: Speckle Suppression by Means of Ferroelectric LC Cell[C]. *SID Digest*: 1065-1068.
- [41] Mingjie Sun, Zukang Lu. 2010. Sepckle suppression with a rotating light pipe[J]. *Opt. Engineering*. 49(2): 024202.1-024202.6.
- [42] 张燕, 王新星, 李文峰. 2018-2-2. 一种接触式消相干系统: 中国, 201710966115X [P].
- [43] 魏忠伦. 2004. 基于激光显示的颜色复现的研究. [D:[硕士]]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所.
- [44] 张继艳. 2005. 激光显示颜色系统的建模与校正. [D:[硕士]]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所.
- [45] Peng Xia, Yuki Shimozato, Yasunori Ito, et al. 2011. Improvement of color reproduction in color digital holography by using spectral estimation technique[J]. *Appl. Opt.* 50(34): H177-H182.
- [46] 李清, 李东晖. 2014. 基于模糊逻辑的无损彩色图像压缩算法[J]. *计算机科学*. 41: 103-106.
- [47] 张岳, 郝丽, 柳华等. 2007. 基于多元回归方法的激光显示颜色校正[J]. *微计算机信息*. 23: 185-201.
- [48] 杨卫平, 彭兵, 余鸿飞等. 2000. 基于人工神经网络的彩色摄像系统颜色信号失真的校正方法[J]. *云南师范大学学报*. 20(1):22-26.
- [49] 王蔚生,刘红,那柏林. 2014. 激光显示色彩管理及其标准[J].*信息技术与标准化*, (5):24-28.
- [50] 鲍凌波. 2015. 激光投影显示的色域扩展研究[J]. *中国新通信*, (4):73-75.

第二章 激光投影显示新型散斑抑制系统设计

在激光投影显示中,由于采用了激光作为显示光源,其高相干性会带来一个无可避免的问题——激光散斑。激光散斑的出现会使得原本绚丽清晰的画面上出现不规则的“颗粒”,严重影响投影显示的画面质量。因此散斑问题是激光投影显示中必须解决的一个问题,激光显示中的散斑抑制也是一直以来的热点研究方向。在本章中,我们将研究设计一种新型的散斑抑制系统,以在实际应用中获得更好的显示效果。

§ 2.1 激光散斑的基本理论

近年来,对散斑现象的研究一直在持续进行,针对激光显示的消散斑技术也层出不穷。为了更好地了解激光散斑现象,进一步开发高效的散斑抑制技术,我们需要从基本理论出发,逐步深入探究。本节将从激光散斑的成因开始,详细介绍散斑的分类、散斑的统计性质、散斑对比度等等。

§ 2.1.1 激光散斑的成因及分类

当一个物体表面受到相干光束(例如激光)的照明时,容易看到反射光斑内出现许多对比度很高而且尺寸细微的颗粒状图样。这种现象后来被称为“散斑”[1][2],如图2-1所示。之所以出现这种散斑现象,是因为被照明的物体表面相对于光波长的尺度而言,是一种“随机”粗糙表面。而事实上,现实世界中多数材料以光波的尺度衡量,都属于这样的粗糙表面。一个粗糙的散射面上具有多种随机起伏的细小面积单元,它们对观察面的总光场提供了随机相位的基元,这些基元通过相互干涉影响了最后光场的强度,而强度的强弱则取决于随机的相位。

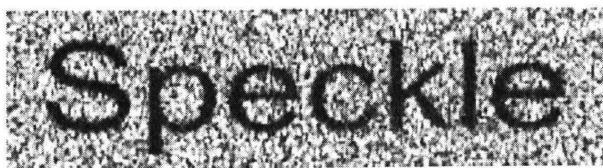


图 2-1 激光散斑图样

散斑现象在光学领域,尤其是相干光照明或成像领域是一种普遍现象,例如全息技术、光学相干层析技术、激光投影显示技术、光刻技术、光学雷达等。在

这些应用里,散斑现象带来的图像噪声会严重影响到人眼或仪器对于图像信息的获取。因此,必须通过引入散斑抑制技术,在图像中降低或消除散斑噪声,才能更有效地提取所需的图像信息。

散斑现象有很多不同的分类方式[3]。若按照光束的传播方式进行分类,可以分为近场散斑、远场散斑、像面散斑三种。若按照观察条件分类,可以分为客观散斑与主观散斑两种。客观散斑是经过自由空间传播后形成的散斑,如图 2-2 (a) 所示。而主观散斑是经过成像系统后在像面形成的散斑,如图 2-2 (b) 所示。一般而言,人眼观察到的散斑现象由于经过眼镜的晶状体、瞳孔、视网膜等成像系统,均属于主观散斑。

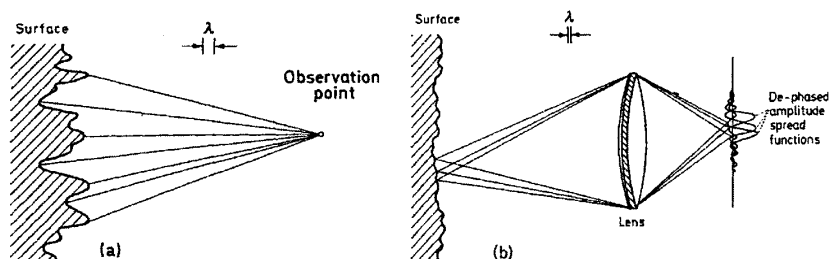


图 2-2 (a)自由空间中散斑的产生 (b)成像系统中散斑的产生

另外,若按照散斑的统计性质进行分类,可以分为高斯散斑和非高斯散斑两种。当观察面上某一点的散斑是由像面上大量散射基元提供随机相位的时候,散斑的性质在统计上满足中心极限定理,称为高斯散斑。而当散斑由少量散射基元提供随机相位时,不符合中心极限定理,称为非高斯散斑。非高斯散斑一般只会出现在特殊的情况下出现。在下面的文章中,若不做特别说明,均是对高斯散斑的讨论。

§ 2.1.2 散斑的统计性质与散斑对比度

当一个信号由大量相位独立的复分量相加而成时,信号就容易出现散斑现象[4]。这些分量在复平面中可能有随机的长度(振幅)或随机的方向(相位),或二者皆有。当这些随机分量相加时,就构成了所谓的“随机行走”,如图 2-3 所示。所得的和的大小,取决于各分量最终形成的是相长叠加还是相消叠加。而对于光信号而言,所得相加结果的长度(振幅)平方即是通常所观察到的光“强度”。

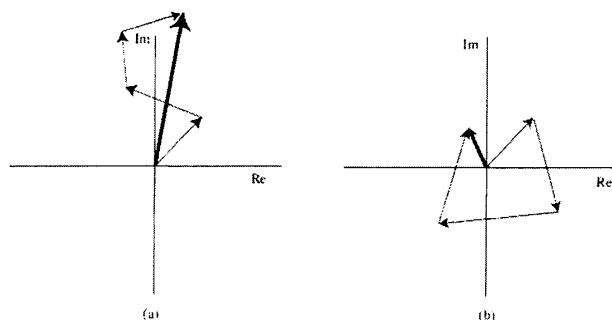


图 2-3 随机行走：(a)主要是相长叠加 (b)主要是相消叠加

一般而言，我们观察或测量得到的是光波的强度。但对于散斑统计性质的讨论，需要先从振幅着手。对一个复分量信号而言，可以定义为：

$$A_n = a_n e^{i\phi_n} \quad (2.1)$$

其中， a_n 指的是复分量的振幅， ϕ_n 是相位。而上面提到的“随机行走”，即复分量信号的叠加和，可以表示为：

$$A = a e^{i\phi} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_n e^{i\phi_n} \quad (2.3)$$

其中， A 是随机行走叠加信号的复振幅， N 是随机行走中复分量的数目， a 和 ϕ 分别是叠加信号的振幅和相位。对于大多数的随机行走，均满足以下三个假定：

1. 在不同的复分量之间，彼此的振幅和相位相互统计独立；
2. 对于任意的复分量，其振幅和相位之间相互统计独立；
3. 随机相位在 $(-\pi, \pi)$ 区间上均匀分布，即一切相位值是等可能的。

根据中心极限定理，随着 N 趋近于正无穷， N 个独立随机变量和的统计分量趋近于高斯分布。因此，叠加信号矢量实部与虚部的联合概率密度为：

$$P_{R,I}(R, I) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{R^2 + I^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.4)$$

利用实部与虚部的联合概率密度函数能够求出振幅与相位的联合概率密度为：

$$P_{a,\phi}(a, \phi) = \frac{a}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.5)$$

从而可以通过积分，分别得到信号振幅和相位的概率密度函数为：

$$P_a(a) = \int_{-\pi}^{\pi} P_{a,\phi}(a, \phi) d\phi = \frac{a}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.6)$$

$$P_\phi(\phi) = \int_0^{\infty} P_{a,\phi}(a, \phi) da = \frac{1}{2\pi} \quad (2.7)$$

式(2.6)的结果称之为瑞利(Rayleigh)密度函数。可以看到,公式(2.5)能够分解为 $P_a(a)$ 与 $P_\phi(\phi)$ 的乘积,这说明了叠加信号复振幅的振幅和相位是互相统计独立的随机变量。进一步地,由满足瑞利分布的振幅概率密度函数,我们能够得到强度的概率密度函数为:

$$P_I(I) = \frac{1}{2\sqrt{I}} P_a(\sqrt{I}) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{I}{2\sigma^2}\right) \quad (2.8)$$

(2.8)式的结果满足负指数分布。具有这种分布的散斑称为完全散射(fully developed)散斑。利用(2.8)式容易得到以下关系:

$$\sigma_I = \bar{I} \quad (2.9)$$

其中, σ_I 是强度的标准偏差, \bar{I} 是强度的平均值。一般而言,我们用散斑对比度来衡量散斑噪声的大小,其定义为:

$$C = \sigma_I / \bar{I} \quad (2.10)$$

因此,对于完全散射散斑而言,其散斑对比度为 $C=1$,表明这类噪声十分严重。

接下来,我们将讨论多幅完全散射散斑图样和的强度统计。由于散斑图样在振幅上的叠加不降低散斑的对比度,因此我们主要关注散斑图样在强度基础上的叠加,特别是非相干叠加。这是下一小节中将要讨论的各种散斑抑制手段的基础。

对于 N 幅不相关的散斑图样,其总强度表示为:

$$I_s = \sum_{n=1}^N I_n \quad (2.11)$$

显然,总强度的平均值为:

$$\bar{I}_s = \sum_{n=1}^N \bar{I}_n \quad (2.12)$$

其中, \bar{I}_n 是每一幅独立散斑图样自身的强度均值。总强度的二阶矩为:

$$\overline{I_s^2} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \overline{I_n I_m} = \sum_{n=1}^N \overline{I_n^2} + \sum_{n=1}^N \sum_{m \neq n}^N \overline{I_n I_m} \quad (2.13)$$

其中使用了上面提到的,当 $n \neq m$ 时, I_n 与 I_m 相互独立的假定。因为单个分量强度各自都服从负指数概率分布,也就是对于每一幅独立散斑图样,其强度满

足:

$$\overline{I_n^2} = 2\overline{I_n}^2 \quad (2.14)$$

将 (2.14) 式代入 (2.13) 式中, 我们可以得到总强度的方差为:

$$\sigma_s^2 = \sum_{n=1}^N \overline{I_n^2} \quad (2.15)$$

总强度的对比度表示为:

$$C = \frac{\sigma_s}{I_s} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N \overline{I_n^2}}}{\sum_{n=1}^N \overline{I_n}} \quad (2.16)$$

当各分量的平均强度 $\overline{I_n}$ 相等时, (2.16) 式简化为重要的表示式:

$$C = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (2.17)$$

由此我们可以得知, 当 N 幅独立的散斑图样进行强度叠加时, 如果各个分量散斑图样的平均光强相等, 叠加后的散斑对比度将与 $1/\sqrt{N}$ 成正比下降。基于这个结论, 在进行散斑抑制方案的设计时, 我们可以通过使独立散斑图样的数目 N 增大, 来降低图像的散斑对比度, 获得更好的图像效果。

§ 2.2 激光投影显示中的散斑抑制技术

在上一节中我们提到, 在激光投影显示领域, 由于激光光源具有高相干性, 如果不引入散斑抑制技术, 投影画面将出现大量散斑噪声, 损害最终的画面质量。散斑问题是激光显示在实用化、商业化道路上必须解决的一个重大问题, 对散斑抑制技术的研究也一直是激光显示领域的热点。在这一节中, 我们将由激光投影显示的基本结构与原理开始, 着重介绍激光投影显示中的各种散斑抑制技术。

§ 2.2.1 激光投影显示的基本结构与工作原理

对激光投影显示的了解能帮助我们研究更有针对性的高效散斑抑制技术。激光投影显示是使用激光器作为光源的投影显示技术, 一般分为两种工作方式: 扫描投影与整帧投影。下面将分别作详细介绍。

1. 扫描投影激光显示系统

扫描投影激光显示是利用激光的方向性极好的特点, 将激光光束通过偏转器件快速扫描, 从而在人眼的视觉暂留时间内得到二维图像。这种扫描投影显示系

统内部的核心部件是光束调制、扫描部件。由于用于扫描的激光光束亮度很高，方向性很好，因此可以在很小的距离下投影出大而亮的图像，非常适合用于便携式、小型化的显示系统[5]。图 2-4 所示的是一个常见的扫描投影激光显示系统：

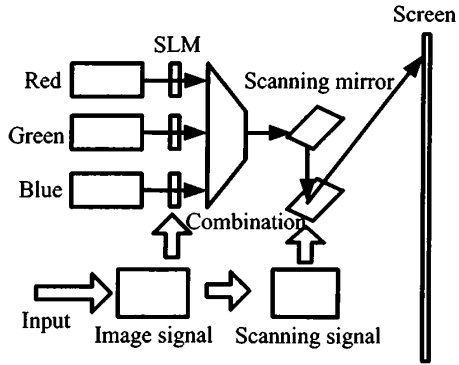


图 2-4 常见的扫描投影激光显示系统

扫描投影显示又分为逐点扫描和整行扫描两种方式，它们的区别是：逐点扫描是对一个单点光束进行二维扫描，而整行扫描是对一个线状光束进行一维扫描。逐点扫描可以靠双镜二维扫描系统实现，这种双镜系统的原理如图 2-5：

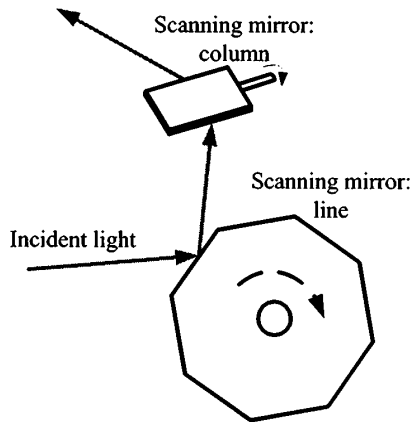


图 2-5 双镜二维扫描系统

而随着微机电（MEMS）系统的高速发展，目前已经出现二维扫描的 MEMS 系统，图 2-6 所示的是 MicroVision 公司推出的一种二维扫描 MEMS 系统：

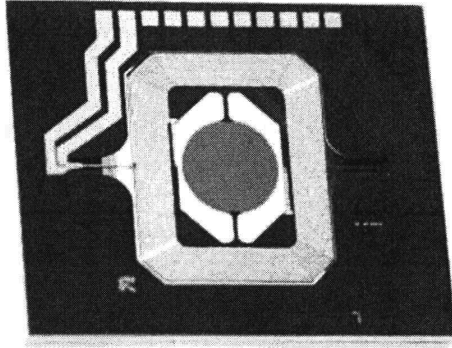


图 2-6 MicroVision 公司的二维扫描 MEMS 系统

相比二维转镜系统,这种二维扫描 MEMS 具有高精度、高系统集成度等优点。还有研究小组利用电光调制器或声光调制器实现了高速、高精度的二维扫描[6]。

而整行扫描是靠一维空间光调制器实现的。常见的是 Silicon Light Machines 公司开发的所谓光栅光阀 (grating light valve, GLV) [7]。它的显微结构如图 2-7 所示。这种器件可以将线状光束调制为整行的显示图案,再经过一个一维的偏转器件后,就能够生成整幅画面。整行扫描投影的原理如图 2-8 所示。

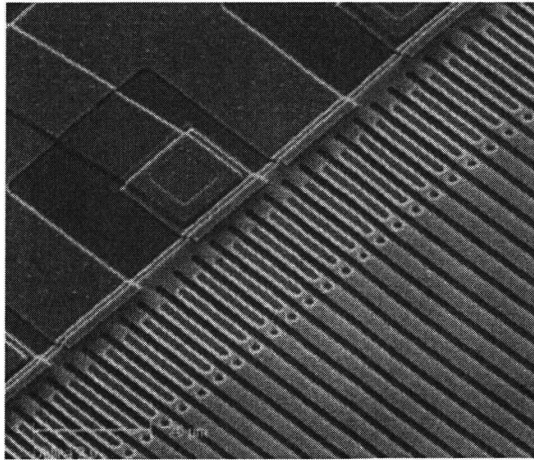
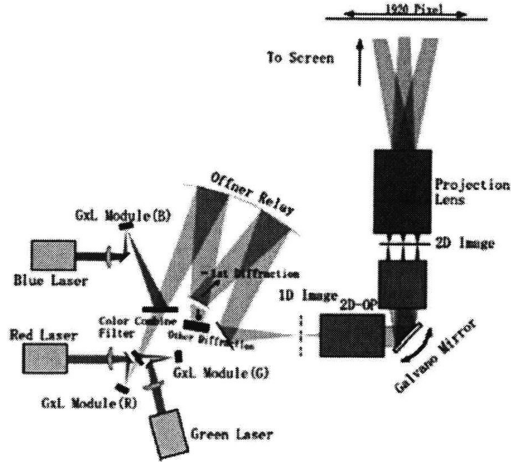


图 2-7 GLV 器件的显微结构

图 2-8 整行扫描显示的原理示意图^[8]

扫描投影显示尽管有着便于小型化、集成化的优点，但由于需要引入复杂的扫描转镜或振镜装置，增加了系统的机械不稳定性。而且为了提高投影图像分辨率，需要将光束汇聚到空间上的一点或一线，造成局部的光能量聚集，容易对直接观察者造成视力损害。因此在实用化与商业化的道路上，扫描投影激光显示系统并不是激光显示技术的主要发展方向。

2. 整帧投影激光显示系统

顾名思义，整帧投影显示是将某一帧画面通过光学系统投影成像到屏幕上的显示技术。由于整帧投影具有显示对人眼安全性高、机械结构少、关键器件技术成熟等优点，因此是目前主流的激光显示发展方向。整帧投影激光显示系统的原理结构如图 2-9 所示。

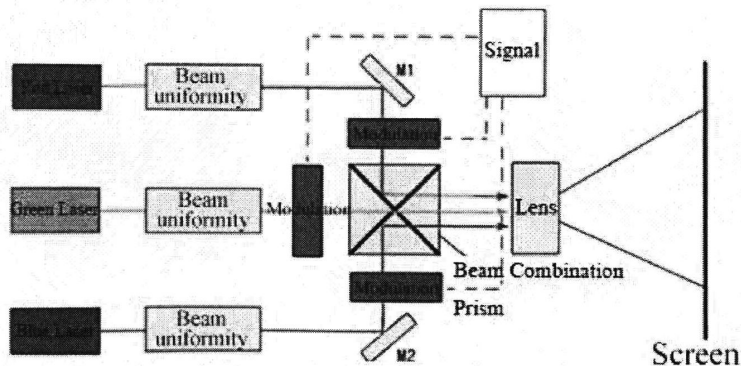


图 2-9 整帧投影激光显示系统原理结构图

如图 2-9 所示,对于整帧投影激光显示系统而言,关键的器件包括:三基色激光光源、光束整形匀光器件、空间光合束器件、二维空间光调制器件和投影成像系统等。其中,二维空间光调制器件是核心器件之一,影响着整个系统的设计,我们将对其着重介绍。

一般来说,目前主流的二维空间光调制器件分为三种:液晶器件(LCD)、硅基液晶器件(LCOS)和数字光处理器件(DLP)。其中 LCD 属于透射式调制器件,而 DLP 和 LCOS 都属于反射式调制器件。下面将详细介绍三种器件的工作原理。

LCD 器件是最早应用于显示的二维空间光调制器件,最早主要用作平板显示,后来随着市场的需要,产生了专门用于投影的 LCD 器件。在实际的显示器中,常见的 LCD 工作模式是 TN(扭曲向列, Twisted Nematic)模式,它的分子排列结构如图 2-10(a)所示,其中的液晶指向在上下表面间扭曲了 90° 。当无电压时,入射的偏振光随着液晶分子方向的旋转而旋转,恰好转过 90° 通过偏振片 P2,此时液晶透过率较高。如图 2-10(b)所示,当加电压时,液晶分子垂直于电场排列,偏振光透过后偏振方向不发生改变,因此不能通过偏振片 P2,液晶透过率较低。利用这个原理,可以很方便地对光强进行调制。

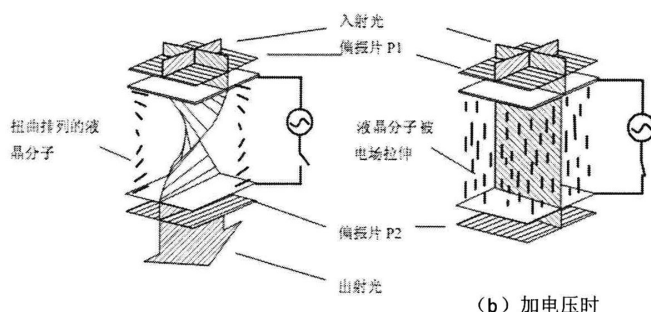


图 2-10 TN 液晶的工作原理

在这里, LCD 对光强的调制是与偏振相关的,光需要经过起偏器和检偏器。对于全偏振的普通光源而言,经过偏振片时会损失 50%的能量,造成光亮度的损耗。但是对于激光光源而言,由于激光容易生成高偏振纯度的光束,因此只要使得激光光束原本的偏振方向与起偏器的偏振方向一致,就能令光束大部分透过起偏器,从而避免了能量的浪费,提高激光显示系统的能量利用率。

LCOS 器件与 LCD 器件一样,都使用液晶作为空间光调制的材料。不同的是, LCD 属于投射型液晶器件,而 LCOS 属于反射型液晶器件。反射性液晶器件一般由反射液晶面板、CMOS 驱动板、PBS 偏振分束镜等构成。LCOS 器件的工作原理如图 2-11 所示:

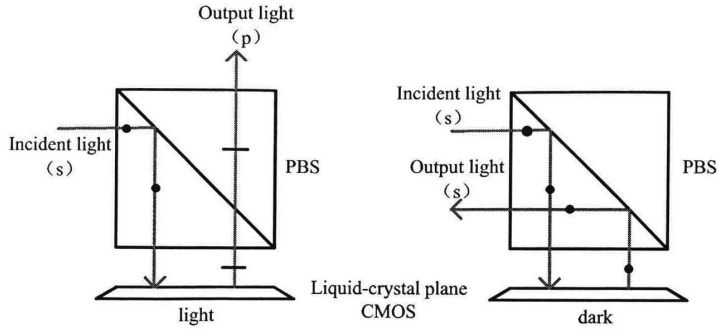


图 2-11 LCOS 器件的工作原理图

LCOS 器件一般采用扭曲向列性液晶或电控双折射，因为这些工作模式光效率较高，对比度较大。利用这些器件的双折射特性可以对入射到液晶面板的 s 偏振光进行调制。当像素点处于“暗”态时，液晶分子的取向与 s 偏振同向，从而不会改变入射光的偏振态，此时光再次经过 PBS 偏振分束镜时会被反射，无法经过投影镜头；当像素点处于“亮”态时，液晶分子的方向会发生改变，从而使反射光变为 p 偏振光，因此能透过 PBS 偏振分束镜进入镜头。

LCOS 器件在 20 世纪 90 年代末以后有了较大的发展。和其它技术相比，其优势在于它的芯片制作工艺可采用常规的半导体制作工艺，加工工艺比较简单，批量化的成本较为低廉。由于是反射式器件，LCOS 的开口率较高，更容易实现高分辨率显示。但 LCOS 器件仍存在液晶寿命问题，其相对复杂的分色合色及偏振分束系统也影响着它的发展。

DLP 即是由美国德州仪器公司 (TI) 开发的一种利用微机械技术对空间光进行调制的器件，其核心部分被称为数字式微镜器件 (DMD)。DMD 芯片的外观如图 2-12 (a) 所示，它是由微反射镜阵列组成的，每一个微反射镜对应一个显示像素，其结构如图 2-12 (b) 所示。微反射镜单元的尺寸通常是 $13.7 \mu\text{m} \times 13.7 \mu\text{m}$ ，微反射镜间的间距为 $0.8 \mu\text{m}$ 。

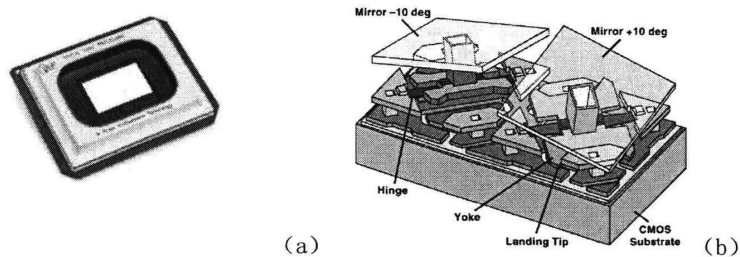


图 2-12 (a) DMD 投影芯片 (b) DMD 像素结构图

DMD 芯片的工作原理如图 2-13 所示。虽然微反射镜单元的体积非常小，但是依然拥有复杂的机械结构——每块微反射镜都有独立的支撑架，并围绕铰接斜轴进行 $\pm 12^\circ$ 的偏转。微反射镜的两角布置了两个电极，通过电压控制微反射镜的角度偏转。当单元像素工作在开启状态（"On" State）时，微反射镜偏转角为 $+12^\circ$ ，此时由于照明光线的入射角为 -24° ，因而反射光线从 0° 方向出射，到达投影镜头，因此该像素有光输出；当单元像素工作在关闭状态（"Off" State）时，微反射镜偏转角为 -12° ，此时反射光线由 $+48^\circ$ 方向出射，被完全吸收，因此该像素无光输出。由于微反射镜机构很小，控制十分灵敏，因此能够达到很高的转动速度，光学开关时间约为 $2\ \mu\text{s}$ ，机械开关时间约为 $15\ \mu\text{s}$ 。利用微透镜的快速转动，能够控制单位时间内某像素上光脉冲输出的数量，从而数字化地显示像素的灰度。这便是 DLP 被称为数字光处理器件的原因。

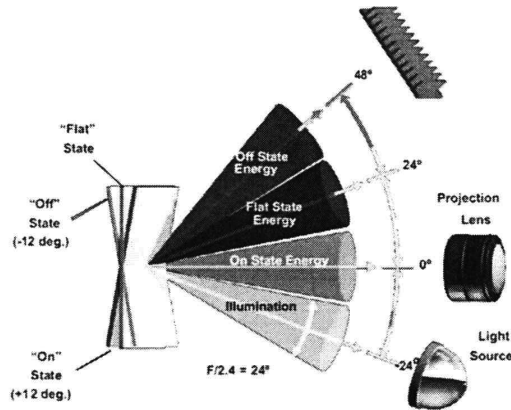


图 2-13 DMD 芯片工作原理图

在实际的应用中，可以针对不同的性能与亮度需求，选择使用单片、双片或者三片 DMD 芯片来组成 DLP 投影显示系统。由于双片式 DLP 投影系统只有在特殊的情况才会使用，因此这里主要介绍单片式和三片式系统。单片式 DLP 投影系统的基本结构如图 2-14 所示。在这个系统中，经过反光碗会聚的灯泡光源照射在一个快速旋转的色轮上，色轮会将白光光源按照时序调制成所需的红绿蓝三基色光，以实现彩色显示。经过色轮后光束会进入到所谓的积分方棒中，实现光束的整形和匀光。之后经过一系列中继光学系统，光束照射到 DMD 芯片上，被调制成为图像。单片式 DLP 投影系统光路简单，利用率高，且仅使用一块 DMD 芯片，成本较低。但由于需要使用色轮作为颜色调制器件，带来了光能的损失，因此单片式 DLP 投影系统一般用于小型家用场景。

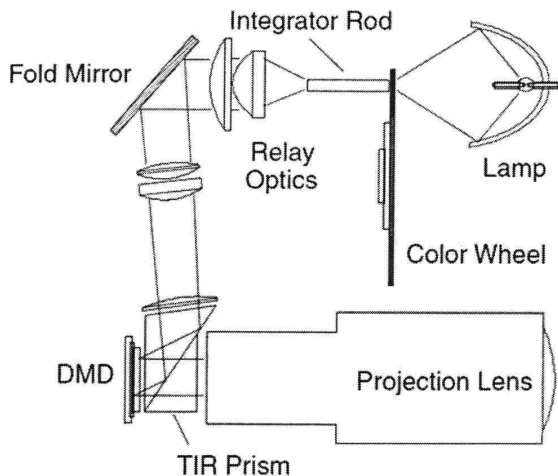


图 2-14 单片式 DLP 投影系统的基本结构图

三片式 DLP 投影系统的基本结构如图 2-15 所示。这里采用了三片 DMD 芯片分别对红绿蓝三原色进行图像调制，因此不需引入色轮，提高了光能输出。三片式 DLP 投影系统被大量应用于数字影院放映中，能够具备很高的投影显示亮度。相应地，其成本及体积相对于单片式而言也大大提高。

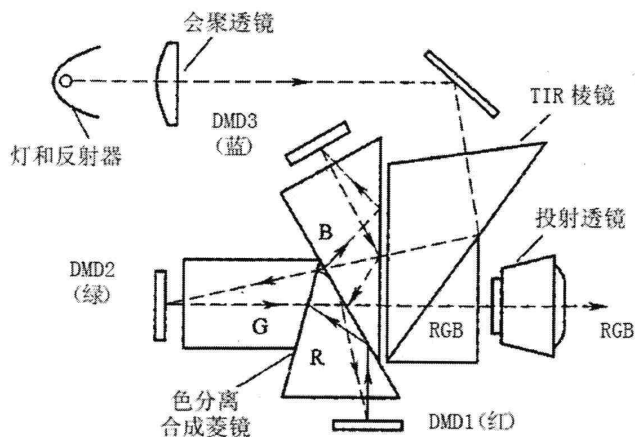


图 2-15 三片式 DLP 投影系统的基本结构图

在激光投影显示系统中，也常常使用 DMD 芯片作为空间光调制器件。由于激光光源本身具有可调制性，在进行彩色显示时，能够通过时序切换红绿蓝三基色光源的开关状态，从而代替了色轮的颜色调制。因此，在单片式 DLP 激光投影系统中，不需要引入色轮这一部件，简化了系统结构，且提高了光能利用率，能够获得很好的显示效果。但是，激光光源带来的散斑问题也必须得到解决。

§ 2.2.2 针对激光投影显示的散斑抑制方案

由于带有散斑噪声的图像严重影响观看感受,因此在激光投影显示中,必须采用合理的散斑抑制方案来解决散斑问题。已经有研究人员通过视觉生理实验证明:当图像的散斑对比度低于4%时,人眼便不能感知到散斑[9]。因此,在激光显示领域,散斑抑制方案的目标是将散斑对比度降低到4%以下。目前,散斑抑制方案分为两类:一类方案是对激光光源的时间或空间相干性进行抑制。由于散斑现象来源于相干干涉,因此降低光源的相干性能从根源上抑制散斑;另一类方案是在单位时间内叠加多幅不相关的散斑图样。在上一节中我们提到,当 N 幅独立的散斑图样进行强度叠加时,如果各个分量散斑图样的平均光强相等,叠加后的散斑对比度将与 $1/\sqrt{N}$ 成正比下降。因此通过不同手段增加 N 的数量,能够抑制散斑。

在第一章绪论中我们已经对不同的散斑抑制方案进行了具体介绍,下面将对这些方案进行概括分析:

1. 减弱光源的时间相干性

减弱光源的时间相干性一般的方法是对光源的光谱宽度进行展宽,包括有使用高频相位调制、使用电光晶体[10]或进行宽带倍频[11]。但是,如果单独使用以上的方案,需要将光源的谱宽扩展到一个比较大的值(20nm或以上)才能将散斑对比度抑制到较小的范围,这样容易破坏激光光源的单色性,影响显示质量。因此常常将以上方案与其他方案一起使用,以达到更好的效果。

2. 减弱光源的空间相干性

减弱光源空间相干性的方法有很多,这里主要介绍两种。一种是使用多个光源构成阵列激光[12]。当激光光源阵列中每两个激光器的距离大于某个值时,光源阵列内每个光源都是相互无关的。因此,如果光源阵列由 M 个激光器构成,则散斑对比度能下降到 $1/\sqrt{M}$ 。对于现阶段使用半导体光源的激光投影系统而言,由于单个激光器功率不足以达到亮度需求,因此通常使用激光光源阵列。只要对系统进行合理的优化与设计,在保证散热的前提下做到小型化、集成化,就能够应用这种方法抑制散斑。另外,也可以通过积分方棒等多次反射型光学元件增加点光源的数目,这将在下一节中进行讨论。

第二种减弱光源空间相干性的方法是使用随机激光光源。随机激光器在传统的激光器结构的基础上,在腔内引入了随机散射介质,因此出射激光的相位是随机的[13]。随机激光器的空间相干性很弱,而单色性仍能保持较高的水平,因此利于开发大色域低散斑的激光显示系统。但随机激光技术受限于功率及体积,离真正实用化仍有一段距离。

3. 引入动态元件

在激光投影显示光路中引入动态元件是目前开发程度最高、应用最广的散斑抑制技术。这种方法的原理是：光路中元件的运动会导致类似的散斑运动，即产生多幅不相关的散斑图样，这些散斑图样的时间积分使得散斑对比度下降。一般可采用振动、旋转或平动等运动方式，而可运动的元件包括散射片、积分方棒、屏幕、衍射光学元件（DOE）等。这种方案原理较为简单，在具体实施上难度较小，因此很快被应用于各类激光投影显示系统中。但是，现有的方案一般存在成本较高，光路不稳定，结构较为复杂等问题，有待进一步研究解决。

值得注意的是，上述的散斑抑制方案单独使用时一般不能达到理想的效果，因此需要同时使用不同的方法，而每种方法可以看作是引入某一数目的自由度[4]。如果引入 N 个独立的机制来引入新的自由度，那么自由度的总数 M 就是：

$$M = \prod_{n=1}^N M_n \quad (2.18)$$

得到的总散斑对比度为：

$$C = \frac{1}{\sqrt{M}} \quad (2.19)$$

因此，为了得到最好的散斑抑制效果，我们应该同时引入尽可能多的散斑抑制机制。但是，这样容易增加系统的复杂度，带来光能的额外损耗和整体成本的提高。对于要求小型化、集成化的激光投影系统，有必要开发一种结构简单、损耗更低、显示效果更好的新型散斑抑制系统。

§ 2.3 基于旋转偏心球镜的新型散斑抑制系统

上一节中我们提到，散斑抑制方案实质上是通过引入多样化的散斑抑制机制，将激光投影显示画面上的散斑对比度降低到 4% 以下。针对小型激光投影显示系统，我们设计了一种基于旋转偏心球镜的散斑抑制方案，其特点有：1. 在光路中仅进入了一个透镜元件，光损耗小；2. 提高了画面的亮度均匀性；3. 引入了多种机制，将散斑抑制到极低的水平。下面将对这个系统作详细的介绍。

§ 2.3.1 系统的结构与工作原理

由于单片式 DLP 激光显示系统体积小，成本低，因此常用于小型投影机内。我们在单片式 DLP 系统的基础上设计了针对性的散斑抑制方案，其整体结构如图 3-1 所示，其中虚线框内是主要的散斑抑制装置。

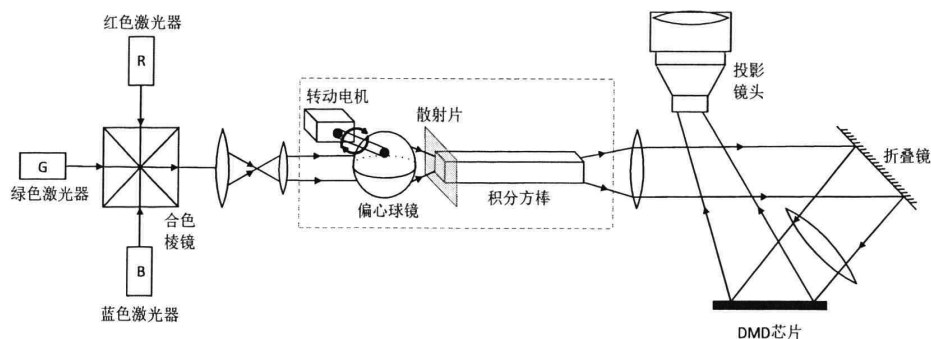


图 2-16 加入偏心球镜散斑抑制装置的激光投影系统

由图中可见，主要的散斑抑制装置由转动电机、偏心球透镜、散射片和积分方棒组成。其中，偏心球透镜由转动电机带动旋转，其旋转轴稍微偏离球心。从红绿蓝三基色激光器出射的光束经合色、缩束、准直等处理之后，经过球透镜聚焦到散射片上，再经过积分方棒的匀光，最终照射到 DMD 芯片。由于球透镜的旋转轴偏离球心，因此其焦点会随着球透镜的转动而改变。如图 2-17 所示，偏心球的旋转轴为 A，当球心转动到 O_1 、 O_2 、 O_3 、 O_4 这几个位置时，焦点相应地处于 O_1' 、 O_2' 、 O_3' 、 O_4' 位置。这种设计的目的是对激光光束的方向进行调制，使其随着球透镜的转动不断扫描，在散射片上形成一系列运动的光斑。

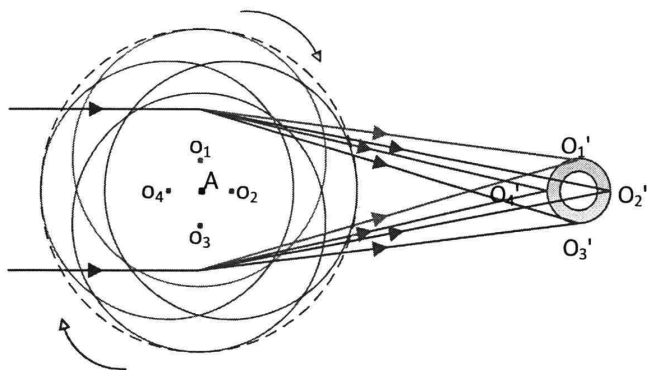


图 2-17 偏心球镜工作原理图

应用这套装置能够为激光投影显示系统引入多种散斑抑制机制，因此可以得到良好的散斑抑制效果。下面将进行具体的分析。

§ 2.3.2 系统的散斑抑制机制分析

上一节中提到，有效的散斑抑制机制主要包括降低光源时间相干性、降低空间相干性、引入动态元件等。其中，降低光源时间相干性需要改变光源的谱宽，一般难以在光路的中段实现。因此，上述的方案主要利用了降低空间相干性及引

入动态元件两组机制。

1. 降低空间相干性的机制

一般而言，通过增加非相干光源的数目能够降低光源的空间相干性。在上述的激光投影显示系统中，激光光源阵列中激光器的数目已经确定，因此只能通过增加“虚”光源的数目来实现。在我们的偏心球镜装置中，焦点光斑的快速扫描以及积分方棒的多次反射光线均能够大量增加非相干光源数目。

当偏心球透镜快速转动时，其焦点处的光斑也随之快速移动，形成了一个线状的扩展光源。对于典型的半导体激光器，若波长为 523nm，谱宽为 1nm，则估计其相干时间为：

$$\tau_0 = \frac{l_c}{c} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda \cdot c} \approx 9.43 \times 10^{-13} \text{ s} \quad (2.20)$$

该光源的相干时间极短。因此，光斑扫描时，不同时刻对应的光斑可视为非相干点光源。但是，当两个非相干点光源的角间距过小时，产生的两个散斑图样依然可能相关。下面考虑其散斑图样相关的最小角间距。将光路简化为如图 2-18 所示的形式。当偏心球透镜移动到两个不同位置时，其焦点形成两个非相干点光源，它们对光轴的张角分别为 $-\theta$ 和 θ 。假设球透镜直径为 D ，成像透镜的放大率为 1，即物距与像距均为 z 。

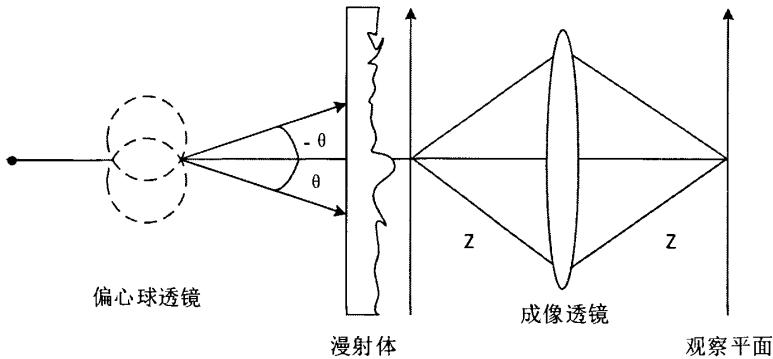


图 2-18 非相干点光源照明简化光路示意图

假设散斑均为完全散射散斑，则散斑场遵从复值圆形高斯统计。在观察平面上的像场 $A(x, y)$ 和散射体的平面上的场 $a(\alpha, \beta)$ 间的关系为：

$$A(x, y) = \iint k(x + \alpha, y + \beta) a(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (2.21)$$

这里 k 是成像系统的点扩散函数。于是能将场 A_1 和场 A_2 的交叉相关函数 $\Gamma(x, y, \theta)$ 求出为[4]：

$$\begin{aligned}\Gamma(x, y; \theta) &= \iiint k(x + \alpha_1, y + \beta_1) k^*(x + \alpha_2, y + \beta_2) \overline{a_1(\alpha_1, \beta_1) a_2^*(\alpha_2, \beta_2)} d\alpha_1 d\beta_1 d\alpha_2 d\beta_2 \\ &= \kappa |r|^2 \iint |S(\alpha, \beta)|^2 \exp(j4\pi \frac{\sin \theta}{\lambda} \beta) |k(x + \alpha, y + \beta)|^2 d\alpha d\beta\end{aligned}\quad (2.22)$$

其中 κ 是常数, S 是蛮射体表面振幅分布, λ 是波长。考虑两个散斑图像之间的相干程度, 即 $\Gamma(x, y; \theta)$ 的归一化形式为:

$$\mu_2(x, y; \theta) = \frac{\iint |k(x + \alpha, y + \beta)|^2 \exp(j4\pi \frac{\sin \theta}{\lambda} \beta) d\alpha d\beta}{\iint |k(x + \alpha, y + \beta)|^2 d\alpha d\beta} \quad (2.23)$$

改变积分变量形式并且只考虑绝对值可得到相关系数为:

$$|\mu_2(\theta)| = \frac{\iint |k(\alpha', \beta')|^2 \exp(j4\pi \frac{\sin \theta}{\lambda} \beta') d\alpha' d\beta'}{\iint |k(\alpha', \beta')|^2 d\alpha' d\beta'} \quad (2.24)$$

其中 $\alpha' = x + \alpha$, $\beta' = y + \beta$ 。由于 $|k|^2$ 是成像系统的强度点扩展函数, 则 $|\mu_2|$ 可以用成像系统的光学传递函数 (OTF) 表示 [14]:

$$|\mu_2(\theta)| = |H(0, -\frac{2\sin \theta}{\lambda})| \quad (2.25)$$

其中光学传递函数定义为:

$$H(v_x, v_y) = \frac{\iint |k(x, y)|^2 e^{-j2\pi(v_x x + v_y y)} dx dy}{\iint |k(x, y)|^2 dx dy} \quad (2.26)$$

对于光瞳直径为 D 的成像系统, 光学传递函数可以写作:

$$H(\rho) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} [\arccos(\rho / \rho_0) - (\rho / \rho_0) \sqrt{1 - (\rho / \rho_0)^2}] & \rho < \rho_0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2.27)$$

其中 $\rho = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$, $\rho_0 = \frac{D}{\lambda z}$ 是光学传递函数的截止频率。易知, 当

$$\sin \theta \geq \frac{D}{2z} \approx NA_{\text{像}} \quad (2.28)$$

时, 相关系数 $|\mu_2(\theta)|$ 将降为 0。其中 $NA_{\text{像}}$ 是成像系统的数值孔径。

由于散斑是通过人眼观察得到的, 因此上式中成像系统的光瞳即是眼镜的瞳孔。由此可以得到结论: 若投影放大率为 1, 则当照明角大于眼镜瞳孔到屏幕的张角时, 会产生两幅不相干的散斑图样。而当放大率为 m 时, 则需要照明角是眼

镜瞳孔张角的 m 倍。

综上所述, 在我们设计的偏心球透镜散斑抑制系统中, 通过合理地设计球透镜的直径、焦距、偏心距离等参数, 能够产生额外的非相干光源, 提高不相关的叠加散斑图样的数目, 进而降低散斑对比度。

另外, 偏心球镜与积分方棒的联合使用能进一步提高非相干光源的数目。积分方棒是一种反射式匀光器件, 在投影系统中应用非常广泛。光束在进入积分方棒后会形成多次反射, 因此其出射面的光场可以看作是多个虚点光源的叠加, 如图 2-19 所示。

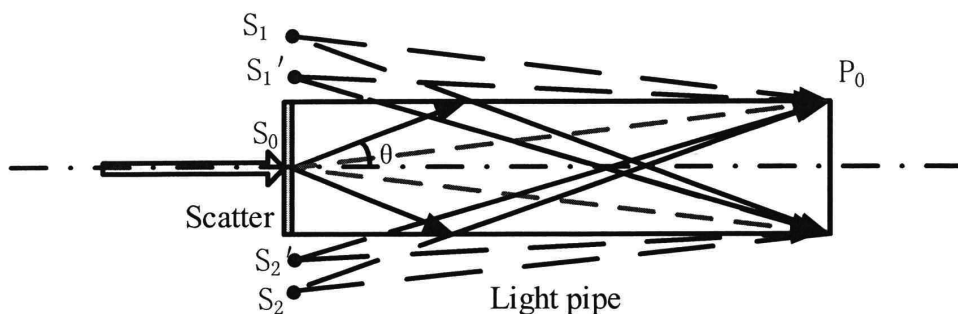


图 2-19 利用积分方棒产生虚点光源

上图中, S_0 是入射到积分方棒的聚焦光束, S_1 、 S_2 均是经一次反射后形成的虚点光源。如果将积分方棒与偏心球透镜系统联用, 则 S_0 是一个扫描光束, 相当于增加了实点光源的数量, 因此对应的虚点光源数量也随之而增加 (如图中的 S_1' 、 S_2')。经过积分方棒的多次反射后, 虚点光源的数量会得到成倍增加, 大大降低了光源的空间相干性, 进一步抑制了散斑。

2. 引入动态元件的机制

由于偏心球透镜的转动带来了光束的扫描运动, 因此对散射片而言相当于与光束间进行相对的往返运动。随着散射片的相对运动, 某个像点的相位在不断变化, 则其光强度也随之变化。在积分时间内, 人眼观察到的总光强度是不同时刻强度的积分, 总的散斑图样也是不同时刻散斑图样的叠加。下面讨论散斑对比度与散射片运动距离间的关系。首先考虑光通过散射片和物体的场分布, 假设放大率为 1, 有:

$$\bar{A}(x, y; t) = \iint k(x + \alpha, y + \beta) \bar{a}(\alpha, \beta; t) d\alpha d\beta \quad (2.30)$$

其中 \bar{A} 和 \bar{a} 是时变的量, k 是成像系统的振幅点扩展函数, (x, y) 是观察面坐标, (α, β) 是散射片的位置坐标。 \bar{a} 是物体和散射片的透射率, 与散射片的变化位相 (ϕ_d) 和物体不变的位相 (ϕ_0) 间的关系为:

$$\bar{a}(\alpha, \beta; t) = \bar{a}_0 \exp[j\phi_0(\alpha, \beta)] \exp[j\phi_d(\alpha - vt, \beta)] \quad (2.31)$$

其中 \bar{a}_0 是常数, 并假设漫射体以速率 v 运动。通过计算系统的时间自由度 M 能计算散斑对比度 [15]:

$$C = 1/\sqrt{M} \quad (2.32)$$

系统的时间自由度 M 能通过像场的归一化自相关函数求得:

$$\begin{aligned} \Gamma_A(\tau) &= \overline{A(0, 0; t)A^*(0, 0; t - \tau)} \\ &= \iiint k(\alpha_1, \beta_1)k^*(\alpha_2, \beta_2)\overline{a(\alpha_1, \beta_1, t)a^*(\alpha_2, \beta_2, t - \tau)}d\alpha_1d\beta_1d\alpha_2d\beta_2 \end{aligned} \quad (2.33)$$

考虑到相位 ϕ_d 和 ϕ_0 是相互独立的, 且符合高斯分布, 则可以把自相关函数简化为:

$$\Gamma_A(\tau) = \bar{a}_0^2 \iint K(\Delta\alpha, \Delta\beta) \exp\{-\sigma_0^2[1 - \mu_0(\Delta\alpha, \Delta\beta)]\} \exp\{-\sigma_d^2[1 - \mu_d(\Delta\alpha - vt, \Delta\beta)]\} d\Delta\alpha d\Delta\beta \quad (2.34)$$

在这里,

$$K(\Delta\alpha, \Delta\beta) = \iint k(\alpha_1, \beta_1)k^*(\alpha_1 - \Delta\alpha, \beta_1 - \Delta\beta)d\alpha_1d\beta_1 \quad (2.35)$$

是成像系统点扩散函数的自相关函数; $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$, $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$, σ_0^2 和 σ_d^2 分别是 ϕ_0 和 ϕ_d 的方差, μ_0 和 μ_d 是归一化自相关函数。可以利用式 (2.34) 求场的自协方差函数:

$$\begin{aligned} C_A(\tau) &= \Gamma_A - \overline{AA^*} \\ &= \bar{a}_0^2 \exp[-(\sigma_0^2 + \sigma_d^2)] \iint K(\Delta\alpha, \Delta\beta) \{ \exp[\sigma_0^2 \mu_0(\Delta\alpha, \Delta\beta)] - 1 \} \\ &\quad \times \{ \exp[\sigma_d^2 \mu_d(\Delta\alpha - vt, \Delta\beta)] - 1 \} d\Delta\alpha d\Delta\beta \end{aligned} \quad (2.36)$$

假设场分布均为高斯分布, 则归一化自相关函数就可以写成:

$$\begin{aligned} \mu_0(\Delta\alpha, \Delta\beta) &= \exp\left(-\frac{\Delta\alpha^2 + \Delta\beta^2}{r_0^2}\right) \\ \mu_d(\Delta\alpha, \Delta\beta) &= \exp\left(-\frac{\Delta\alpha^2 + \Delta\beta^2}{r_d^2}\right) \end{aligned} \quad (2.37)$$

$C_A(\tau)$ 可以表示为:

$$\begin{aligned} C_A(\tau) &= \iint \frac{K(\Delta\alpha, \Delta\beta)}{K(0, 0)} \left\{ \frac{\exp(\sigma_0^2 \exp[-\frac{\Delta\alpha^2 + \Delta\beta^2}{r_0^2}]) - 1}{\exp(\sigma_0^2) - 1} \right\} \\ &\quad \times \left\{ \frac{\exp(\sigma_d^2 \exp[-\frac{(\Delta\alpha - vt)^2 + \Delta\beta^2}{r_d^2}]) - 1}{\exp(\sigma_d^2) - 1} \right\} d\Delta\alpha d\Delta\beta \end{aligned} \quad (2.38)$$

则求出归一化场自协方差函数为:

$$\begin{aligned} \mu_A(\tau) &= C_A(\tau) / C_A(0) \\ &= \frac{\iint \frac{K(\Delta\alpha, \Delta\beta)}{K(0,0)} \left\{ \frac{\exp(\sigma_0^2 \exp[-\frac{\Delta\alpha^2 + \Delta\beta^2}{r_0^2}]) - 1}{\exp(\sigma_0^2) - 1} \right\} \left\{ \frac{\exp(\sigma_d^2 \exp[-\frac{(\Delta\alpha - v\tau)^2 + \Delta\beta^2}{r_d^2}]) - 1}{\exp(\sigma_d^2) - 1} \right\} d\Delta\alpha d\Delta\beta}{\iint \frac{K(\Delta\alpha, \Delta\beta)}{K(0,0)} \left\{ \frac{\exp(\sigma_0^2 \exp[-\frac{\Delta\alpha^2 + \Delta\beta^2}{r_0^2}]) - 1}{\exp(\sigma_0^2) - 1} \right\} \left\{ \frac{\exp(\sigma_d^2 \exp[-\frac{\Delta\alpha^2 + \Delta\beta^2}{r_d^2}]) - 1}{\exp(\sigma_d^2) - 1} \right\} d\Delta\alpha d\Delta\beta} \end{aligned} \quad (2.39)$$

如果光路中存在一光滑表面(如 DMD 芯片), 则令式(2.38)中第二项中 $\sigma_0^2 \rightarrow 0$, 第二项因子变成 1, 则式(2.39)可以化简为:

$$\mu_A(\tau) = \frac{\iint K(\Delta\alpha, \Delta\beta) \left\{ \exp(\sigma_d^2 \exp[-\frac{(\Delta\alpha - v\tau)^2 + \Delta\beta^2}{r_d^2}]) - 1 \right\} d\Delta\alpha d\Delta\beta}{\iint K(\Delta\alpha, \Delta\beta) \left\{ \exp(\sigma_d^2 \exp[-\frac{\Delta\alpha^2 + \Delta\beta^2}{r_d^2}]) - 1 \right\} d\Delta\alpha d\Delta\beta} \quad (2.40)$$

利用 $\mu_A(\tau)$ 可以求出时间积分内散斑的自由度 M [16]:

$$M = \frac{(\int P_T(\tau) d\tau)^2}{\int K_T(\tau) |\mu_A(\tau)|^2 d\tau} \quad (2.41)$$

其中

$$P_T(t) = \text{rect}\left(\frac{t-T/2}{T}\right) \quad (2.42)$$

是均匀积分窗口权重函数, 而 $K_T(\tau)$ 是 $P_T(\tau)$ 的自相关函数。

因此可以求得:

$$C = \left[\frac{2}{T} \int_0^T (1 - \frac{\tau}{T}) |\mu_A(\tau)|^2 d\tau \right]^{1/2} \quad (2.43)$$

考虑圆形光瞳, 则因子 $K(\Delta\alpha, \Delta\beta)$ 可以表示为:

$$K(\Delta\alpha, \Delta\beta) = 2 \frac{J_1\left(\frac{\pi D r}{\lambda z}\right)}{\frac{\pi D r}{\lambda z}} \quad (2.44)$$

其中 $J_1(\dots)$ 是一阶贝塞尔函数, D 是光瞳直径, λ 是激光波长, z 是散射片与像平面距离。利用(2.41)和(2.44)近似可以求出:

$$M = \left[2 \int_0^1 (1-x) \frac{J_1^2\left(\pi \frac{vT}{\lambda z / D}\right)}{\left(\pi \frac{vT}{\lambda z / D}\right)^2} dx \right]^{-1} \quad (2.45)$$

当 T 足够大时, 有:

$$C \approx \sqrt{\frac{\lambda z / D}{vT}} \quad (2.46)$$

可以看到，散射片在积分时间 T 内运动的距离 vT 越大，对散斑对比度的抑制越强。在我们的偏心球镜散斑抑制系统中，通过高速电机带动球镜旋转，并合理设计球透镜的焦距、直径、偏心距离等参数，可以使得散射片的相对运动距离达到足够的大小。

综上所述，我们设计的散斑抑制系统里通过引入高速转动的偏心球透镜，并且与散射片和积分方棒联用，在合理设计各项参数的情况下能够减低光源的空间相干性和形成动态散斑，大大增加了系统对散斑抑制的自由度，从而降低最终的散斑对比度。

§ 2.4 偏心球透镜散斑抑制系统的具体实现及测试结果

在上一节中我们已经介绍了基于偏心球镜的散斑抑制系统的基本结构（如图 2-16 所示）。整个投影系统基于单 DLP 结构设计，主要的改动是加入了由高速电机带动的偏心球透镜及散射片。而为了在满足散斑抑制条件的情况下，令整个系统的光能利用率最高，需要合理地选择参数，并通过软件仿真设计最优光路。这里我们使用 Lighttools 7.0 软件进行光学系统仿真。仿真中用到的简化光路如图 2-20 所示。

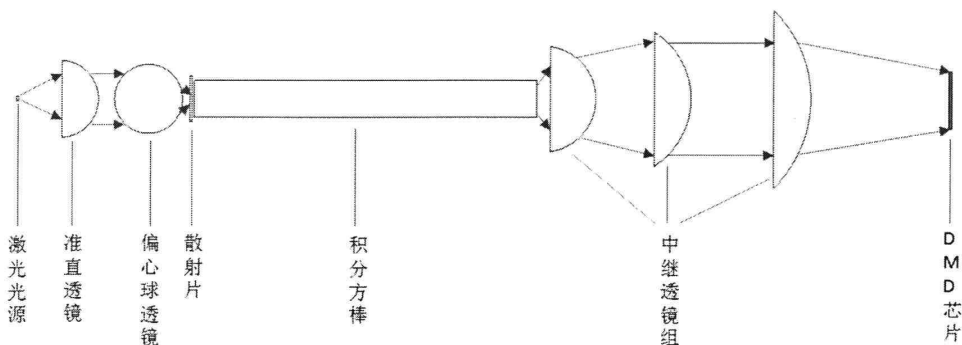


图 2-20 Lighttools 仿真中的简化光路图

仿真中用到的器件有：光源、准直透镜、偏心球透镜、散射片、积分方棒、中继透镜组、接收平面（代表 DMD 芯片）。其中，偏心球透镜在上图中处于未偏离光轴的正常状态，可以通过它的位置参数来模拟旋转到偏离光轴时的情况。一些关键器件的主要参数设置为：光源出射时发散角为 30° ；散射片的散射角为 30° ；积分方棒长度为 5cm；积分方棒出射面到接收平面距离为 10cm。这样设置参数是为了更好地模拟小型激光投影系统中的实际光路。

在软件中添加了需要的器件后,就能够通过光线追迹的方式,得到接收平面的光能量分布情况。光线追迹就是在进行一般的光学设计时,通过将折射、反射等光学定律准确地应用在每个光学表面,实现从光源到接收面的光线跟踪。当对同一个光源进行足够数量的光线追迹时,就能观察到接收平面上总体的光能量分布情况,从而实现光学系统的仿真。在兼顾计算速度与仿真精度的前提下,我们设置了对 25000 条光线的追迹,光线追迹完成后的光路如图 2-21 所示。

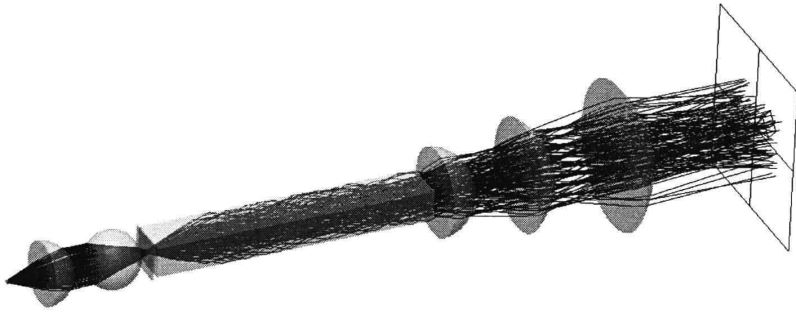


图 2-21 Lighttools 中对 25000 条光线的追迹情况

完成光线追迹后,就能够对模拟接收平面上的照明光强分布作分析。如图 2-22 所示,激光光源经过我们设计的消散斑及匀场系统中,在模拟 DMD 芯片的接收平面上形成了一个照度比较均匀的方形光斑。其中心强度最高最均匀的部分足以覆盖一个尺寸为 0.97inch(24.6mm)*0.7inch(17.8mm)的 DMD 芯片。

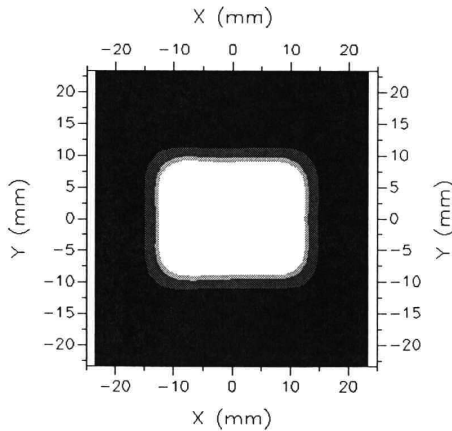


图 2-22 Lighttools 接收平面的照度分布图

下面对照度均匀性作分析。一般的照度均匀性测试方法是在待测区域内选取数个测试点，测得照度值大小后计算最小照度值与平均照度值，就能够得到照度均匀度=最小照度值/平均照度值。照度测试点的选取方法我们参照 ANSI 流明测试方法中的九点选取法，如图 2-23 所示。

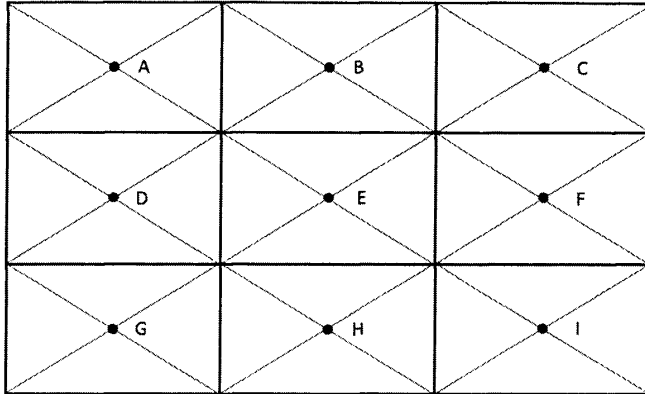


图 2-23 ANSI 测试方法中的测试点选取

参照上图，在接收平面上光斑的相应位置测试 9 个照度值为（单位：lx）：23721，24806，24128，24264，25193，23904，24446，25217，24552。值得注意的是，这里的照度数值与光源功率有关。由于我们考虑的照度均匀性是最小照度值与平均照度值的比值，与具体数值大小并不相关，因此这里我们并不关心照度值大小。通过计算可以得到照度均匀性为 97%。可见，我们设计的系统能实现很好的匀光效果，能够在实际的投影显示系统中使用。

值得注意的是，这个系统的匀光效果还能够得到进一步得到提高。上面的模拟中我们只考虑了偏心球透镜工作在正常位置时的情况。当偏心球透镜发生转动时，会偏离原来光轴位置，使得接收平面上光斑的光强分布发生变化。如图 2-24 所示，为了方面描述，我们在接下来的讨论中用 O_1 、 O_2 、 O_3 、 O_4 四个球心位置来代表球透镜转动到的四个位置。在 Lighttools 软件中我们通过改变球透镜的空间位置，能模拟偏心球透镜旋转到 O_1 、 O_3 位置时的空间光场分布。如图 2-25 所示，当球透镜旋转并沿 X 轴上下偏离时，接收平面光斑的照度分布也随之改变。其中，可以看到光照度最强的位置向接收平面相应的 X 方向偏移。当球透镜处于向上偏离位置，照度最强位置向右偏移；当球透镜处于向下偏离位置时，照度最强位置向左偏移。由于球透镜实际上是处于高速转动的状态，因此可以想象，照明光斑会产生类似于强度扫描的现象，导致光斑四角照度较低位置得到照度的“补充”，最终形成一个更加均匀的光斑照度分布。下面对球透镜处于正常和上下偏离三种位置时对应的照度分布进行分析。

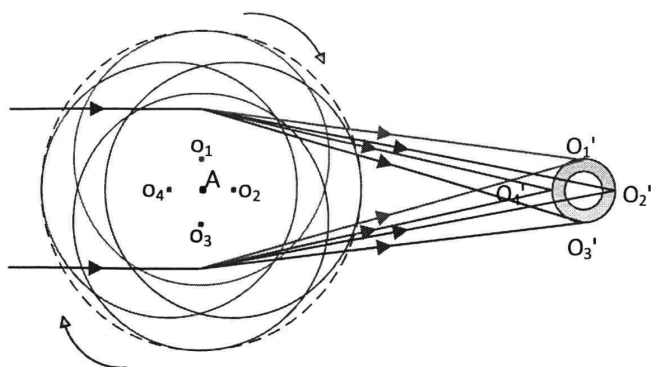


图 2-24 偏心球镜旋转时的位置示意图

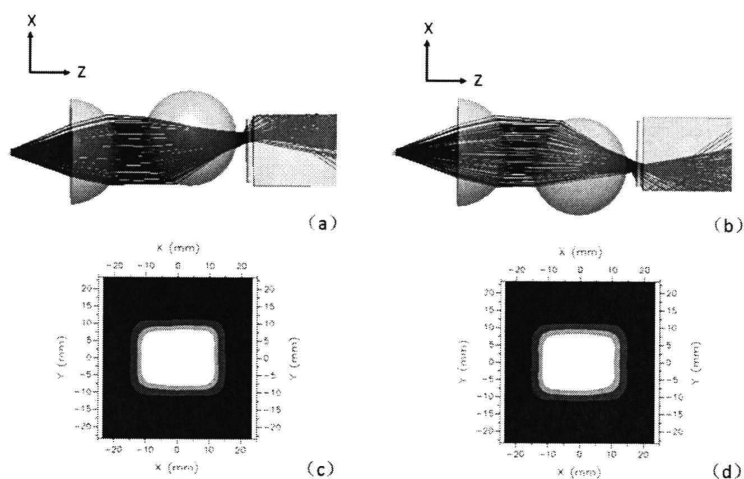


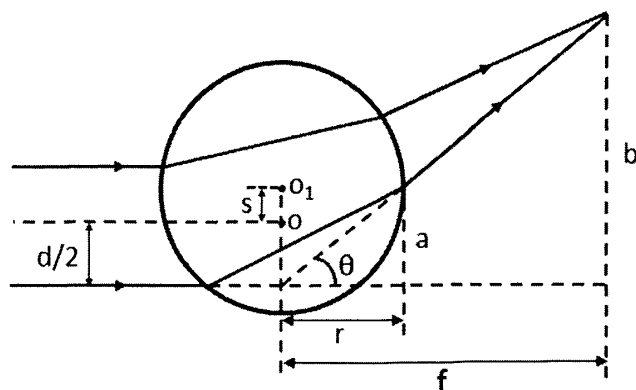
图 2-25 (a) 球镜球心在 O_1 位置时的仿真光路 (b) 球镜球心在 O_2 位置时的仿真光路
(c) 球镜球心在 O_1 位置时的光斑照度分布 (d) 球镜球心在 O_2 位置时的光斑照度分布

类似的,对三种光场分布的测试点 A~I 测试照度,测试结果如表 2-1 所示。之后先对相同测试点的三个照度值取平均,能够得到球透镜高速转动时经时间积分的照度分布情况。接着可以计算经时间积分后的照度均匀性。由表 2-1 可以算得平均照度为 $243221x$,最小照度为 $238541x$,因此照度均匀性为 98%。相比于前面得到的 97%照度均匀性,可以看到球透镜高速转动时经时间积分所得到的照度分布更加均匀。

表 2-1 对三种光场的照度测试

测试点	A	B	C	D	E	F	G	H	I
光场 i 照度 (lx)	23721	24806	24128	24264	25193	23904	24446	25217	24552
光场 ii 照度 (lx)	24428	24739	23435	24519	24574	23934	24084	24942	23734
光场 iii 照度 (lx)	23413	24493	24999	23735	24765	24418	23260	25006	23976
平均值 (lx)	23854	24679	24187	24173	24844	24085	23930	25055	24087

接下来我们对系统的散斑抑制能力作简单分析。在上一节中我们提到，当两个光源的张角大于眼镜瞳孔的张角时，会产生两幅不相干的散斑图样，继而降低散斑对比度。但这里没有考虑投影系统对像的放大作用。假设投影系统对图像的放大率为 m ，则像空间的张角会缩小到 $1/m$ 。此时只有当光源张角大于瞳孔张角的 m 倍时，才能产生不相关的散斑图样叠加。这里我们利用一般情况下的参数进行估计。如果投影系统将一个对角线距离为 1.2inch 的 DMD 芯片投影到一个对角线距离为 100inch 的屏幕上，则放大率为 83 倍。取人眼瞳孔直径为 3mm，观察距离为 5m，则瞳孔张角大小为 $0.003/5=6 \times 10^{-4}$ rad。因此光源的张角大于 $6 \times 10^{-4} \times 83=0.05$ rad= 2.86° 时，就能产生两幅非相干散斑图样。下面对偏心球镜产生的光源最大张角进行计算。

图 2-26 偏心球镜旋转到 O_1 位置时的简化光路图

如图 2-26 所示的是当偏心球镜转动到 O_1 位置时的简化光路。其中， s 是球透镜的偏心距离， d 是准直光束的直径， f 是球透镜的焦距， r 是球透镜的半径，

θ 是光源偏转角。利用几何知识可以求得：

$$a = s + \frac{d}{2} \quad (2.47)$$

因此

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{a}{r}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{2s+d}{2r}\right) \quad (2.48)$$

假设准直后的光束直径为 6mm，球透镜半径为 5mm，偏心距离为 1mm，则根据上式可以求得光源张角 θ 为 53° 。同理可以求得偏心球透镜转到 O_2 位置时，光源偏转角也是 53° ，则总的光源张角为 106° ，远大于所需要的 2.86° 张角。因此，当偏心球透镜转动一周，等效地能产生 $106^\circ / 2.86^\circ = 37$ 幅互不相关的散斑图样，故会产生很强的散斑抑制效果。

依据上述的仿真结果能够得到一些基本的器件参数。进一步地，我们利用这些参数搭建了一台带有偏心球镜散斑抑制装置的激光投影样机，以便对系统的实际性能进行评估。

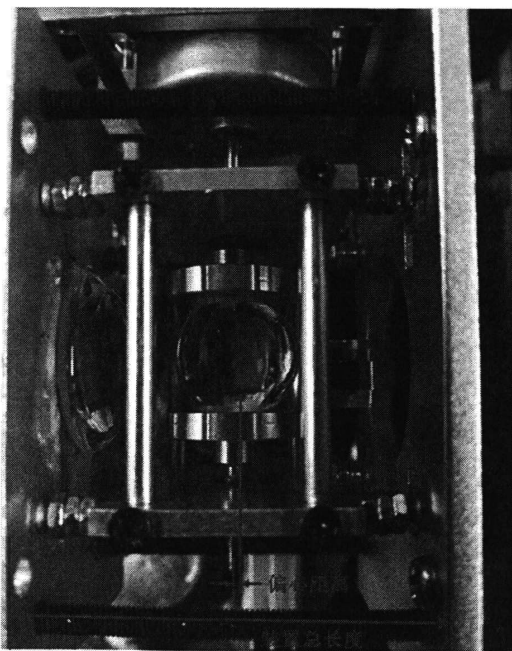


图 2-27 偏心球镜散斑抑制装置实拍图

实际的偏心球镜散斑抑制装置如图 2-27 所示。可以看到，球透镜的直径其转动轴错开了一定的偏心距离，使得球透镜实现偏心转动。整个装置的总长度只有 40mm，体积非常小，因此能够用于小型的激光投影系统中，而且仍有进一步改进的空间。加入偏心球镜散斑抑制装置后，我们设计的激光投影样机能够实现高品质的画面播放，如图 2-28 所示。



图 2-28 基于偏心球镜散斑抑制系统的激光投影样机

对激光投影样机的画面进行了照度测试后我们发现，画面的照度均匀性在 90%以上，已经达到了激光投影对照度均匀性的要求。而且整个系统的光光效率达到了 95 lm/W，大大超过了一般的投影系统，证明我们设计的消散斑和匀光系统只有非常小的损耗，能运用到实际的设计中。接下来我们对系统的散斑抑制性能进行测试。

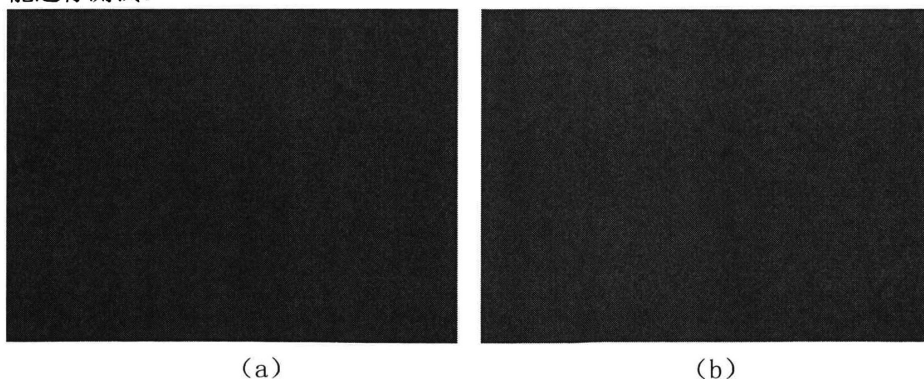


图 2-28 (a) 偏心球镜不转动时的投影画面 (b) 偏心球镜转动时的投影画面

为了对比偏心球镜散斑抑制系统不工作和工作时的散斑抑制效果，我们使

用 CCD 分别拍摄了偏心球镜不转动及转动两种情况下的投影画面,如图 2-28 所示。由于人眼对绿色最为敏感[17],我们在这里只对绿色的散斑作分析。可以看到,当偏心球镜不转动时,投影画面上存在肉眼可见的颗粒状图样,而当偏心球镜转动时,散斑被进一步抑制,整个画面上基本不能看到颗粒状的散斑图样。通过计算,我们得到图 2-28 (a) 中的散斑对比度为 4.65%,图 2-28 (b) 中的散斑对比度为 2.46%。可见,当偏心球镜散斑抑制系统工作时,散斑对比度能被抑制到 4%的人眼阈值以下,因此散斑基本不可分辨。这证明我们设计的散斑抑制系统有着很强的散斑抑制能力。

§ 2.5 本章小结

在本章中,我们针对单片式 DLP 激光投影系统,设计并开发了一套基于偏心球透镜的新型散斑抑制系统,通过偏心的转动球透镜装置,能够实现高效率的匀光照明以及良好的散斑抑制效果。利用这套系统搭建的激光显示样机,具有集成化、高光效、低散斑对比度等特点。具体而言,我们的工作分为以下几点:

1. 对我们设计的散斑抑制系统中的散斑抑制机制进行分析,发现在只额外加入一个动态透镜元件的情况下,引入了多种散斑抑制机制,包括通过转动偏心球透镜生成减弱光源的空间相干性,以及通过动态的散射光斑增加不同时刻非相干散斑图样。另外,和积分方棒的联用能大大增加散斑抑制的效果。

2. 使用光学设计软件 Lighttools 对所设计的系统进行仿真设计。通过光线追迹的结果,我们发现整个消散斑和匀光系统能够在 DMD 芯片的位置产生一个均匀的照明光斑。此外,当球透镜转动时会引起光斑强度中心出现类似扫描的现象,在积分时间内进一步提高了照度的均匀性。

3. 搭建了基于偏心球镜散斑抑制系统的激光投影样机,并进行照度测试和散斑测试。测试结果表明,通过加入这套高度集成化的散斑抑制装置,能够得到照度均匀性 90%以上,光光效率达到 95 lm/W,散斑对比度低于 3%的激光投影画面,这表明我们设计的新型散斑抑制系统具有很高的实用价值。

参考文献

- [1] Oliver B M. 1960. Sparkling spots and random diffraction[J]. Proc IEEE. 51: 220.
- [2] Rigden J D, Gordon E I. 1962. The granularity of scattered optical maser light[J]. Proc IRE. 50: 2367.
- [3] 常宏. 2010. 激光显示中散斑抑制和主观散斑跟踪的研究. [D:[博士]].合肥: 中国科学技术大学.
- [4] Goodman J W. 1975. Statistical properties of laser speckle patterns: Laser Speckle and Related Phenomena[M]. Vol 9. Heidelberg: Springer Berlin , 9-75.
- [5] Ian Wallhead, Roberto Ocana, Paula Quinza. 2012. Designing a laser scanning picoprojector. Part 1: characteristics of the optical displaying system and color-management-related issues[J]. Appl. Opt. 51(20): 4803-4809.
- [6] Gurevich B S. 2003. Laser projection displays based on acoustooptic devices[J]. J. Opt. Technol. 70: 500-503.
- [7] Trisnadi J I. 2002. Speckle contrast reduction in laser projection displays[C]//Projection Displays VIII. International Society for Optics and Photonics. 4657: 131-138.
- [8] Tamada H. 2007. blazed GxLP™ light modulators for laser projectors[J]. Journal of the Society for Information Display, 15(10): 817-823.
- [9] Yun Mi Lee, Dong Uk Lee, Jong Myoung Park, et al. 2008. A study on the Relationships between Human Perception and the Physical Phenomenon of Speckle[J]. SID symposium Digest of Technical Papers. 39(1): 1347-1350.
- [10] Kikuchi H. 1998. Laser light device, laser beacon device laser imager display device. US 5,832,009 [P].
- [11] Yu N E. 2014. Choi J W, Kang H, et al. Speckle noise reduction on a laser projection display via a broadband green light source[J]. Optics express, 22(3): 3547-3556.
- [12] Kruschwitz B E, Kahen K B, Kurtz A F, et al. 2005. Electronic imaging system using organic laser array illuminating an area light valve. US 6,950,454 [P].
- [13] Brandon Redding, Michael A. Choma, Hui Cao. 2012. Speckle-free laser imaging using random laser illumination[J]. Nature Photonics. 6: 355-359.
- [14] Goodman J W. 2005. Introduction to fourier optics[M].3rd ed. Englewood CO Roberts& Company.
- [15] Dainty J C. 1975. Laser speckle and related phenomena[M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- [16] Goodman J W. 1985. Statistical optics[M]. New York: John Wiley & Sons.

[17] 胡威捷, 唐顺青, 朱正芳. 2007. 现代颜色技术原理及应用[M]. 北京理工大学出版社.
激光投影显示屏幕的散斑特性研究

第三章 激光投影显示屏幕的散斑特性研究

在投影显示系统中,观看者是通过接收投影屏幕上的漫射光来获得图像的,因此屏幕对投影显示的图像质量有着极大的影响。通过对投影屏幕进行合理的设计和选择,能令投影图像在合适的角度内获得最高的亮度和画面质量。而在激光投影显示领域,屏幕的特性还与画面上的散斑大小有所关联。在本章中,我们将对用于激光投影显示的屏幕及其散斑特性进行研究,希望能找到一种高画面质量且低散斑对比度的投影屏幕,以获得最佳的显示效果。

§ 3.1 投影显示屏幕

在研究激光投影显示屏幕的散斑特性之前,我们需要对投影屏幕的分类、结构与基本参数做一些了解。本节将对以上内容作详细介绍,并着重关注几种常见的前投影屏幕。

§ 3.1.1 投影屏幕的分类与重要参数

由于投影系统有各种各样的应用场景,而不同的场景对投影屏幕的参数要求也不尽相同。因此,投影屏幕具有非常多的分类。按照显示方式,屏幕可以分为前投影屏幕与背投影屏幕;按照表面的结构,可以分为漫散射型屏幕、柱透镜型屏幕、菲涅尔透镜屏幕和黑条对比度增强屏幕等;按照表面的材料,可以分为玻璃屏幕、金属屏幕和白塑幕等;按照颜色还能分为白色屏幕和灰色屏幕。所有这些类型的屏幕都可以通过一些共有的特征参数来描述,如屏幕的尺寸、增益、可视角和对比度等等。下面对这些参数作简单的介绍。

1. 屏幕的尺寸

屏幕的尺寸由其大小和长宽比例来表示。屏幕大小一般指屏幕的对角线长度,在家庭、教室、会议室等场景下通常使用对角线长度为 100 英寸到 200 英寸的投影屏幕,而电影院里的投影屏幕则要大得多,例如 IMAX 影院里会使用长为 22 米,宽为 16 米(对角线长度为 27.2 米,即 1070.9 英寸)的超大屏幕[19]。而屏幕比例主要有 4:3 和 16:9 两种,而影院中有特殊的宽银幕屏幕,比例达到 2.35:1 以上[12]。

2. 屏幕的增益和可视角

屏幕是不发光的器件,只接收投影系统的照射光线,并将这些特定方向的光线漫射到所需要的区域内。对一个理想的漫射体而言,能将光线均匀地漫射到各

个方向上，这种漫射体被称为朗伯体。如果将朗伯体的增益定为 1，那我们就可以利用它作为参照，来标定出其它不同屏幕的增益值。一般而言，一个屏幕在某个方向上的增益 $G(\theta)$ 定义为：

$$G(\theta) = \frac{B_s(\theta)}{B_L} \tag{3.1}$$

其中， θ 是测量方向与屏幕法线方向的夹角， $B_s(\theta)$ 是这个方向上屏幕反射的亮度， B_L 是朗伯体反射的亮度。

由于投影屏幕的作用是令观看者能观看到尽可能高亮度的画面，而观看者通常是在屏幕水平方向上的某个角度范围观看的，因此一般需要将漫射光集中到一定的水平角度内，这个角度被称为可视角。对于一个理想的屏幕而言，当光能量集中到可视角时，其增益会大于 1，而在可视角之外的范围，增益等于 0，即观察者不能观看到投影画面。但实际的屏幕往往不会存在增益为 0 的区域。

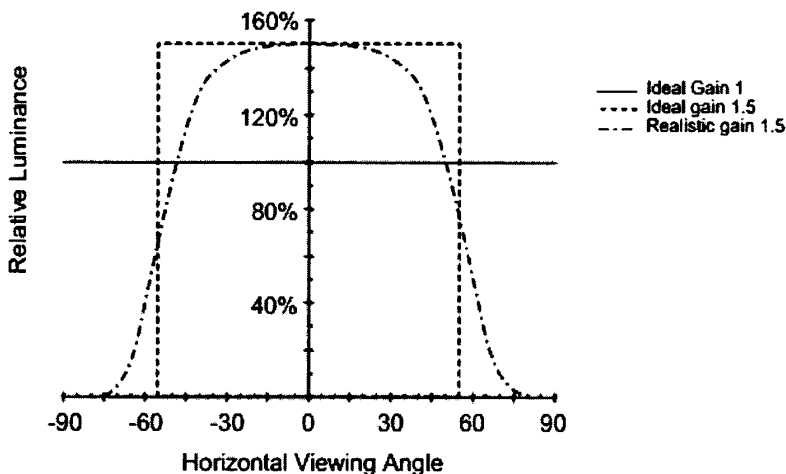


图 3-1 投影屏幕的增益与可视角

如图 3-1 所示，实线表示的是朗伯体，它在 0° 到 $\pm 90^\circ$ 范围内亮度都是相同的。虚线表示的是一个理想的屏幕，其增益为 1.5，其反射光全部都集中在 0° 到 $\pm 55^\circ$ 范围内，因此总可视角为 110° 。点划线表示的是实际的屏幕，由于其反射光绝大部分都集中在 0° 到 $\pm 55^\circ$ 范围内，范围外的光强极小，对总体照明的贡献可以忽略不计，因此我们将这个屏幕的增益也定为 1.5，总可视角为 110° [3]。

从上面的分析中我们容易知道，屏幕的增益与可视角一般成反比关系。因此，在不同的应用场景里，应当选择合适的屏幕增益与可视角参数，以获得较好的观看效果。例如，在家庭使用投影显示系统时，由于家用投影仪一般亮度较低，且

家庭观看人数较少，因此可以选择高增益、小可视角的投影屏幕；而在教室等场所使用投影时，观看人数一般较多，则需要选择高亮度的投影仪配合大可视角的投影屏幕。

3. 屏幕的对比度

屏幕的对比度是指屏幕将需要显示的画面光线与其他环境杂散光线区分开来的能力，可以表示为：

$$C_c = \frac{T_I - T_S}{T_I + T_S} \quad (3.2)$$

其中， T_I 是图像显示的光亮度， T_S 是环境杂散光的亮度。这里的亮度均是在暗环境下测试的。在投影显示中，画面是通过漫反射的形式令观察者看到的，而在这个过程中，来自周围环境的杂散光也会在屏幕上形成漫反射进入人眼。当环境光很强时，会对投影画面形成干扰，类似于在画面上叠加了一个白色背景光，造成观看画面的不清晰。因此，对比度是屏幕的一个重要的评价指标。要提高一个屏幕的对比度，则需要在保证画面亮度的前提下，降低它对环境杂散光的反射，提升显示画面的可观看性。

§ 3.1.2 前投影屏幕简介

前面提到，投影屏幕可以分为前投影屏幕和背投影屏幕。其中，前投影屏幕由于能适应大部分场合的使用，而且结构较为简单，因此是应用最为广泛的投影屏幕。前投影屏幕是对投影画面光线产生一定角度的漫反射，再让观看者接收到。根据反射材质的不同，一般分为白塑幕、玻珠幕、金属幕等。下面对这几种前投影屏幕分别作介绍。

1. 白塑幕

白塑幕是使用最普遍的前投影屏幕，一般通过在布料基底上涂上白色漫反射图层制成，反射特性接近于朗伯体，是一种增益接近于 1 且可视角接近 180° 的经典投影屏幕。由于白塑幕具有很大的可视角，因此可以应用在教室、会议厅、早期电影放映厅等面向多人投影的场景，令几乎来自所有观察角度的观看者都能够亮度大致相同的画面。但是，它的缺点也很明显。由于白塑幕对来自所有方向的光线都产生均匀的漫反射，因此当投影环境中杂散光很强时，也会被反射到观察者眼中，这样很容易造成图像对比度的降低，导致图像模糊不清。如果想在白塑幕上获得很好的投影效果，需要配备高亮度投影仪或者专门的暗室放映间。

2. 玻珠幕

顾名思义，玻璃珠幕是通过在屏幕基底上均匀地粘上一层玻璃微珠制成的，如图 3-2 所示。

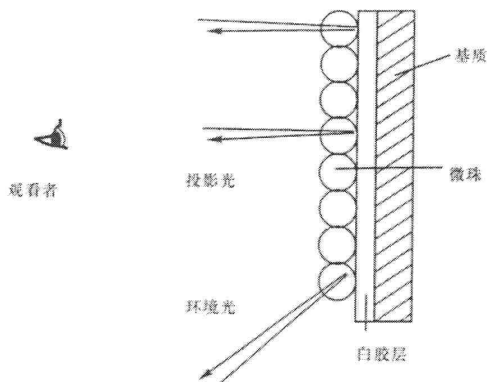


图 3-2 玻璃珠幕的结构

玻璃珠幕的特点是增益较高，但可视角相应较小。这是由于表面的玻璃微珠具有逆向反射效应。逆向反射效应的特点是入射光在一定范围的角度内入射时，反射光会沿着入射光的反方向并呈一定发散角返回。具有这种效应的器件有角反射器、球反射器等，其原理如图 3-3 所示。

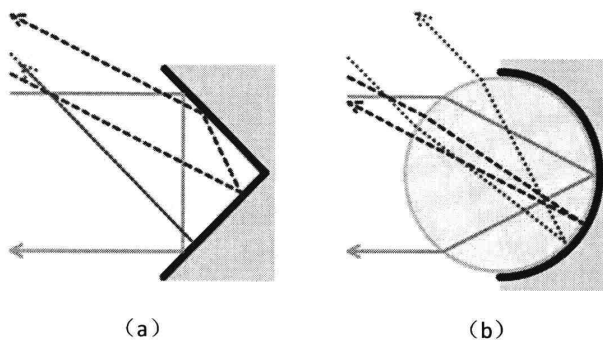


图 3-3 (a) 角逆向反射器 (b) 球逆向反射器

经过合理设计逆向反射器的角度或折射率等参数，能够令入射光大致上沿原路反射回去。因此，使用这种原理设计的玻璃珠幕，能够将投影到屏幕上的光线反射到投影仪的方向上。当投影仪在屏幕中线附近，以垂直于屏幕的方向照射时，若观看者同样处于屏幕中线附近进行观看，就能够看到亮度很高的画面。但玻璃珠在高增益的同时又仅有较小的可视角，因此比较适合观看人数较少，同时又需要高亮度显示的场合，比如家庭影院的投影。

3. 金属幕

金属幕是通过在幕布基底上喷涂特殊的金属粉粒制成的,其特点是表面颗粒感小,更为光滑。金属幕能够提供更多的镜反射光,因此增益特性与玻璃幕相似,具有较高的增益和较小的可视角。但是,金属幕的镜面反射特性容易在屏幕上形成一个亮斑,即投影镜头的反射像,这会影响画面的观看效果。通过将金属幕弯成一定曲率的弧面,并合理安排投影仪和观众的位置,可以将亮斑的影响减至最小。另外,由于金属颗粒具有良好的偏振保持特性,因此在需要应用偏振 3D 显示技术的场合,比如大部分 3D 电影放映厅内,常常会使用金属幕。

可以看到,为了应对不同的放映场景,我们通常需要在种类繁多、材质不同的投影屏幕中选择最为合适的一种。而在激光投影显示中,我们除了需要考虑投影亮度、可视角、对比度等因素之外,还需要考量屏幕对激光散斑的影响。实验证明,即使是同一台激光投影仪,它在不同的屏幕上仍会出现不同大小的散斑现象。下面我们对这种现象作一些理论分析。

§ 3.2 激光散斑与散射体间的关系

前面已经提到,一般的投影显示屏幕是一种漫散射体。在激光投影显示中,粗糙的漫散射屏幕会带来的随机相位延迟,导致画面上产生颗粒状的散斑噪声。散射体根据对光的散射方式可以分为两种,一种是面散射,即光在物体表面产生的散射,另一种是体散射,即光在散射体内部多次反射产生的散射。这两种散射方式的区别是:面散射中,光相位延迟是由表面高度的随机涨落决定的,而体散射中光的相位延迟是由光多次反射带来的随机光程引起的。通常的投影屏幕都是基于面散射方式,也有基于体散射方式的屏幕,如背投影散射硬屏[12]。

§ 3.2.1 面散射中散斑的性质

对于面散射方式中的散斑,主要考虑的是表面高度的随机涨落(表面粗糙度)与散斑对比度之间的关系[4][5]。如图 3-4 所示,利用特定的光路能够测量所要分析的量[6]。

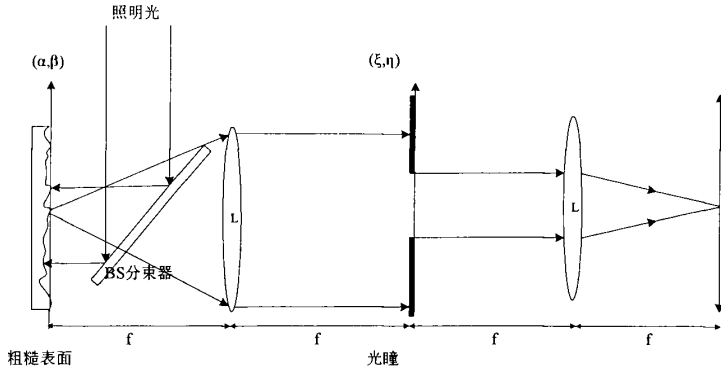


图 3-4 研究散斑对比度的成像光路

由上图中可知, 照明光经过分束器后垂直入射到测量表面, 则光波相位与表面涨落高度之间的关系表示为[7]:

$$\phi(\alpha, \beta) = \frac{2\pi}{\lambda} [1 + (\hat{o} \cdot \hat{n})] h(\alpha, \beta) \quad (3.3)$$

其中, \hat{o} 是指向观察点的单位矢量, \hat{n} 是粗糙表面向外的法线矢量, $h(\alpha, \beta)$ 是粗糙表面在 (α, β) 处的高度。当像点在光轴附近时, 上式的右边能简化为 $(4\pi/\lambda)h(\alpha, \beta)$ 。类似的, 相位涨落的方差与表面高度涨落的方差之间的关系为:

$$\sigma_{\phi}^2 = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 \sigma_h^2 \quad (3.4)$$

假设入射强度和平均强度反射率均为 1, 则紧靠粗糙表面的场振幅为:

$$\bar{a}(\alpha, \beta) = \exp[j\phi(\alpha, \beta)] = \exp\left[j\frac{4\pi}{\lambda} h(\alpha, \beta)\right] \quad (3.5)$$

像场在像空间可以写成卷积的形式:

$$\bar{A}(x, y) = \iint \bar{k}(x - \alpha, y - \beta) \bar{a}(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (3.6)$$

其中, 点扩展函数 $\bar{k}(\alpha, \beta)$ 是成像系统光瞳函数 $\bar{P}(\xi, \eta)$ 的傅里叶变换:

$$\bar{k}(\alpha, \beta) = \frac{1}{(\lambda f)^2} \iint \bar{P}(\xi, \eta) \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda f} (\alpha\xi + \beta\eta)\right] d\xi d\eta \quad (3.7)$$

由 (3.6) 式可以看到, 对于某个特定像点 (x, y) , 点扩展函数 $\bar{k}(x - \alpha, y - \beta)$ 是对粗糙表面到特定像点散射的散射加权。因此通过改变光瞳大小, 相应地改变了 \bar{k} 的值, 就可以控制表面对最终光强的贡献大小。这个贡献的大小由散射面上相关面积的独立贡献个数来定义, 表示为:

$$N = \begin{cases} A_k / A_\alpha & A_k \geq A_\alpha \\ 1 & A_k < A_\alpha \end{cases} \quad (3.8)$$

其中, A_k 表示点扩展函数在粗糙表面处的等价面积, A_α 表示振幅相关函数的等价面积。

有了上面的定义, 就可以求出散斑对比度的表示式为[8]:

$$C = \sqrt{\frac{8(N-1)\{N-1+\cosh[(4\pi\frac{\sigma_h}{\lambda})^2]\}\sinh^2[(4\pi\frac{\sigma_h}{\lambda})^2/2]}{N(N-1+\exp(4\pi\frac{\sigma_h}{\lambda})^2)^2}} \quad (3.9)$$

由上式可以看出, 对比度 C 与 N 和 σ_h/λ 有关, 即表面起伏对散射的贡献以及表面涨落高度标准差。这里主要考虑表面涨落高度对散斑对比度的影响。当散射平面是理想平坦的, 即 σ_h/λ 为 0 时, 散斑对比度为 0; 随着表面粗糙度的提高, σ_h/λ 增大, 散斑对比度也随之而增大; 当表面粗糙度与波长的尺度相当时 ($\sigma_h/\lambda=1$), 散斑饱和度 C 达到最大值为 1。值得注意的是, 当表面粗糙度远大于波长量级时, (3.9) 式不适用, 需要使用另外的计算方式。

对于理论模型, 我们考虑一个在自由空间反射光路的框架。假设入射到散射表面的光的功率谱在整个表面上是不变的, 并且可以用功率谱密度 $\mathcal{G}(v)$ 表示。

对两个散斑场 \mathbf{A}_1 和 \mathbf{A}_2 而言, 它们的归一化的交叉相关函数 μ_A 表示为:

$$\mu_A(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2) = M_h(\Delta q_z) \Psi(\Delta \mathbf{q}_t), \quad (3.10)$$

$\Delta \mathbf{q}_t$ 是散射矢量差 $\mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_2$ 的横向分量, Δq_z 是同一矢量差的法向分量的大小, 见下式:

$$\Delta q_z = \left| \frac{2\pi}{\lambda_1} [\cos\theta_{o1} + \cos\theta_{i1}] - \frac{2\pi}{\lambda_2} [\cos\theta_{o2} + \cos\theta_{i2}] \right| \quad (3.11)$$

其中, θ_i 指的是入射角, θ_o 指的是反射角。(3.10) 式中每一项受以下不同因素影响, 注意到, $M_h(\Delta q_z)$ 取决于表面高度涨落的均方根值和波长之比, 如果入射以及观察不在法线方向将会使表面高度涨落值减小, $\Psi(\Delta \mathbf{q}_t)$ 取决于两方面: 一是随着入射角或者观察角变化, 散斑图样会相对于观察点产生平移; 二是当波长变化时, 散斑图样相对于镜反射方向的中心缩小(波长减小)或者扩大(波长增大)。此外, 根据我们的假设, 在表面充分粗糙, 保证 \mathbf{A} 是一个圆形高斯随机过程的前提下, μ_A 大小的平方表示散斑强度的交叉协方差函数。

进一步, 我们在假设照明角和观察角都不变的情况下, 主要想研究因为波长(或者频率)的移动引起的散斑变化。通常情况下, 当波长移动时, 式(3-1)

等号右边的两项都会变化。然而,考虑特殊情况,如果入射角和观察角近似相同,也就是说 $\theta_i \approx \theta_o$,那么 $M_h(\Delta q_z)$ 就是最主要的影响,于是在接下来的讨论中,我们可以忽略掉 $\Psi(\Delta q_z)$ 这一项。

再令 $I(x, y; \nu)$ 表示当照明光频率为 ν 时 (x, y) 点的光强,于是在这一点的总强度可以由 $I(x, y; \nu)$ 对频率积分求得,积分时乘上归一化的功率谱密度函数作为其权重因子,即:

$$I(x, y) = \int_0^\infty \hat{G}(-\nu) I(x, y; \nu) d\nu \quad (3.12)$$

由于散斑对比度 C 与参数 M 的关系为:

$$C = 1/\sqrt{M} \quad (3.13)$$

M 是对频率积分所对应的自由度数,也可以解释为影响测量的散斑平均个数,有

$$M = \left[\int_{-\infty}^{\infty} K_{\hat{G}}(\Delta\nu) |M_h(\Delta q_z)|^2 d\Delta\nu \right]^{-1} \quad (3.14)$$

其中 Δq_z 是 $\Delta\nu$ 的函数,且有归一化功率谱的自相关函数:

$$K_{\hat{G}}(\Delta\nu) = \int_{-\infty}^0 \hat{G}(\xi) \hat{G}(\xi - \Delta\nu) d\xi \quad (3.15)$$

将两式代入,得到散斑对比度 C 的表达式:

$$C = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} K_{\hat{G}}(\Delta\nu) |M_h(\Delta q_z)|^2 d\Delta\nu} \quad (3.16)$$

假设表面高度涨落服从高斯分布,可以得到:

$$|M_h(\Delta q_z)|^2 = \exp(-\sigma_h^2 \Delta q_z^2) \quad (3.17)$$

其中,

$$\Delta q_z = \left| \frac{2\pi}{\lambda_1} - \frac{2\pi}{\lambda_2} \right| (\cos\theta_o + \cos\theta_i) = \frac{2\pi|\Delta\nu|}{c} (\cos\theta_o + \cos\theta_i) \quad (3.18)$$

对于激光投影显示中的激光光源,可以近似令光源的光谱为高斯型,于是取其单边归一化功率谱为

$$\hat{G}(\nu) \approx \frac{2}{\sqrt{\pi} \delta\nu} \exp \left[- \left(\frac{\nu + \bar{\nu}}{\delta\nu/2} \right)^2 \right] \quad (3.18)$$

其中, $\bar{\nu}$ 为光源光谱的中心频率 (正值) 的负值, $\delta\nu$ 为光谱的 $1/e$ 宽度 (正值), 而且满足假设 $\delta\nu \ll |\bar{\nu}|$, 于是有归一化功率谱的自相关函数为:

$$K_g(\Delta\nu) = \sqrt{\frac{2}{\pi\delta\nu^2}} \exp\left(-\frac{2\Delta\nu^2}{\delta\nu^2}\right) \quad (3.18)$$

将以上结果代入散斑对比度 C 的表达式得到:

$$C = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{1 + 2\pi^2\left(\frac{\delta\nu}{\bar{\nu}}\right)^2\left(\frac{\sigma_h}{\lambda}\right)^2(\cos\theta_o + \cos\theta_i)^2}}} \quad (3.19)$$

对于法向入射和法向观察的情况, $\theta_o \approx \theta_i \approx 0^\circ$, 上式简化为

$$C = \sqrt[4]{1/\left(1 + 8\pi^2\left(\frac{\delta\nu}{\bar{\nu}}\right)^2\left(\frac{\sigma_h}{\lambda}\right)^2\right)} \quad (3.20)$$

由上式可以看出, 在光的频率线度 $\delta\nu$ 一定时, 我们可以近似认为散斑对比度 C 满足 $C \propto 1/\sqrt{\sigma_h}$, 即当散射表面高度涨落标准差 (表面粗糙度) σ_h 增大时, 散斑对比度随之减小。这个结论适用于面散射体表面粗糙度大于光波长尺度的情况。

综合上面两种结论, 我们可以看到, 当面散射体的表面粗糙度接近于照明光的波长尺度时, 其散斑对比度最大 (理想情况下为 1)。而一般情况下, 投影显示屏幕的表面粗糙度均大于波长尺度, 在这种情况下, 当表面粗糙度越大时, 散斑对比度越小。我们将在下一节中对此进行分析。

§ 3.2.2 体散射中散斑的性质

对于体散射中散斑的性质, 我们作一些简单的介绍。当光线透过一个充满散射颗粒且具有一定厚度的散射体时, 光会在大量散射颗粒的作用下发生多重散射。如图 3-4 所示。

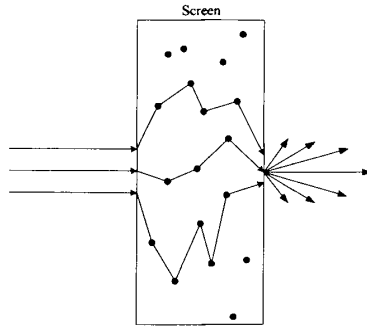


图 3-4 光在散射体内发生多重散射

由上图可见，三条光线在透过散射体时走过了不同的路径，故这三条光线的光程有所区别，相当于引入了不同的相位延迟。由于光线可能向任意方向散射，因此通过这种方式引入的相位延迟也是随机的。在散射颗粒足够多的情况下，多重散射的次数会非常多，不同光线间的光程可能相差非常大。因此，使用一个具有合适厚度的体散射片，会比面散射体更容易对散斑对比度造成降低[9]。

在激光显示系统中，也有利用体散射进行散斑抑制的研究。例如，使用聚合物分散液晶对散斑进行抑制[10]。聚合物分散液晶是利用低分子液晶与高分子预聚物产生聚合反应，使得液晶在聚合物中形成微米级的均匀分散形式。大量液晶微粒对光会产生多重随机散射，因此类似于体散射方式，对散斑有着极强的抑制作用。但是，体散射中的多重散射带来了光能的大量损耗，这在激光显示应用中是非常不利的。

§ 3.3 投影显示屏幕的表面特性测量

在前面我们提到，一般的投影显示屏幕是通过表面漫散射使得观看者能在一定角度内看到投影显示画面的。在这个过程中，屏幕表面的特性对画面质量有着重要的影响。例如，在激光投影显示中，屏幕的粗糙度影响着画面上的散斑对比度，而过大的散斑对比度会使得画面上出现明显的颗粒状噪声，严重降低画面质量。在本节中，我们将对不同种类的投影显示屏幕表面特性进行测量，并着重关注其表面形貌和起伏高度。

§ 3.3.1 测量对象与测量仪器

在测量中，我们选用了 17 种不同的投影显示屏幕，并一一进行编号。其

中，1 到 11 号屏幕是低增益的白塑幕，而 12 到 17 号屏幕都是增益在 1.4 以上的高增益屏幕。高增益屏幕又分为两类，一类是玻璃幕，编号为 12 到 15 号；另一类是金属幕，编号为 16 和 17 号。具体的编号与增益参数如表 3-1 所示。

表 3-1 屏幕编号与增益参数

低增益		高增益	
编号	增益	编号	增益
1	0.85	12	2.2 (玻璃)
2	0.9	13	1.7 (玻璃)
3	0.9	14	1.8 (玻璃)
4	0.8	15	2.4 (玻璃)
5	1	16	1.8 (金属)
6	1.2	17	1.4 (金属)
7	0.82		
8	0.9		
9	0.9		
10	1		
11	0.9		

为了精确测量以上屏幕的表面形貌与起伏高度，我们选择了型号为 Dektak XT 的布鲁克台阶仪作为测量仪器，如图 3-5 所示。

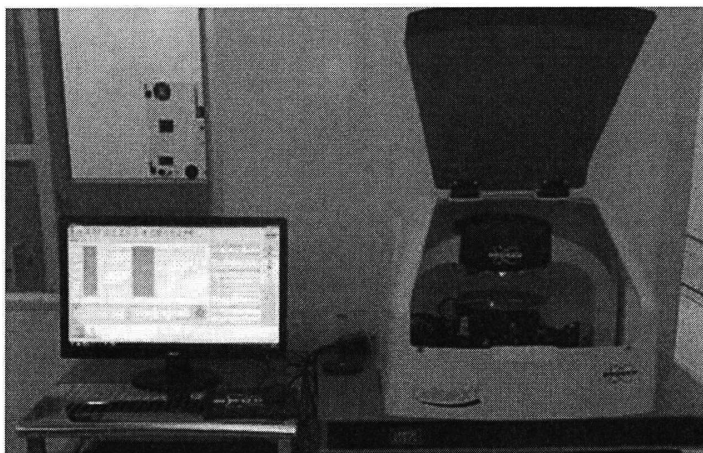


图 3-5 布鲁克台阶仪(型号: Dektak XT)

布鲁克台阶仪是一种探针式表面轮廓仪，其工作原理是利用悬浮在待测物体表面的精密探针，探针根据设定的扫描长度、速度和接触力在样品表面移动，随着样品表面的变化，链接在探针上的线性差动变压器接收处理变化的电信号。将变化的电信号转换成数字信号后，就能重现样品表面的起伏变化。其

技术指标为：台阶高度重现性低于 5\AA ， 1δ (1000\AA 标准台阶)；垂直分辨率为 1\AA (在 $6.5\ \mu\text{m}$ 范围内)；自动样品台，XY 行程达 150mm ，自动 360° 旋转；扫描长度 $50\ \mu\text{m}$ 至 55mm ，可达 $120,000$ 个数据点扫描；探针加力范围 1mg 至 15mg ；垂直测量范围可达 1mm 。利用这台布鲁克台阶仪，我们就测量纳米级样品的表面粗糙度，还可以测量并分析样品的三维形貌。

§3.3.2 测量结果与分析

利用布鲁克台阶仪，我们对 17 种投影显示屏幕逐一进行了测量，得到了每个屏幕上某个区域内的精细表面高度数据，并且生成了三维的表面形貌特性图。由 (3.20) 式我们知道，散射表面特性中与散斑对比度相关的是表面起伏高度标准差 σ_h ，以及表面起伏高度标准差相比于照明波长的量度 σ_h/λ 。表面起伏高度标准差的计算方式为：

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2} \quad (3.21)$$

其中， N 是测量点的总数， h_i 是测量点处测得的表面高度， \bar{h} 是表面高度的平均值。利用上式，并取照明光波长 $\lambda = 0.5\ \mu\text{m}$ ，我们计算出各个屏幕的 σ_h 及 σ_h/λ 值，如表 3-2 所示。

表 3-2 各个屏幕的表面起伏高度标准差计算值

编号	类型	表面起伏高度标准差 σ_h (μm)	σ_h/λ
1	白塑幕	12.05	24.10
2		15.03	30.06
3		19.67	39.34
4		17.37	34.74
5		1.57	3.14
6		1.77	3.54
7		10.92	21.85
8		7.66	15.32
9		3.19	6.38
10		9.34	18.68
11		19.56	39.12
12	玻珠幕	36.55	73.11
13		32.96	65.93
14		37.60	75.20
15		40.83	81.67
16	金属幕	11.11	22.23
17		2.12	4.25

由上表数据我们可以看到，所有 17 种屏幕的表面起伏高度标准差均大于波长尺度，因此，我们可以应用 (3.20) 式来分析表面起伏高度标准差与散斑对比度之间的关系。其中，5 号、6 号、9 号、17 号屏幕的表面起伏高度标准差和波长尺度较为接近 ($\sigma_h/\lambda < 10$)，因此可以预计，这四种屏幕的散斑对比度会比其它屏幕的散斑对比度要高。这将在下一节中进行具体分析。另外，四种玻璃幕的表面起伏高度标准差均远大于其它类型的屏幕，这是由于玻璃幕表面均匀铺满了玻璃微珠，玻璃微珠的直径决定了玻璃幕表面的起伏高度。

利用测得的表面高度数据，还能够生成屏幕的三维表面形貌图形。我们在白塑幕、玻璃幕和金属幕中各选取了两种表面起伏高度标准差相差最大的屏幕，对其三维表面形貌进行分析，如图 3-6、3-7、3-8、3-9、3-10、3-11 所示。

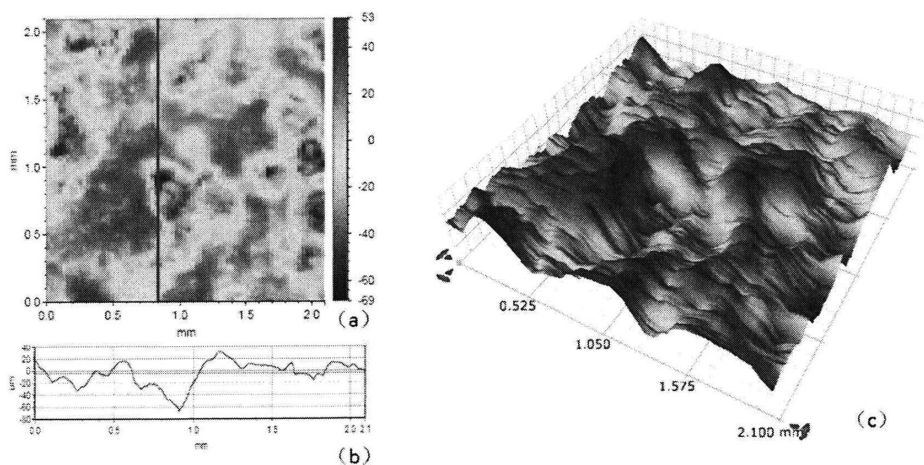


图 3-6 3 号屏幕的 (a) 二维轮廓图；(b) 红线处的一维高度图；(c) 三维形貌图

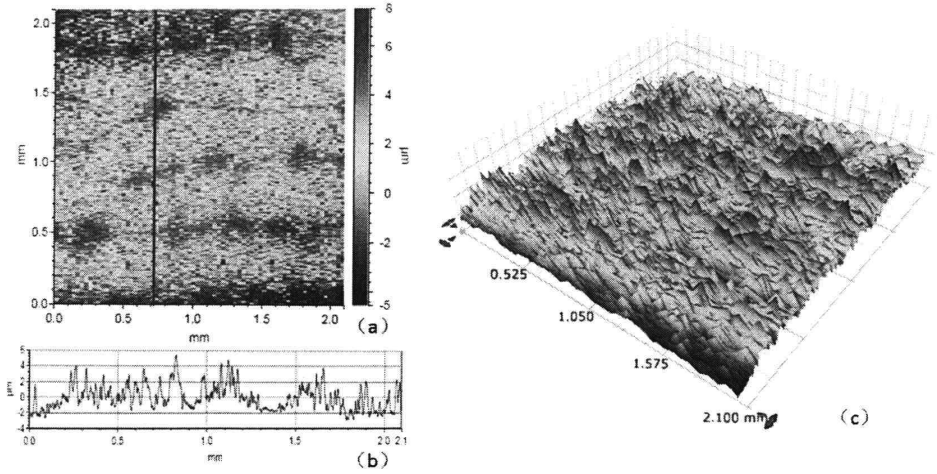


图 3-7 5 号屏幕的 (a) 二维轮廓图; (b) 红线处的一维高度图; (c) 三维形貌图

由图 3-6 和图 3-7 可以看出, 白塑幕的表面是典型的随机起伏形貌, 即在表面上较为均匀地出现隆起的“颗粒”。“颗粒”较大的 3 号屏幕, 高度的最大差值为 $80\ \mu\text{m}$ 左右, 表面起伏高度标准差为 $19.67\ \mu\text{m}$; “颗粒”较小的 5 号屏幕, 高度的最大差值为 $6\ \mu\text{m}$ 左右, 表面起伏高度标准差为 $1.57\ \mu\text{m}$, 因此我们称 3 号屏幕是表面粗糙度更大的屏幕, 并且可以估计 5 号屏幕的散斑对比度更高。

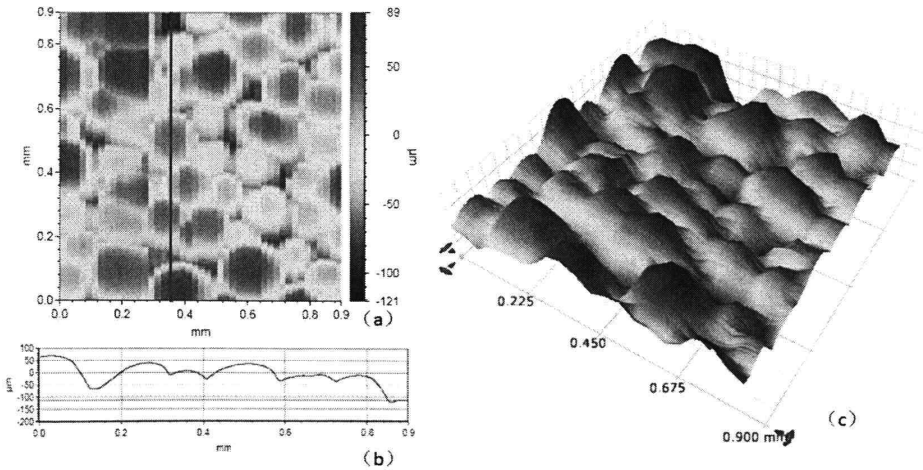


图 3-8 13 号屏幕的 (a) 二维轮廓图; (b) 红线处的一维高度图; (c) 三维形貌图

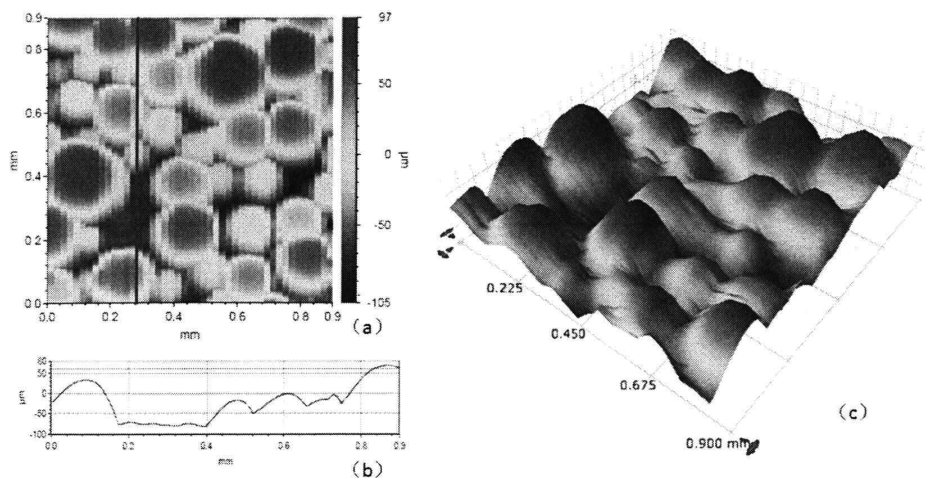


图 3-9 15 号屏幕的 (a) 二维轮廓图; (b) 红线处的一维高度图; (c) 三维形貌图

由图 3-8 和图 3-9 可以看出, 玻璃幕的表面形貌与白塑幕有明显的区别, 表面分布着大小不一的微球体, 即玻璃微珠。显然, 13 号屏幕表面的玻璃微珠直径总体较小, 因此表面起伏高度标准差同样较小, 为 $32.96 \mu\text{m}$; 15 号屏幕表面的玻璃微珠直径总体较大, 因此表面起伏高度标准差也同样较大, 为 $40.83 \mu\text{m}$ 。

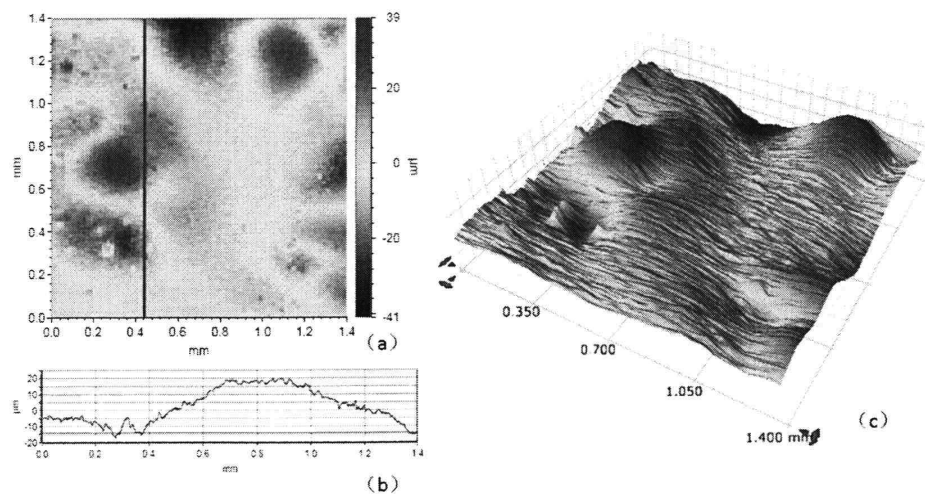


图 3-10 16 号屏幕的 (a) 二维轮廓图; (b) 红线处的一维高度图; (c) 三维形貌图

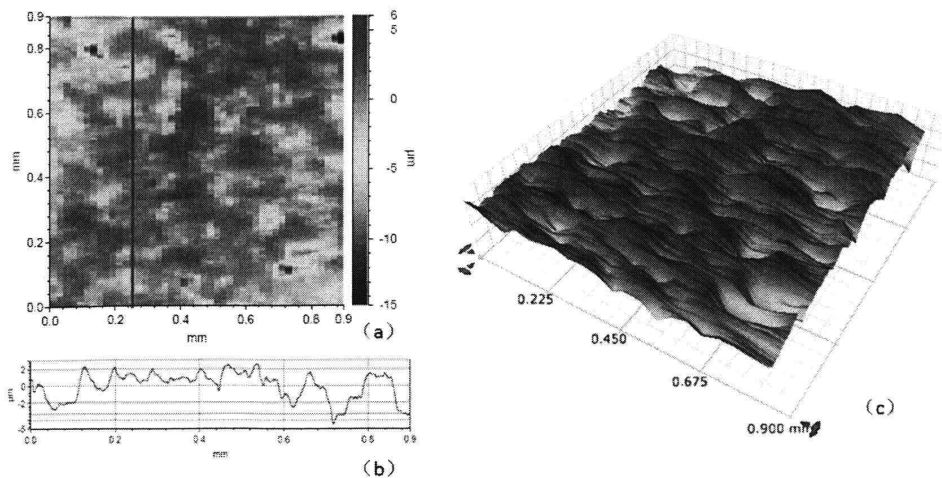


图 3-11 17 号屏幕的 (a) 二维轮廓图; (b) 红线处的一维高度图; (c) 三维形貌图

由图 3-10 和图 3-11 可以看出, 金属幕的表面起伏高度是比较平均的, 两种屏幕的二维轮廓图中都出现大面积相同颜色的部分。区别在于, 16 号屏幕表面出现了高度相差较大的“山峰”和“山谷”, 而 17 号屏幕表面主要是在较高的“平顶”上出现小的随机起伏。这些特点使得 16 号屏幕的表面起伏高度标准差较大, 为 $11.11 \mu\text{m}$; 17 号屏幕的表面起伏高度标准差较小, 为 $2.12 \mu\text{m}$ 。

可见, 几种不同类型屏幕的表面形貌有着很大的差别。这是因为屏幕具有不同的基底、喷涂方式、喷涂材料等物理属性, 这些属性会对屏幕的性能参数有所影响。在激光显示系统中, 屏幕的不同表面特性还会影响画面的散斑对比度。我们将在下一节中进行分析。

§ 3.4 投影显示屏幕的散斑特性测量

为了研究投影显示屏幕的表面特性与散斑对比度之间的关系, 需要先获得各屏幕的散斑对比度数据。一般的散斑测量方式是先利用 CCD 拍摄屏幕上的激光投影显示画面, 再通过计算获得散斑对比度。为此, 我们搭建了一套模拟人眼视觉的散斑测量平台, 并分别对 17 种屏幕的散斑对比度进行了测量。

§ 3.4.1 模拟人眼视觉的散斑测量平台

在显示应用中, 散斑最终会被人眼的视网膜接受, 才能被人所感知。因此, 对于显示屏幕的散斑对比度进行测量时, 我们需要使用模拟人眼的散斑测量平台, 才能获得更加准确的测量结果。搭建散斑测量平台时, 需要选择合适

的参数，使得 CCD 拍摄到的散斑特性与人眼中的散斑特性类似。其中，CCD 的光圈数、到屏幕的距离、对焦情况、积分时间、角度等参数[10]，以及变焦透镜的选择[14]都十分关键。最终，我们使用了上海图星公司研制的 ARTCAM-274KY-C 型 CCD 相机，其单个像素尺寸是 $4.4\mu\text{m}\times 4.4\mu\text{m}$ ，总像素数目是 $1600(\text{H})\times 1200(\text{V})$ ，积分时间为 40ms。在变焦透镜上选择了 Optotune 公司研制的可调焦液晶透镜，这是由于液晶材料与人眼内的透明介质有着极为相似的颜色特性与球差特性，如图 3-12 (a) 所示。搭建散斑测量平台选择的参数为：投影距离 3m；测量距离 1m；镜头像距 40mm；光阑大小 2mm；测量角度接近 0 度。整个平台的结构如图 3-12 (b) 所示。

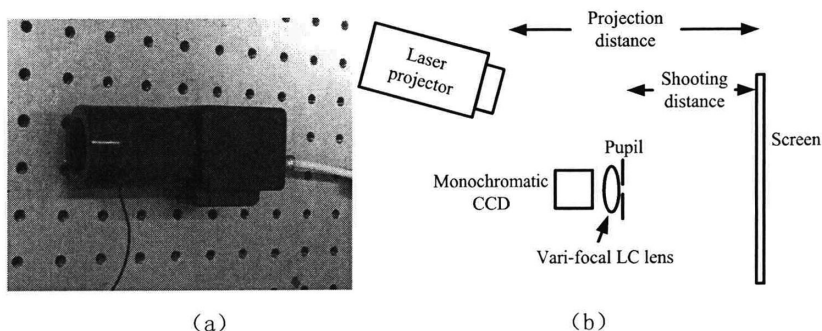


图 3-12 (a) CCD 相机与可变焦液晶透镜镜头 (b) 散斑测量平台示意图

在测量中，我们使用 CCD 对屏幕上人眼最为敏感纯绿色图像进行拍摄。所使用的投影系统是一台三基色激光投影仪。拍摄得到的画面如图 3-13 所示。

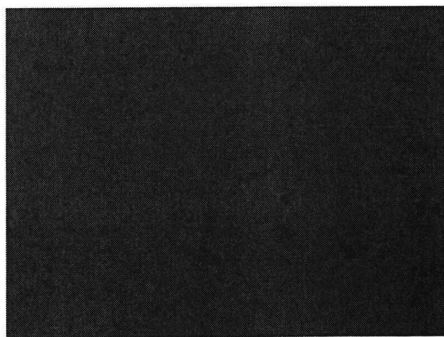


图 3-13 带有散斑的屏幕显示图像

由拍摄的图像我们能够读出 CCD 上各个像素点测得的图像灰度值，而图像灰度值对应的是该点的光强。在上一章中我们提到，散斑对比度与光强间的关系为：

$$C = \frac{\sigma_s}{\bar{I}_s} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (I_n - \bar{I})^2}}{\bar{I}} \quad (3.22)$$

其中, N 是总的像素数, I_n 是各像素点处测得的光强, \bar{I} 是平均光强。因此, 将各个像素点对应的灰度值代入上式, 就能算出屏幕所显示图像的散斑对比度。

§ 3.4.2 散斑对比度测量结果与分析

利用模拟人眼的散斑测量平台, 我们逐一对各个屏幕显示的图像进行了拍摄, 并相应地计算它们的散斑对比度。得到的结果如表 3-3 所示。

表 3-3 各个屏幕的散斑对比度与表面起伏高度标准差

编号	类型	散斑对比度 C	表面起伏高度标准差 σ_h (μm)
1	白塑幕	2.77%	12.05
2		2.90%	15.03
3		2.98%	19.67
4		3.11%	17.37
5		5.05%	1.57
6		6.29%	1.77
7		3.08%	10.92
8		3.17%	7.66
9		4.52%	3.19
10		2.66%	9.34
11		2.41%	19.56
12	玻珠幕	3.14%	36.55
13		3.35%	32.96
14		4.67%	37.60
15		3.55%	40.83
16	金属幕	4.84%	11.11
17		7.81%	2.12

上表中同时列出了屏幕的散斑对比度 C 和表面起伏高度标准差 σ_h , 这是为了方便将这两个值作比较。由于我们使用的激光投影系统中已经带有一定的散斑抑制措施, 因此测得的散斑对比度均不算很高。可以看到, 在白塑幕中, 5号、6号和9号屏幕的散斑对比度较高, 相应地也具有比较小的表面起伏高度标准差, 这与前面的预计相符合。而玻珠幕的表面起伏高度标准差尽管比其它屏幕要大得多, 但散斑对比度并没有明显小于其它屏幕。这是由于玻珠幕表面布

满了透明的玻璃微珠，而光照射到玻璃微珠的上表面时并不会产生漫反射，而是透过了玻璃微珠，并在屏幕的基底上产生漫反射。因此，玻璃屏的表面高度起伏标准差并不能反映其实际的散射特性。所以，我们在下面的分析中将玻璃屏排除在外。

在 3.2 节中我们分析过，当散射表面的表面高度起伏标准差大于波长尺度时，表面的散斑对比度 C 与表面高度起伏标准差 σ_h 之间近似地满足 $C \propto 1/\sqrt{\sigma_h}$ 的线性关系。我们对 1-11、16、17 号屏幕的 C 和 $\sqrt{\sigma_h}$ 数据做线性拟合，如图 3-14 所示。

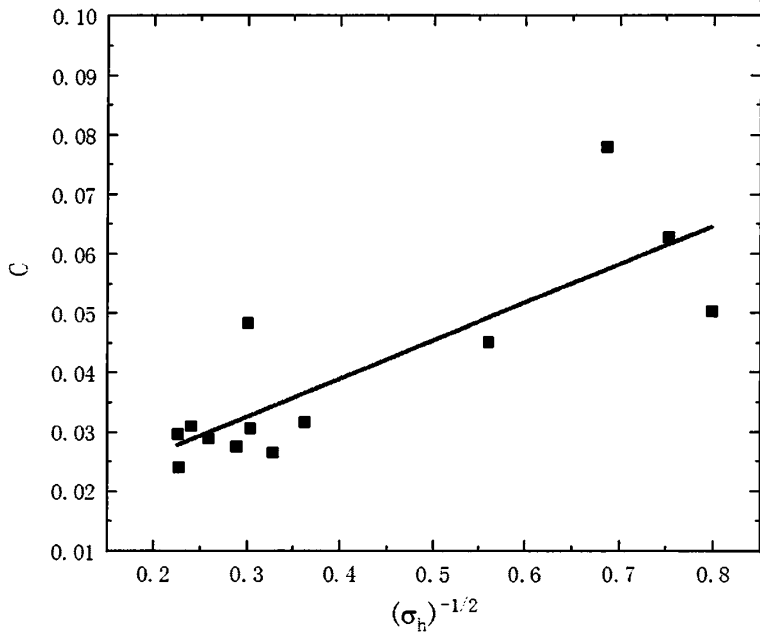


图 3-14 C 和 $1/\sqrt{\sigma_h}$ 数据之间的线性拟合

可以看到，上述的 13 种屏幕的散斑对比度 C 与 $1/\sqrt{\sigma_h}$ 之间近似地满足线性关系，与理论的符合度较高。因此，我们可以用 (3.20) 式来对表面高度起伏标准差大于波长尺度的漫散射屏幕的散斑对比度进行估计。但值得注意的是，当照射到屏幕的光是部分相干光时，不能使用 (3.20) 式来直接计算散斑对比度。但是可以通过比例的方法，利用已知屏幕的散斑对比度对另一个屏幕的散斑对比度作估计。

另外，由图 3-14 的趋势我们知道，在使用同一套激光显示系统对不同屏幕进行投影时，屏幕的表面高度起伏标准差越大，则画面的散斑对比度越低。因此，在屏幕的增益、可视角、对比度等参数相近时，如通常的白塑幕，我们应

尽量选择更粗糙的投影屏幕来进行激光显示以抑制散斑。但是，这对某些具有特殊表面的屏幕并不适用，如玻璃幕。而屏幕在进行高增益的设计时，常常会使用这样的特殊表面或材料。对比我们测量的高增益屏幕，玻璃幕相比于金属幕具有更高的增益，同时又具有更低的散斑对比度。这是因为两种屏幕提高增益的方法不同。玻璃幕是通过玻璃微珠的逆向反射效应提高增益的，而金属幕是通过增强幕面的镜反射分量来提高增益的。显然，后者需要更加光滑的表面，相应地也提高了散斑对比度。因此，玻璃幕更适合作为一般的激光显示投影高增益屏幕使用。

§ 3.5 本章小结

本章我们从散斑的理论出发，得到了漫散射面的散斑对比度与表面起伏程度之间的关系。在分别对投影屏幕的表面形貌与散斑对比度进行了一系列的测量与分析之后，我们发现实际的测量结果一定程度上与理论符合。因此在理论的指导下，我们能够更合理地选择适合激光投影显示系统的投影屏幕。具体而言，我们的工作可以分为：

1. 从理论入手，分析漫散射屏幕的散斑特性，发现当屏幕的表面粗糙度大于照明光波长尺度时，其散斑对比度 C 与表面起伏高度标准差 σ_h 之间有直接的关系，并得出两者之间的关系式可以简化为 $C \propto 1/\sqrt{\sigma_h}$ ；

2. 利用精密的探针式表面轮廓仪对 17 种屏幕的表面起伏高度与表面形貌进行测量，并对白塑幕、玻璃幕、金属幕等三种不同类型的投影屏幕进行分析，发现所测量屏幕的表面起伏高度标准差均大于照明光波长尺度，且不同类型屏幕的表面形貌有着很大的差别。

3. 搭建了一套模拟人眼视觉的散斑测试平台，并对 17 种屏幕的散斑对比度进行测量。将得到的数据与前面的表面形貌与起伏高度结合分析，我们发现除了玻璃幕以外，其它 13 种屏幕都较为符合 $C \propto 1/\sqrt{\sigma_h}$ 的线性关系，因此对于普通的投影屏幕我们可以使用它的表面起伏高度对其散斑对比度进行估计。另外，对玻璃幕和金属幕的增益及散斑对比度参数分析表明，玻璃幕更适合作为激光投影显示中的屏幕使用。

参考文献

- [1] Alter L. 1995-11-28. Theater design: U.S. Patent 5,469,669[P].
- [2] 刘旭, 李海峰. 2007. 现代投影显示技术[M]. 浙江大学出版社.
- [3] Brennesholtz M S, Stupp E H. 2008. Projection displays[M]. John Wiley & Sons.
- [4] Brogioli D, Vailati A, Giglio M. 2002. Heterodyne near-field scattering[J]. Appl. Phys. 81: 4109.
- [5] Giglio M, Carpineti M, et al. 2000. Space intensity correlations in the near field of scattered: A direct measurement of the density correlation function $g(r)$ [J]. Phys Rev Lett. 85: 4109
- [6] Fuji H, Asakura T. 1974. Effects of surface roughness on the statistical distribution of image speckle intensity[J]. Optics Commun. 11:35-38.
- [7] Goodman J W. 1975. Statistical properties of laser speckle patterns: Laser Speckle and Related Phenomena[M]. Vol 9. Heidelberg: Springer Berlin , 9-75.
- [8] Goodman J W. 曹其智, 陈家碧译. 2008. 光学中的散斑现象--理论与应用[M]. 科学出版社.
- [9] Thompson C A, Webb K J, et al. 1997. Diffusive media characterization with laser speckle[J]. J Opt Soc Am A. 14: 2269-2277.
- [10] 董磊. 2013. 激光三维显示中散斑抑制及散斑测量. [D:[博士]]. 合肥: 中国科学技术大学.
- [11] 崔哲. 2015. 激光显示中关键科学技术问题的研究. [D:[博士]]. 合肥: 中国科学技术大学.

第四章 基于激光显示颜色阈值实验的光源谱宽优化

回顾现代彩色显示技术的发展历程,平板显示从 CRT 显示、液晶显示、等离子显示等技术发展到量子点显示技术,投影显示则从高压汞灯、LED 技术发展到了激光投影技术。其发展趋势都是由小色域、低饱和度、宽光谱光源的技术向大色域、高饱和度、窄光谱光源技术不断前进。这是源于人们对显示技术一直追求更丰富的色彩,更艳丽的画面。然而,在研究激光显示技术的过程中我们发现,尽管光谱越窄时对应的显示饱和度越高,色域越大,但是对应的光源时间相干性也随着光谱变窄而提高,导致消散斑的难度增加。近年来已经提出了许多通过拓宽光源光谱宽度抑制散斑对比度的方案,但在如何确定最优的谱宽这个问题上仍没有定论。在本章中,我们基于人眼的色觉分辨力,研究激光显示中最佳的光源谱宽,希望在提高色彩饱和度与降低散斑对比度之间找到一个合理的平衡。

§ 4.1 颜色科学的基本概念

颜色感觉是外界光刺激作用到人的感觉器官产生的感觉,因此颜色科学是一个交叉学科,涉及了许多学科,包括生物学、生理学、心理学和物理学等。为了对颜色这个概念进行量化和统一,国际照明委员会(CIE)最早制定了一系列的标准色度系统。通过这些色度系统,我们能够对颜色进行科学的、定量的、系统的讨论。这也是现代色度学的基础。以下我们都是基于 CIE 标准色度系统对颜色进行讨论。首先我们从视觉的生理基础开始,介绍颜色科学的基本概念。

§ 4.1.1 视觉生理基础

人对颜色的感知除了取决于光物理特性之外,还取决于人眼的视觉特性,因此必须了解人眼的构造对颜色视觉的影响。人的眼镜呈球状,直径约 24 毫米,眼球的大部分外壁由三层膜构成。外层前部的 1/6 称为角膜,后部 5/6 称为巩膜,主要起保护作用。中层从前到后分三部分,即虹膜、睫状体和脉络膜。内层是视网膜。眼球的内部主要为玻璃体和晶状体。光通过角膜进入人眼,通过晶状体、玻璃体等到达眼底视网膜[1]。人眼的结构如图 4-1 所示。

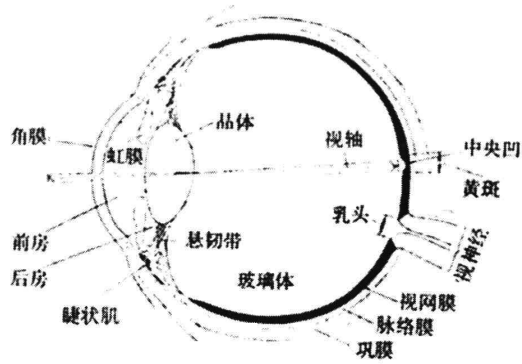


图 4-1 眼球结构示意图

眼球主要分为屈光系统和感光系统两部分。其中，屈光系统就是成像系统，负责将不同距离的物体成像到感光系统上。屈光系统包括有：

1. 角膜。位于眼球正前方，厚度约 0.55mm，直径约 11mm。角膜内介质的平均折射率约为 1.336，因此具有屈光能力。
2. 前房与房水。位于角膜与晶状体之间，能够维持血管组织的新陈代谢和眼内压。房水的折射率为 1.336，与角膜基本相同。
3. 晶状体。位于玻璃体与虹膜之间，厚度为 3.6mm~4.4mm，直径约 9mm，由外到内折射率为 1.386~1.437，屈光能力比角膜要高。晶状体是一种弹性透明体，通过睫状肌的收缩与舒张能够改变它的屈光能力，使得不同远近的物体都能够在视网膜上清晰成像。
4. 玻璃体。位于晶状体与视网膜之间，折射率为 1.336，厚度一般为 22 毫米。

而人眼的感光系统即是视网膜。视网膜主要由三层细胞构成，其结构如图 4-2 所示。

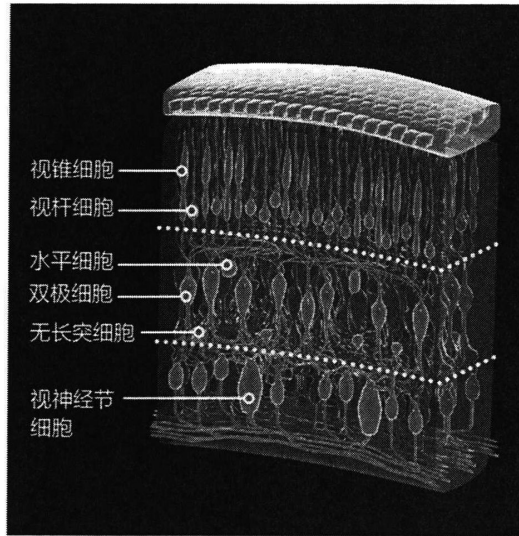


图 4-2 视网膜结构示意图

其中，最外面的一层是感光细胞层，包括了视锥细胞和视杆细胞两种。视锥细胞的颜色分辨能力强，但是感光能力低，在环境明亮时起主要作用；视杆细胞感光能力强，但是不能很好地分辨颜色，在环境较暗时起主要作用。中间的一层包括水平细胞、双极细胞和无长途细胞，其中双极细胞占主要部分。而第三层是神经节细胞层，主要含有视神经节细胞，它们与视神经联接，主要负责传递视觉刺激。视网膜中，视杆细胞和视锥细胞的分布是不均匀的。在视网膜中央处的 2-3mm 范围内视锥细胞十分密集，称为黄斑。黄斑的中间有一个凹窝，称为中央凹，这里的视锥细胞密度最大，是人眼视觉最敏锐的区域。黄斑和中央凹对应的视角范围大约是 3° ，一般对颜色的测定都在此范围内。

在了解了人眼生理构造的前提下，大量学者开始了对人眼颜色分辨机理的研究，并提出了不同的学说，这当中最重要的是三原色学说、对立颜色学说与阶段学说。其中，阶段学说是前两种学说的归纳与总结。下面对其进行介绍。

阶段学说认为人的颜色视觉过程如图分为几个阶段[2]：第一阶段是感光细胞的色响应。其中视杆细胞的响应成为暗视觉的亮度响应 $V'(\lambda)$ 。而视锥细胞则分为三种不同类型，它们分别含有三种不同的视色素，根据吸收光谱的峰值不同被称为亲蓝、亲绿和亲红视色素。当外界的光进到入眼时，三种视锥细胞按各自的吸收特性对光进行吸收，视色素吸收光子能量后产生光化学反应被漂白，同时引起视神经活动，将视觉信息通过双极细胞和视神经节细胞传到神经中枢。三种视色素的漂白程度与红绿蓝（RGB）三色的色响应强度相关。这也是视觉中三原

色的由来。第二阶段是对三色信号进行处理。如下图所示，R、G、B输出经过适当组合后会形成明视觉亮度响应 $V(\lambda)$ ，而R、G输出的一部分合成黄色信号(Y)，然后传递到双极细胞进行处理。在这里，黄-蓝和红-绿是两对相互对立的颜色编码，也就是当黄色刺激更强时蓝色受到抑制，而当蓝色刺激更强时黄色受到抑制，红绿两种颜色也是如此。这样便能得到对立色响应Y-B和R-G。视神经将这些响应信号传递到大脑进行进一步处理后，便形成颜色视觉。

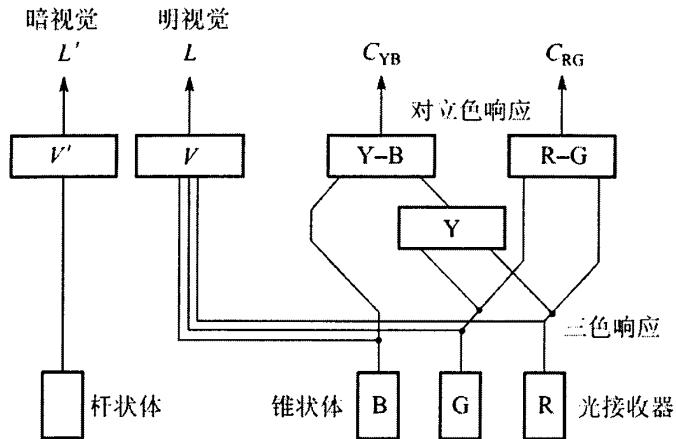


图 4-3 阶段学说的颜色视觉过程

由于光线进入人眼后最终都会被处理为刺激响应信号，才能被人所感知，因此如果两种光源具有不同的光谱曲线，但它们会形成一样的刺激，那么在人眼看来这两种光源具有一样的颜色。这个特性是进行颜色匹配实验、颜色复现、三基色显示等应用的基础。

§ 4.1.2 视觉心理物理实验

颜色是一种感觉经验，为了定量测量这种感觉经验与实际物理量之间的关系，必须发展一套相应的方法。这种方法源于 19 世纪德国科学家费希纳提出的心理物理学[3]。对于视觉而言，心里物理学方法的目的是通过严谨的实验，研究人类的主观感觉与外界光刺激之间的量化关系。视觉心理物理实验是现代颜色科学的发展基础。

与其它学科的实验类似，视觉心理物理实验中的变量也分为自变量、因变量和控制变量三种。[4]一般而言，视觉心理物理实验中的自变量包括外界光刺激以及被试者特征。外界光刺激又可以分为主体颜色和背景颜色等。被试者特征主要体现了被试者的个体差异，如年龄、人种、视力、色彩辨析能力等等。相应地，视觉心理物理实验中的因变量是指被试者对光刺激产生的主观感知。值得注意的

是，一般我们在单次实验中只对一种自变量进行研究，此时必须对其它变量加以控制，才能够得到有效的实验结果。例如，在某次实验中我们只关注主体的颜色亮度属性，因此需要控制背景亮度、颜色、被试者个体差异等变量，使得它们不会对因变量产生影响。这就是视觉心理物理实验中的控制变量。

视觉心理物理实验主要分为三种：阈值实验、匹配实验和分度实验，它们的适用性有所不同。其中阈值实验与匹配实验一般用来测量微小的色刺激变化量和视觉主观感受之间的关系，而分度实验一般用以研究视觉感知的大小与色刺激的量化关系。下面分别作一些介绍。

阈值实验方法能够测定人对刺色激恰好能觉察的阈值。阈值分为绝对阈值和相对阈值两种，绝对阈值表示色刺激从零开始变化时人眼刚好能够分辨的值，相对阈值指色刺激在一定基础上变化时人眼刚好能够分辨的值。阈值实验在很多视觉研究中都扮演着重要角色，例如色差分辨研究。我们可以通过不同的实验设计方法来进行阈值实验：（1）调整法，即是让被试者对色刺激的大小进行调整，直到恰好能够分辨的程度，最终取多次平均作为阈值。这种方法的特点是容易操作，但也容易受到被试者个体差异的影响，造成结果不准确；（2）界定法，即在规定初始色刺激的情况下，改变色刺激值并让被试者界定感知的阈值；（3）恒定刺激法，即先围绕阈值附近的范围取若干个不同强度等级的色刺激，然后将每一个等级的色刺激随机让被试者观察，要求被试者做出是否有感知差异的判断。通过这种方法能够得到每个强度等级的色刺激被感知的概率，从而得到完整的概率分布。一般的阈值是概率为 50% 时对应的值。

匹配实验方法的设计与阈值实验非常类似，但目的不同。匹配实验是为了找到具有同样感知量的色刺激。通过同色异谱匹配实验能够得到人眼光谱三刺激值，这是色度学的基础。我们将在下一小节中进行详细介绍。

分度实验方法是为了对颜色感知量的大小进行量化，因此需要选择合适的数学方法来确保实验的精度。通过采取名义分度、顺序分度、间隔分度或比例分度等不同精度的分度方法，能得到一定准确度的感知物理量[12]。

由于色觉心理物理实验涉及人的主观感知，因此会受到很多因素的影响，其中以被试者的特性最为复杂。在进行视觉实验时，需要通过合理的设计，排除对实验产生额外影响的因素，以保证实验的准确性。

§ 4.1.3 颜色匹配实验与三刺激值

前面已经提到，颜色匹配实验是一种心理物理实验，它是计算人眼光谱三刺激值的前提，也是现代色度学的基础。

颜色匹配实验的是利用色光的混合，将待测颜色与几种色光的混合色作比较。

一般而言,选用红、绿、蓝三原色光进行混合。如图 4-4 所示,三原色光对白屏的上半部分进行照射,待测色光对屏幕的下半部分进行照射,两部分用一块黑色挡屏分开,观察者同时对两块区域的颜色进行观察。通过调节三原色光的强度,混合色光的颜色不断改变,直到观察者不能区分待测色光与混合色光时,认为这两种颜色相互匹配。

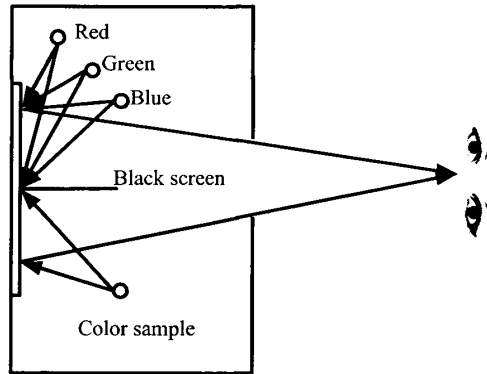


图 4-4 颜色匹配实验系统示意图

在大量颜色混色匹配实验的基础上,格拉斯曼提出了一系列定性规律,称为格拉斯曼定律。即:(1)人眼只能分辨颜色的明度、色调、饱和度变化;(2)在混合色中,如果改变其中一个成分颜色,则混合色的外观也随之而改变。(3)具有相同外貌的颜色,无论其光谱组成如何,均具有相同的颜色混合效果。也就是说我们能够用一种混合色代替另一种所需颜色。(4)组成混合色的各种成分色光的总量度等于混合色的总量度。

格拉斯曼定律奠定了现代色度学的基础,但格拉斯曼定律只是对色光混合过程的定性阐述,而定量的表示则需要用到颜色匹配方程:

$$C[C] = R[R] + G[G] + B[B] \quad (4.1)$$

在这里[C]代表被匹配的色光,[R]、[G]、[B]代表用于混合的红绿蓝三原色,C、R、G、B分别代表被匹配色光的数量、红光的数量、绿光的数量,蓝光的数量。因此,任意一种颜色都能够通过混合不同数量的红绿蓝三原色光来得到,而红绿蓝光的数量被称为三刺激值。对于某种波长的单色光(即光谱色),也能够通过颜色匹配实验得到一组三刺激值,称为光谱三刺激值,用 \bar{r} 、 \bar{g} 、 \bar{b} 表示。其过程为:

$$C_{\lambda} = \bar{r}[R] + \bar{g}[G] + \bar{b}[B] \quad (4.2)$$

当我们已经测出可见光谱范围内所有的光谱三刺激值,就可以利用它们表示任意一种光的颜色,方法是先得到待测光的光谱分布为: $\varphi(\lambda)$,再按波长加权光

谱三刺激值，之后进行积分，就得到待测光的三刺激值为：

$$\begin{cases} R = \int \varphi(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda \\ G = \int \varphi(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda \\ B = \int \varphi(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (4.3)$$

如果对 (4.1) 式两边各除以 $R+G+B$ ，并令 $C=R+G+B$ ，则有：

$$[C] = \frac{R}{R+G+B} [R] + \frac{G}{R+G+B} [G] + \frac{B}{R+G+B} [B] \quad (4.4)$$

由上式可见，单位颜色 $[C]$ 的色品只与 R 、 G 、 B 各自在总量 $R+G+B$ 中的比例有关，这个比值被称为色品坐标。这是后面要介绍的标准颜色空间的基础。

§ 4.1.4 CIE 1931 标准色度系统

为了测定某个色光的三刺激值，我们需要先测定光谱三刺激值，但是，不同的三原色的选择会带来数据的不统一，而且不同观察者所测的数据也需要进行平均并定为标准。1931 年，CIE 会议上提出了最早的 CIE 标准色度系统——CIE 1931- RGB 系统。在这个系统中，选用了 700nm （红）、 546.1nm （绿）和 435.8nm （蓝）作为三原色光。通过测定可见光范围内的光谱三刺激值，并转换为光谱色品坐标，能够得到 CIE 1931- RGB 系统中的色品坐标曲线为：

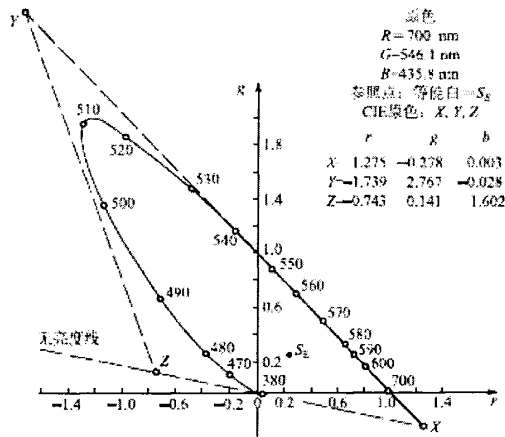


图 4-5 CIE 1931- RGB 系统色品图

色品坐标定义为：

$$r = \frac{\bar{r}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}} \quad g = \frac{\bar{g}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}} \quad (4.5)$$

由图 4-5 可以看到，在 CIE 1931- RGB 系统色品图中，存在负数的色坐标值，

即对应的光谱三刺激值也是负数。负数出现的物理意义能用其颜色匹配实验的过程来理解：当某些光谱色用三原色来匹配时，不管如何调节三原色的强度都无法使颜色匹配，只有在被匹配的光谱色内添加某种原色之一才能够达到颜色匹配，因此加在光谱色一侧的原色就用负数表示。负数的出现会导致计算不方便，而且也不便理解。因此，CIE 规定了更为易用的一套标准色度系统：CIE 1931-XYZ 标准色度系统。相比 CIE 1931-RGB 系统而言，CIE 1931-XYZ 标准色度系统用三个假想的原色 [X]、[Y]、[Z] 代替了原来的三原色，将光谱三刺激值和色品坐标都优化到了正值。CIE 1931-XYZ 标准色度系统中，光谱色的色品图如下：

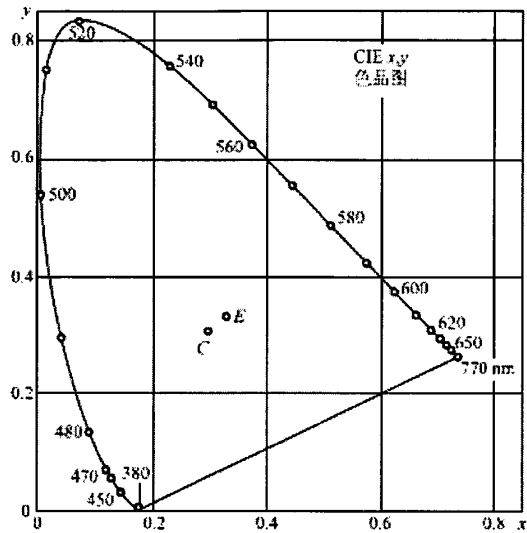


图 4-6 CIE 1931-XYZ 系统的光谱色色品图

图 4-6 中马蹄形的区域包含了物理上能实现的所有人眼感知颜色。由于 CIE 1931-XYZ 标准色度系统只是对三原色进行了更换，本质上还是来源于 CIE 1931-RGB 标准色度系统，因此两个色度系统之间是可以互相转换的。一般的转换方法是进行坐标转换：

$$\begin{cases} [X] = R_x[R] + G_x[G] + B_x[B] \\ [Y] = R_y[R] + G_y[G] + B_y[B] \\ [Z] = R_z[R] + G_z[G] + B_z[B] \end{cases} \quad (4.6)$$

从上式可以看出，通过在 RGB 系统中，对 XYZ 系统的三原色 [X]、[Y]、[Z] 做颜色匹配，得到的三刺激值就可以构成坐标转换关系矩阵。而经过运算，由 RGB 系统向 XYZ 系统转换的矩阵为：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.77 & 1.75 & 1.13 \\ 1.00 & 4.59 & 0.06 \\ 0.00 & 0.06 & 5.59 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

因此,我们能够通过坐标转换的方式将两个色度系统互相转换。在 CIE-rgb、CIE-XYZ 系统的基础上又发展出了许多不同用途的色度系统,但通过特定的坐标变换我们可以将其统一到同一个色度系统中作比较。

在规定了标准色度系统之后,我们进行颜色的定量研究时可以直接使用色品坐标作计算,需要形象地表现颜色时也能方便地使用色品图表示。而在之后的讨论中,我们也将主要在 CIE-XYZ 空间中进行。

§ 4.1.5 人眼的颜色分辨能力

上面介绍的标准色度学系统解决了颜色的量化问题,即利用三刺激值来标定颜色。当两个颜色的三刺激值相同时,我们可以认识这两个颜色的外貌相同。但是,两种颜色的差异程度并不能通过三刺激值的差值来简单判断。这是因为实验证明对于两对颜色,虽然它们三刺激值差相同,但这两对颜色间的差异引起人眼视觉的感知量并不相同。因此,必须通过实验对人眼的颜色分辨能力做研究,才能更好地对颜色的差别作定量分析。

前面提到,在 CIE x-y 色品图内每一点都代表一个颜色。当颜色发生变化时,如果对应的色品坐标移动的距离很小,那人眼将不能分辨其变化,而认为是同一种颜色。当人眼恰好能将两种颜色分辨出来时,在色品图内对应的距离被称为恰可察觉差。由于 CIE x-y 空间一个二维颜色空间,因此某一个颜色点与其恰好能分辨的颜色点构成的是一个区域,这个区域称为人眼的颜色宽容量。其中,麦克亚当在 CIE x-y 色品图上的选择了 25 个不同位置的色品点,专门设计了仪器来确定它们的颜色宽容量,结果如图 4-7 所示[6]:

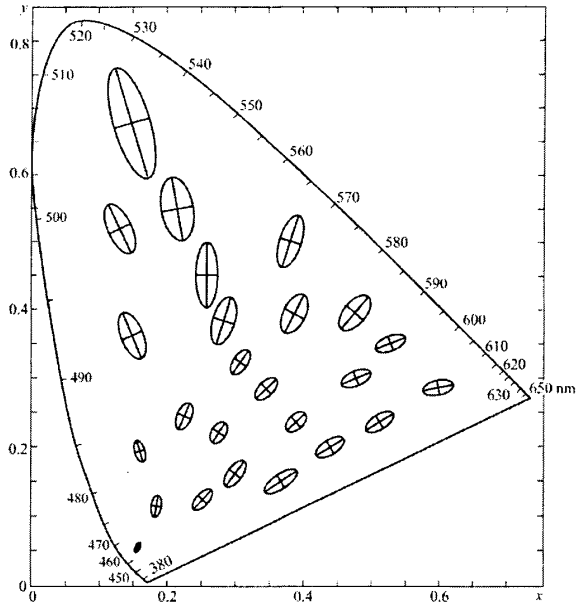


图 4-7 麦克亚当测定的颜色宽容量

图中的椭圆代表了该位置的颜色宽容量，椭圆的大小是按实验结果放大 10 倍绘制的。可以看出，颜色的宽容度在色品图的各个位置上差异很大，如蓝色的宽容量很小，而绿色的宽容量很大，因此在蓝色部分同样大小的空间内人眼能分辨更多种类的颜色。CIE x-y 色品图中各个位置的颜色差异是不均匀的，这给色差的评价带来了困难。为了色差测定问题，必须选择合适的颜色空间，使得空间内两点间的距离尽可能代表两个颜色的差异量。这样的颜色空间被称为均匀颜色空间。目前比较常用的均匀颜色空间是 CIE 1976 Luv 均匀色空间，其色品坐标被称为 CIE 1976 UCS 色品坐标，它与 CIE x-y 色品坐标之间的转换关系为：

$$\begin{cases} u' = \frac{4x}{-2x+12y+3} \\ v' = \frac{9y}{-2x+12y+3} \end{cases} \quad (4.7)$$

经过坐标转换，CIE 1976 UCS 均匀色品图以及其中的麦克亚当椭圆为：

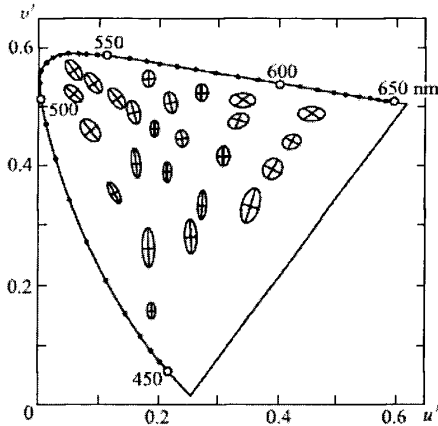


图 4-8 CIE 1976 UCS 均匀色品图以及麦克亚当椭圆

可以看到，CIE 1976 UCS 均匀色品图中的麦克亚当椭圆相比于 CIE x-y 色品图中的麦克亚当椭圆，其大小更加均匀，表明色品图上不同位置的颜色恰可觉察差大致能够用相同的距离来表示。因此，可以用空间内两点间的距离来表示相应的两个颜色的色差，实现颜色差异的量化计算。

§ 4.1.6 显示系统中的颜色重现

前面已经提到，两个不同颜色的光产生强度叠加时，会产生一种新的颜色。这被称为加法混色原理。对于一般的显示系统而言，也是通过三原色的互相混合，产生所需要的新颜色，从而实现对输入颜色信号的重现。下面对显示系统中加法混色的过程进行推导[12]。

假设一个显示系统中，使用的三种光源的颜色分别为：[R]、[G]、[B]，它们在 CIE-XYZ 色空间中的三刺激值分别为 (X_R, Y_R, Z_R) 、 (X_G, Y_G, Z_G) 和 (X_B, Y_B, Z_B) 。首先考虑将颜色 [R] 和 [G] 混合为新的颜色 [Y] 的情况。根据格拉斯曼定律以及导出的加法法则和比例法则，如果 [R] 和 [G] 的混合量分别为 R 和 B，则颜色 [Y] 的三刺激值可以表示为：

$$\begin{cases} X_Y = RX_R + GX_G \\ Y_Y = RY_R + GY_G \\ Z_Y = RZ_R + GZ_G \end{cases} \quad (4.8)$$

上式可以用矩阵的形式表达为：

$$\begin{bmatrix} X_Y \\ Y_Y \\ Z_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R & X_G \\ Y_R & Y_G \\ Z_R & Z_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

可以看到,在 CIE-XYZ 色空间中,通过[R]的颜色矢量与[G]的矢量进行合成,就得到了颜色[Y]的矢量。如图 4-9 所示,在色品图里颜色[Y]位于[R]点和[G]点的连线上。通过改变混合分量 R 和 G 的比例,能够得到连线不同位置上的颜色。

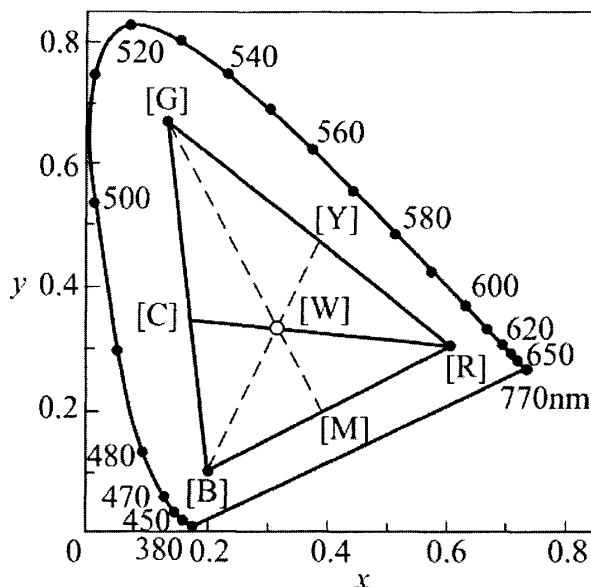


图 4-9 显示系统中的加法混色

接下来考虑加入第三种原色[B],实现三色混合。由格拉斯曼定律可知,[R]、[G]、[B]三种颜色的混合可以视作先由[R]和[G]混合得到颜色[Y],再与颜色[B]实现混合。与前面的分析类似,这个过程会得到色品图中[Y]点与[B]点连线上的颜色,如图 4-9 中的颜色[W]。同样能用矩阵的形式表示颜色[W]的三刺激值为:

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

因此,通过改变混合分量 R、G 和 B 的比例,我们就能够得到色品图上三角形[R][G][B]所围成的区域内的颜色。这样的区域被称为色域。色域内的颜色代表了显示系统能够重现的所有颜色。当我们为显示系统选择不同的三原色时,其色域三角形也随之而变化。由于我们总是选择可见光作为三原色,因此色域三角形一般都被包含在代表人眼所有感知颜色的马蹄形内。选择的三原色越接近光谱色,显示系统的色域三角形面积越大,相应的就能够显示更多颜色。

4.2 基于激光显示系统的人眼高饱和度颜色阈值研究

通过前面的介绍我们知道，当显示系统的光源颜色饱和度很高时，相应地其色域三角形很大，因此能还原非常多的颜色。激光显示系统就是如此。为了获得更高饱和度的光源颜色，我们不断开发光谱宽度更窄的激光光源，目的是不断扩展激光显示系统的色域。但前面我们提到，人眼对颜色的分辨是有一定宽容度的，因此，我们应该能找到一个饱和度稍低于光谱色的颜色 A，它对应着一个具有一定光谱宽度 λ （如 5nm）的光源。如果人眼不能将颜色 A 与光谱色区别开来，那意味着我们只需使用宽度为 λ 的光源就能够获得最高饱和度的颜色。我们将颜色 A 称为人眼高饱和度颜色的阈值。为了获得这个阈值，需要先对人眼的颜色分辨力进行测试。

§ 4.2.1 基于激光显示系统的人眼色觉分辨力测试

前面提到，麦克亚当已经对人眼的色觉分辨力做过一定的测试，即在 CIE $x-y$ 色品图上的选择了 25 个不同位置的色品点，专门设计了仪器来确定它们的颜色宽容量，结果如图 4-10 所示[6]：

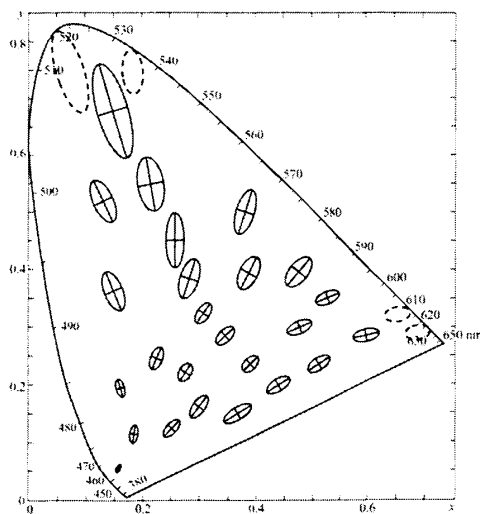


图 4-10 麦克亚当测定 25 种颜色的宽容量

由上图可以看到，麦克亚当只对色品图中的某些部分进行了颜色宽容量的测定，但仍有很多未测定的范围。如上图中虚线框中的颜色，是我们比较关心的高饱和度颜色，其颜色的宽容量并没有得到测定。因此，为了研究人眼对高饱和度颜色的分辨能力，我们有必要设计新的实验进行测试。

由于三基色激光显示系统具有极大的色域覆盖率，能够显示光谱色以及附近的颜色，因此我们可以通过激光显示平台，还原所需要测试的高饱和度颜色。参考心理物理实验方法，我们令观察者对激光显示还原的不同颜色进行对比和区别，就能够通过所得的结果确定人眼对颜色的分辨阈值。前面提到，视觉心理物理实验中，对阈值的测定方法分为调整法、界定法和恒定刺激法。这里我们基于界定法进行实验设置，即规定刺激的初始值为光谱色对应的光刺激，之后向饱和度更小的方向改变光刺激，令观察者界定恰好能分辨时的刺激阈值。

结合激光显示系统的特点，我们设计的实验方法是：利用激光投影仪同时在屏幕上投影 9 个颜色块，其中一个颜色块的颜色与另外 8 个不同。为了方便描述，将相同的八个颜色称为初始色，不同的颜色称为定位色。我们令观察者辨认定位色块的位置，如果辨认不成功，则增大初始色和定位色之间的颜色差距，并随机改变定位色块的位置，再重新辨认；如果辨认不成功，则减小初始色和定位色之间的颜色差距，并随机改变定位色块的位置，再重新辨认。通过渐进逼近的过程，我们能找到观察者恰好能够区分初始色和定位色的颜色差异，并认为此颜色差异对应了颜色的分辨阈值。

为保证测试的准确性，上述的测试过程在暗室中进行，按照 CIE 1964 标准观察者的要求[12]，每个色块的视角为 $2^\circ \times 2^\circ$ ，总的视场角为 10° ，相邻的色块之间使用黑色填充。实验中通过 PC 端生成对应的信号并采用 HDMI 线输入到投影机中，投影的亮度保持 $700 \pm 70 \text{ cd/m}^2$ 。色块的设置如图 4-11 所示。

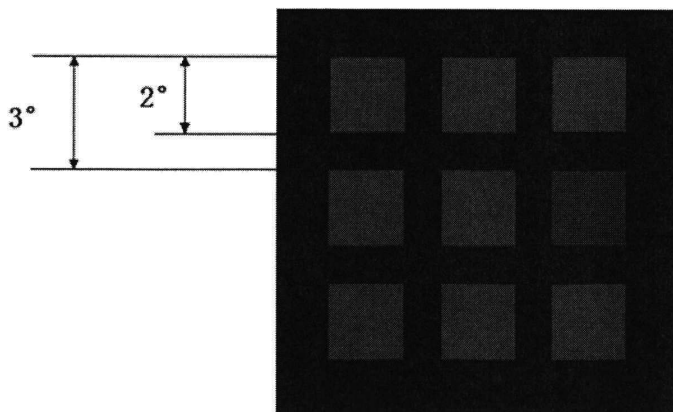


图 4-11 测试中的投影色块

测试中的观察者选择具有正常色视力，没有经过训练 22-35 岁男性。实验所用的激光投影的三基色波长设置为 635nm, 520nm, 450nm。每位观察者在实验前需要接受 3 分钟的暗适应，之后，观察者需要对每一组色块输入自己认为颜色不同的色块编号。在一个可能的阈值附近，我们通过反复增减色差值，来验证观察

者辨认出颜色差别的概率。当观察者对同一种的颜色定位色块有 50% 的概率能输入正确的编号时, 根据阈值实验的恒定刺激法概念, 我们认为该定位色与初始色的差值就是颜色分辨阈值。

§ 4. 2. 2 基于光谱宽度变化的颜色阈值测试

由色度学原理我们知道, 当光源的光谱宽度发生变化时, 其颜色也随之发生变化。假设有两个中心波长一样的光源 A 和 B, 其中 A 的光谱宽度为 0.01nm, B 的光谱宽度为 5nm。如果通过颜色阈值测试证明, 人眼难以区别 A 和 B 的颜色差别, 那在显示应用中, 我们就可以用一个宽光谱的 B 光源来代替窄光谱的 A 光源而不改变显示系统的色域覆盖率。这种替代对于激光显示系统来说是非常有意义的, 特别是在散斑抑制方面[35]。为此, 我们设计了相应的颜色阈值实验进行测试。

由于我们使用的是基于激光显示系统的颜色阈值测试, 因此需要通过激光投影再现出不同谱宽光源的颜色。由色度学原理可知[12], 光源三刺激值与光源光谱功率分布之间的关系为:

$$\begin{cases} X = \int \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y = \int \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z = \int \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (4.11)$$

其中, $\varphi(\lambda)$ 是光源的光谱功率分布, $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 分别是 CIE 1931-XYZ 系统中的光谱三刺激值。接下来, 可以计算光源颜色在 CIE x-y 色品图中的坐标为:

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z} \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z} \end{cases} \quad (4.12)$$

据此我们可以计算不同谱宽下光源颜色的理论值。假设具有理想高斯型光谱, 中心波长为 520nm, 光谱宽度为 (0.1nm, 0.2nm, 0.3nm, ……, 50nm) 的一系列光源, 它们在 CIE x-y 色品图中的颜色坐标点如图 4-12 所示。

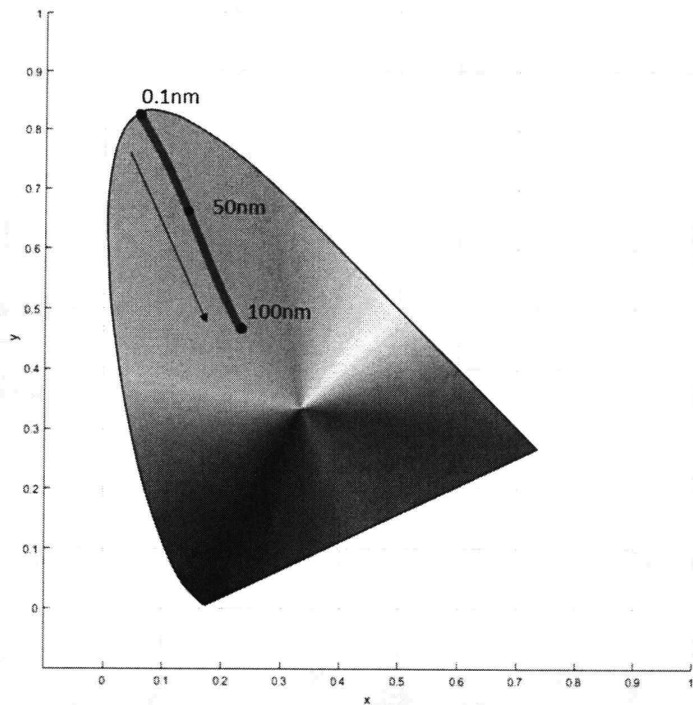


图 4-12 不同谱宽光源的颜色坐标点

上图中的红色线是一系列密集的颜色点构成的。可以看到，当光源的光谱变宽时，其颜色是向饱和度更低的方向变化的。另外，颜色点构成的轨迹并非直线，而是一条不规则的曲线。因此在进行颜色还原时，我们不能单纯使用直线拟合。

通过计算得到不同谱宽光源的颜色坐标点后,我们就能够通过激光显示系统,再现出这些颜色。由(4.10)式可知,只要改变激光显示系统中三原色的配比,就能够还原出色域三角形中特定的颜色。我们利用激光投影系统,对中心波长为520nm,光谱宽度分别为(0.1nm, 1nm, 2nm, ……, 50nm)的光源颜色进行再现,并使用KONICA MINOLTA公司生产的CS-2000型分光辐射亮度计对再现的颜色坐标进行了测量,结果如图4-13所示。

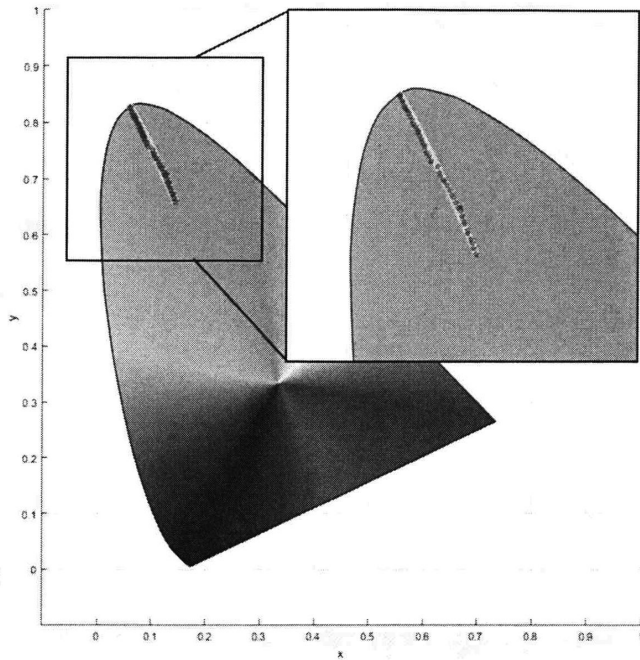


图 4-13 不同谱宽光源的颜色重现值与理论值

上图中,红色散点是利用分光辐射亮度计对重现颜色的实测坐标,黄色线是不同谱宽光源(0.1-50nm)的颜色轨迹。可以看到,通过激光显示系统重现的不同谱宽光源的颜色,与理论计算值非常接近。因此,我们能方便地利用激光投影系统,“模拟”不同谱宽光源的颜色,并进行颜色阈值的测试。

参考上一小节中介绍的人眼色觉分辨力测试实验,我们将初始色设为0.1nm谱宽的光源颜色,将定位色设为(0.6nm, 1.1nm, 1.6nm, ……, 50.1nm)等谱宽的光源颜色。共有三位观察者参加了实验,每位观察者在经过三分分钟的暗适应之后,重复进行三次实验。测得的颜色阈值对应的光谱宽度如表4-1所示。

表 4-1 三位观察者测得颜色阈值对应的光谱宽度

观察者	1 号			2 号			3 号		
实验次数	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
颜色阈值对应的光谱宽度 (nm)	9.6	10.6	9.6	15.1	12.6	13.1	14.1	15.6	13.6

由上表可以看到, 由于在颜色分辨力上存在个体差异, 三位观察者测得的颜色阈值对应的光谱宽度各不相同, 但相差并不大, 都在 10-15nm 附近。测试结果说明, 1 号观察者能将光谱宽度为 0.1nm 和 10nm 左右的两个 520nm 光源分辨出颜色的区别, 而 2 号观察者和 3 号观察者则需要将光谱宽度加到 13nm 左右才能分辨。利用这个结果, 我们可以进行初步的估计: 对于两个中心波长为 520nm, 光谱宽度分别为 0.1nm 和 10nm 的绿光光源, 它们的颜色在一般的观察者看来并没有明显区别。因此, 在激光显示系统中, 我们只需选择 10nm 谱宽的 520nm 绿光光源, 就可以获得与光谱色一致的绿色基色。而 10nm 谱宽的光源比起 0.1nm 的光源, 在散斑抑制能力上有着突出的优势。这对于激光显示系统的设计有很大的指导意义。

4.3 本章小结

在本章中, 我们从色度学和视觉心理物理学原理出发, 设计了基于激光投影显示平台的人眼高饱和度颜色分辨力实验。利用设计好的实验方法, 我们进行了基于光谱宽度变化的颜色阈值测试实验, 得到了颜色阈值对应的光谱宽度值。这些结果对于激光显示系统的光源谱宽选择非常有意义。具体而言, 我们的工作可以分为:

1. 由于以往的人眼色觉分辨力实验并没有对高饱和度的颜色宽容量进行测定, 因此我们针对高饱和度颜色重新设计了颜色阈值实验。利用激光显示系统, 我们能够方便快捷地对两个高饱和度颜色进行显示和对比, 并且根据阈值实验中的界定法和恒定刺激法确定人眼能分辨的颜色阈值。

2. 由于我们关注的是不同谱宽下的光源颜色阈值, 因此我们利用激光显示系统, 对中心波长为 520nm, 谱宽为 (0.1nm, 1nm, 2nm, ……, 50nm) 的一系列光源颜色进行了重现。而分光辐射亮度计对重现颜色的测量表明, 激光显示系统能够对不同谱宽的光源颜色进行很好的复现。根据设计好的颜色阈值实验, 我们测得当中心波长为 520nm 时, 颜色分辨阈值对应的光谱宽度为 10nm 左右。因此, 在激光显示系统的设计中, 使用 10nm 谱宽的 520nm 绿光光源能够兼顾高颜色饱和度与低散斑对比度两个方面, 是更优化的选择。

参考文献

- [1] 李景镇. 2010. 光学手册[M]. 陕西科学技术出版社.
- [2] Vos J J, Walraven P L. 1971. On the derivation of the foveal receptor primaries[J]. Vision Research, 11(8): 799-818.
- [3] Fechner G T, Wundt W M. Elemente der Psychophysik: erster Theil[M]. Breitkopf & Härtel, 1889.
- [4] 鲍凌波. 2015. 激光投影显示的色域扩展研究[J]. 中国新通信, (4):73-75.
- [5] 胡威捷, 唐顺青, 朱正芳. 2007. 现代颜色技术原理及应用[M]. 北京理工大学出版社.
- [6] MacAdam D L. 1942. Visual sensitivities to color differences in daylight[J]. Josa, 32(5): 247-274.
- [7] Yu N E, Choi J W, Kang H, et al. 2014. Speckle noise reduction on a laser projection display via a broadband green light source[J]. Optics express, 22(3): 3547-3556.

第五章 总结与展望

§ 5.1 全文总结

本文基于激光显示系统,对散斑抑制系统、屏幕散斑对比度、光源谱宽优化等方面进行了创新的设计与深入的研究。本文的研究工作主要为:

1. 针对单片式 DLP 激光投影系统,我们设计并开发了一套基于偏心球透镜的新型散斑抑制系统,并对系统中的散斑抑制机制进行了分析,发现在只额外加入一个动态透镜元件的情况下,引入了多种散斑抑制机制,包括通过转动偏心球透镜生成减弱光源的空间相干性,以及通过动态的散射光斑增加不同时刻非相干散斑图样。进一步地,我们使用光学设计软件 Lighttools 对所设计的系统进行模拟仿真。通过光线追迹的结果,我们发现整个消散斑和匀光系统能够在 DMD 芯片的位置产生一个均匀的照明光斑。此外,当球透镜转动时会引起光斑强度中心出现类似扫描的现象,在积分时间内进一步提高了照度的均匀性。基于上述的设计方案,我们搭建了基于偏心球镜散斑抑制系统的激光投影样机,并进行照度测试和散斑测试。测试结果表明,通过加入这套高度集成化的散斑抑制装置,能够得到照度均匀性 90% 以上,光光效率达到 95 lm/W,散斑对比度低于 3% 的激光投影画面,这说明我们设计的新型散斑抑制系统具有很高的实用价值。

2. 我们从理论入手,对漫散射屏幕的散斑特性进行了分析,发现当屏幕的表面粗糙度大于照明光波长尺度时,其散斑对比度 C 与表面起伏高度标准差 σ_h 之间有直接的关系。进一步地,我们利用精密的探针式表面轮廓仪对 17 种屏幕的表面起伏高度与表面形貌进行测量,并对白塑幕、玻璃幕、金属幕等三种不同类型的投影屏幕进行分析,发现所测量屏幕的表面起伏高度标准差均大于照明光波长尺度,且不同类型屏幕的表面形貌有着很大的差别。为了获得准确的散斑对比度测量值,我们搭建了一套模拟人眼视觉的散斑测试平台,并对 17 种屏幕的散斑对比度进行测量。将得到的数据与前面的表面形貌与起伏高度结合分析,我们发现除了玻璃幕以外,其它 13 种屏幕都较为符合 $C \propto (\sigma_h)^{-1/2}$ 的线性关系,因此对于普通的投影屏幕我们可以使用它的表面起伏高度对其散斑对比度进行估计。另外,对玻璃幕和金属幕的增益及散斑对比度参数分析表明,玻璃幕更适合作为激光投影显示中的屏幕使用。

3. 基于色度学及视觉心理物理学原理,我们针对高饱和度颜色设计了新的颜色阈值实验。利用激光显示系统,我们能够方便快速地对两个高饱和度颜色进行显示和对比,并且根据阈值实验中的界定法和恒定刺激法确定人眼能分辨的颜

色阈值。由于我们关注的是不同谱宽下的光源颜色阈值，因此我们利用激光显示系统，对中心波长为 520nm，谱宽为 (0.1nm, 1nm, 2nm, ……，50nm) 等一系列光源颜色进行了重现。而分光辐射亮度计对重现颜色的测量表明，激光显示系统能够对不同谱宽的光源颜色进行准确的“模拟”。根据设计好的颜色阈值实验，我们测得当中心波长为 520nm 时，颜色分辨阈值对应的光谱宽度为 10nm 左右。因此，在激光显示系统的设计中，使用 10nm 谱宽的 520nm 绿光光源能够兼顾高颜色饱和度与低散斑对比度两个方面，是更优化的选择。

§ 5.2 研究展望

激光显示技术领域虽然已经逐渐走向成熟，但其中还存在许多不够完善的地方，有待进一步的研究与探索。今后我们还将在以下方面开展新的工作：

1. 继续研究小型化的高效散斑抑制技术，在现有技术的基础上，通过引入新材料、新器件、新方法，如随机激光、宽带激光等技术，进一步提高激光显示系统的散斑抑制效率、光能利用率和集成化程度。

2. 继续探究投影显示屏幕与散斑之间的本质联系，通过建立合理的模型，实现激光投影屏幕散斑图像的模拟仿真，为开发新的低散斑高性能激光显示屏幕建立理论指导依据。

3. 在现有三基色激光显示的基础上，进一步发展多基色激光显示技术，在本质上提高激光显示的色域覆盖率。通过改进色域映射技术，实现多基色下的真实色彩还原。

4. 进一步优化基于激光显示系统的颜色阈值测试实验，测定多种波长光源的颜色阈值，据此进一步优化激光显示光源的中心波长、光源谱宽等参数，有助于确立统一的激光显示标准。

5. 通过改进激光光源的合束、匀场、整形等相关技术，进一步推进高功率激光显示系统的实用化，满足更高亮度的画面需求。

攻读博士学位期间的主要工作

一、发表论文

1. **Li Gen**, Chun Cu, Lixin Xu, et al. "Thulium-doped all-fiber mode-locked laser synchronously pumping by a fiber laser." SPIE Optical Engineering+ Applications. International Society for Optics and Photonics, 2016.

二、参与科研项目

1. 国家重点研发计划（项目编号：No.2016YFB0401900）：面向三基色 LD 激光显示整机关键技术基础研究
2. 校青年创新基金（项目编号：WK6030000050）：单 DLP 全色激光投影机
3. 校青年创新基金（项目编号：WK6030000049）：2.0 μm 波段掺铥脉冲光纤激光器

三、申请专利

1. 发明专利：**李根** 董天浩 顾春 许立新 颜珂 方昱玮 王贯. 基于偏振分光镜的分光装置. 申请（专利）号：201710233698.5. 申请日：2017 年 4 月 11 日.
2. 发明专利：董天浩 顾春 许立新 **李根** 颜珂 王贯. 多基色双 DMD 激光投影显示装置. 申请（专利）号：201710670025.6. 申请日：2018 年 8 月 8 日.
3. 发明专利：顾春 董天浩 许立新 颜珂 **李根** 王贯. 一种波分复用的多波长倍频光纤激光装置. 专利号：201710694254.1. 申请日：2017 年 8 月 15 日.
4. 实用新型：**李根** 顾春 许立新 颜珂 林一楠等. 一种高集成度的激光投影光学引擎. 申请（专利）号：201520393176.8. 申请日：2015 年 6 月 8 日

致谢

本论文的研究工作是在导师许立新副教授和顾春副教授的耐心帮助和悉心指导下完成的。他们在生活上给予我无私的关怀和支持，在科研上为我提供了大量的理论指导与实践机会，并注重培养我的独立思考和解决问题的能力，令我受益匪浅。许老师待人宽厚，知识渊博，治学态度严谨，是我不断学习的榜样。顾老师思维敏锐，勇于创新，注重实践，是我不可多得的良师益友。在此，谨向我的两位导师表示最诚挚的感谢！

感谢吴云霞老师给予我科研和生活上的关心和帮助，使我感到家的温暖。感谢明海老师、姚培军老师、王安廷老师对我的指导和帮助，使我在科研工作上取得更大的进步。

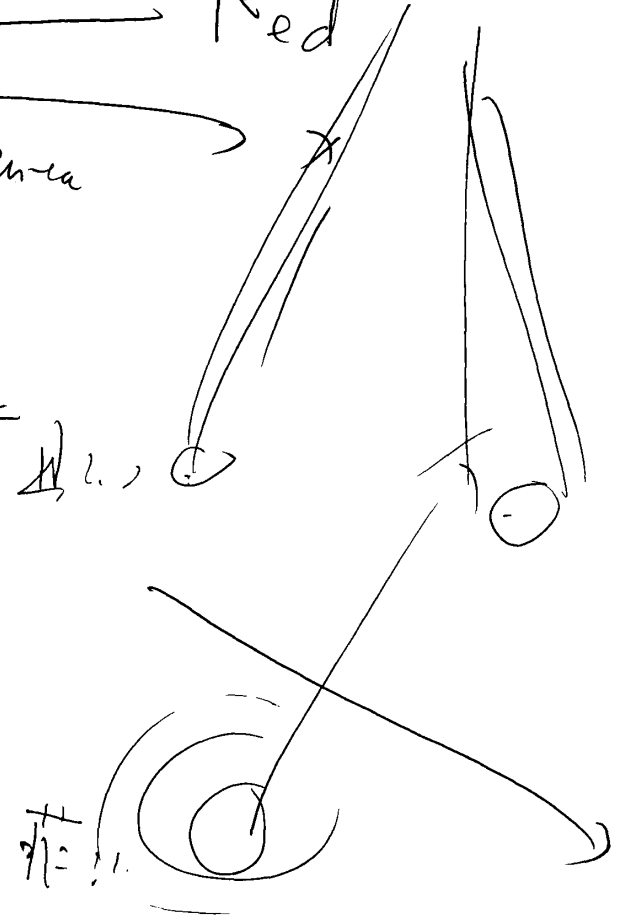
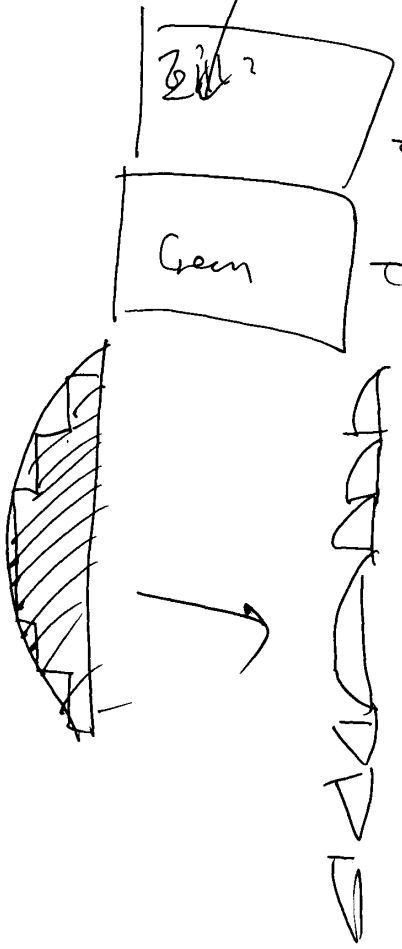
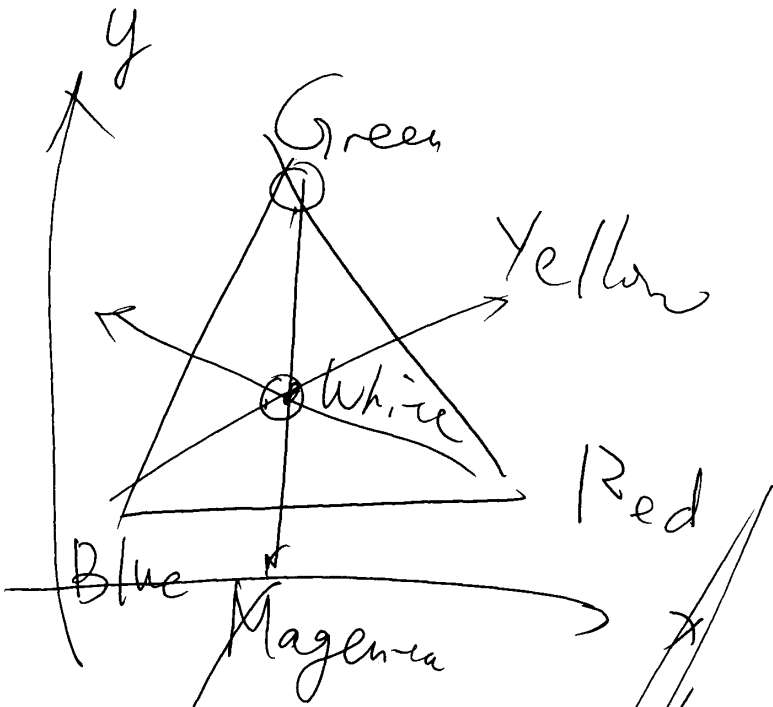
实验室积极向上的科研态度、团结愉快的学习氛围令我感到难以忘怀。与同学们的交流与学习令我不断成长。衷心感谢颜珂博士、王贯博士、林一楠硕士、邓林宵硕士，在完成课题和论文的过程中，给予了我很大的支持和帮助。同时感谢张先明博士后、周勇博士、李银海博士、崔哲博士、王书路博士、董天浩博士、马晓辉博士、方文坛博士、赵磊硕士等等在研究工作中给予的帮助；感谢宋红岩博士、李淑杰博士、陈瑞山博士、邓征标硕士、李立硕士等等的支持与鼓励，与他们多年的相处经历是我人生中一笔宝贵的财富。

我要特别感谢我的妻子冀明蕾女士，她的支持与鼓励是我一直不断前行的动力；感谢我的父母，感谢他们对我的支持和理解；感谢我的家人，感谢他们对我一直以来的关怀和照顾。

最后，再次向所有关心和鼓励我的老师、同学、亲人、朋友们致以最衷心的感谢！

李根

2018年5月于科大





USTC

中国科学技术大学博士学位论文