

分类号 TP753

密级

UDC 621

编号

中国科学院研究生院

博士学位论文

全彩 LED 模块显示屏颜色均匀性校正研究

张 鑫

指导教师 王瑞光 研究员

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

申请学位级别 工学博士 学科专业名称 电路与系统

论文提交日期 2011.04 论文答辩日期 2011.05

培养单位 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 陈贺新 教授

分类号 TP753

密级

UDC 621

编号

中国科学院研究生院

博士学位论文

全彩 LED 模块显示屏颜色均匀性校正研究

张 鑫

指导教师 王瑞光 研究员

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

申请学位级别 工学博士 学科专业名称 电路与系统

论文提交日期 2011.04 论文答辩日期 2011.05

培养单位 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 陈贺新 教授

Classified Index TP753

Confidential grade _____

UDC 621

Number _____

**Dissertation Applying for a Doctor Degree to
the Changchun Institute of Optics, Fine
Mechanics and Physics**

Chinese Academy of Science

**Research on Color Uniformity Calibration of
Full-color LED Module Display Panel**

Zhang-Xin

Directed by Prof. Wang-Ruiguang

**Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and
Physics, Chinese Academy of Sciences, China**

2011

独 创 性 声 明

本人郑重声明：所提交的学位论文是本人在导师指导下独立进行研究工作所取得的成果。据我所知，除了特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。对本人的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明。本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名： 张 磊 日期： 2011.5.20

学位论文使用授权书

本学位论文作者完全了解中国科学院研究生院及中国科学院长春光学精密机械与物理研究所有关保留、使用学位论文的规定，即：中国科学院研究生院及中国科学院长春光学精密机械与物理研究所有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权中国科学院研究生院及中国科学院长春光学精密机械与物理研究所可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编本学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名： 张 磊 指导教师签名： 王瑞光
日 期： 2011.5.20 日 期： 2011.5.20

学位论文作者毕业后去向：

工作单位： _____

电话： _____

通讯地址： _____

邮编： _____

全彩 LED 模块显示屏颜色均匀性校正研究

张 鑫（电路与系统）

导师：王瑞光

摘 要

全彩 LED 显示屏在亮度、色彩鲜艳度、大尺寸显示应用等方面具有其他平板显示器无可比拟的优势，应用领域广泛，市场前景巨大。但随着 LED 显示屏尺寸的扩大，各个 LED 发光管之间的离散特性开始凸显出来，产生诸如“麻点”和“马赛克”缺陷，造成屏幕的均匀性下降，严重影响了画面质量，也制约了我国高端 LED 显示屏的发展。针对这种情况，论文基于色度学原理，对市场上较为普遍的全彩 LED 模块显示屏的颜色均匀性校正方法展开了研究。

论文通过研究颜色复现和色域转换的原理，确定了利用色域空间转换的方法完成显示屏颜色均匀性校正的技术路线。论文提出了一种基准颜色空间的定位定标方法，保证每一显示像素能够得到有效校正的同时，减少了校正后 LED 显示屏的色域损失。

为了解决颜色参数采集效率低的问题，论文在分析全彩 LED 模块显示屏成像显示特点的基础上，提出了一种亮度色度分离采集再混合校正的方法，大大提高了采集效率，使点检测设备对 LED 显示屏的亮度色度检测在工程上具备了可行性。

同时论文对现有 LED 显示控制系统进行了深入研究，并提出亮度色度系数分离的校正方法和算法模型，该方法在不增加硬件成本的基础上，使颜色均匀性校正第一次在 LED 显示屏上得以实现，并具有操作简便的特点。

论文通过不断的分析、优化、验证，实现了 LED 显示屏颜色均匀性校正工程化工作，使 LED 显示屏的颜色均匀性达到了高端产品的要求，有力地提升了国产 LED 显示屏的水平。

关键词：LED 显示屏；颜色均匀性；色域转换；基准颜色空间；分离采集；

系数分离校正

Research on Color Uniformity Calibration of Full-color LED Module Display Panel

Zhang-Xin (Circuit and System)

Directed by Wang-Ruiguang

Abstract

Compared with other flat panel displays, full-color LED display panels have unique advantage in brightness, vivid color, large-size display applications and so on, which brings about widespread applications and huge market prospects. However, with the expansion of LED display panel size, the discrete characteristics among all the LED light pipes become prominent, which results in “pits” and “mosaic” defects, drops down the uniformity of the panel, affect the display quality seriously, and restrict the development of high-end LED display applications also. To resolve the defects, this paper researches the color uniformity calibration of full-color LED module display panel, which is more common on the market based on colorimetry theory.

With the study on the color reproduction and color gamut conversion principle, this paper determines the technology roadmap to complete color uniformity calibration of LED display panel by the method of color space conversion. The paper proposes a method for positioning the reference color space, which can reduce the color gamut loss on LED display panel after calibration, while ensuring that each display pixel can be effectively calibrated.

To resolve the low efficiency question when acquiring the color parameters, this paper proposes a method for acquiring bright and color parameters separately based on the analysis of the imaging and display characteristics of full-color LED module display panel. The method greatly improves the acquisition efficiency, and makes the

acquisition by dot detection equipment feasible in practice.

On the basis of the analysis on the characteristics of display control system, this paper also proposes a method for separating the color calibration coefficient and its algorithm model. This method easily completes the color uniformity calibration process on LED display panel in practice for the first time without any additional hardware cost.

With continuous analysis, optimization and validation, this paper finally completes the color uniformity calibration of full-color LED module display panel, so that the color uniformity of LED display panel achieves the requirements of high-end products, which effectively raises the level of domestic LED display panel.

Key words: LED display panel, color uniformity, color gamut conversion, conference color space, separation acquisition, coefficient separation calibration

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	5
1.3 论文主要研究内容	7
1.4 论文的结构安排	8
第 2 章 色度学原理.....	9
2.1 三基色原理	9
2.2 CIE 标准色度学系统.....	10
2.3 显示系统的颜色复现	16
2.4 色域转换原理	19
2.5 小结	25
第 3 章 逐点颜色均匀性校正研究.....	27
3.1 LED 显示屏颜色空间亮度色度的基本关系.....	27
3.2 LED 显示屏颜色测量技术.....	29
3.3 LED 显示基准颜色空间的定位定标方法研究.....	30
3.4 逐点颜色均匀性校正算法实现	40
3.5 小结	44
第 4 章 亮度色度分离采集混合校正研究.....	45
4.1 全彩 LED 模块显示屏的成像显示特点	45
4.2 亮度色度分离采集的可行性分析	49

4.3 亮度色度混合校正的算法实现	56
4.4 亮度色度混合校正的工程实现	63
4.5 小结	68
第 5 章 亮度色度系数分离校正研究	71
5.1 全彩 LED 显示屏控制系统	71
5.2 亮度色度系数分离的可行性分析	74
5.3 亮度色度系数分离校正的算法实现	94
5.4 亮度色度系数分离校正的工程实现	99
5.5 小结	102
第 6 章 总结与展望	103
6.1 论文工作总结	103
6.2 论文的创新点	103
6.3 展望	104
参考文献	105
在学期间学术成果情况	111
指导教师及作者简介	113
致 谢	115

第 1 章 绪论

本章主要内容是对全彩 LED 显示屏颜色均匀性校正的目的、方法和结果等做一基本介绍。首先对论文的研究背景做出描述，明确了开展本文研究的意义；其次介绍了以往解决颜色均匀性校正问题的方案及国内外的研究现状；然后介绍了本文的主要研究内容和取得的成果；最后简要介绍了论文的结构安排。

1.1 课题研究背景及意义

在信息化高速发展的今天，显示技术作为人机联系和信息展示的窗口在人们的生活中扮演着愈来愈重要的角色。21 世纪将是平板显示大发展的时代，而在当今的显示领域，已有 100 多年历史的 CRT(阴极射线管)显示面临着 LCD(液晶显示器)、PDP(等离子体显示器)、LED(发光二极管显示)以及 OLED(有机发光二极管显示)等平板显示器的挑战。各种显示技术都在不断发展，不断完善，呈现出一片百花齐放、百家争鸣的景象^[1-2]。

每种显示技术都有其存在的优势，也都有其不足之处。纵观各种平板显示，43 英寸以下以 LCD 占主导地位，40 英寸到 100 英寸主要是 PDP 的市场，而 100 英寸以上，无论是室内还是室外，LED 平板显示都以绝对优势成为主流产品^[1-4]。LED 平板显示具有高亮度、长寿命、绿色环保、高对比度、高分辨率、性能稳定、响应速度快、色彩还原性好等众多优点，在高亮度与超大屏幕显示方面有着得天独厚的优势，是其它显示无可匹敌的。近几年来，随着 LED 材料以及显示技术的快速发展，LED 平板显示以其独特的魅力吸引着人们参与到对它的研究和产业化中来。目前已经广泛用于媒体、娱乐、交通、体育场馆、火车站、飞机场、电视节目直播现场、展览场馆、大型文艺晚会现场、演唱会现场以及各种大型公共场合，为人们的生活带来了丰富多彩的画面，满足了人们在大屏幕、高亮度、色彩鲜艳等方面独特的需求，因此市场空间巨大。

但与此同时，全彩 LED 显示屏以其发光管的离散分布特性，与其他平板显示

器相比,会呈现出严重的显示不一致性,通常表现为“麻点”和“马赛克”现象。解决全彩 LED 显示屏的显示不一致性,开展颜色均匀性校正方法研究,成为 LED 平板显示领域研究的热点与难点^[5-6]。

全彩 LED 显示屏在颜色均匀性方面的缺陷包括亮度不一致性和色度不一致性两个方面。其中,亮度不一致性主要指同屏各个显示像素之间在显示同一种颜色时的亮度离散性;色度不一致性主要指同屏各个显示像素、模块或模组之间显示同一种颜色时的色度离散性。颜色均匀性不好,显示屏就会出现“麻点”或“马赛克”,通常会使画面的某一部分特别亮或暗,严重影响图像的观看效果。可以说,颜色均匀性问题是影响全彩 LED 显示屏观看效果的最重要因素,同时也是最难控制的因素。造成不一致的原因主要有以下几种^[6-7]:

1. 全彩 LED 显示屏是由成千上万个离散分布的 LED 发光管组成,而同基色的 LED 发光管的亮度具有很大的离散性,即使是同一批次的 LED 发光管,其亮度也存在 30~60% 的偏差,这是造成全彩 LED 显示屏颜色显示不均匀缺陷的最主要原因。

2. 同基色 LED 发光管色度坐标呈离散性分布,通常同一档次的 LED 发光管主波长偏差一般控制在 5nm 以内。但即使是同一波长档次的 LED 发光管,由于其发光的光谱功率分布不同,各个 LED 发光管之间也存在不可忽略的显示颜色色差。

3. LED 发光管视角特性呈离散性分布。每一基色每一个发光管在空间呈现不同的光强分布比例,在某一角度亮度相同的发光管在另一角度却不同,这种问题只能靠改善 LED 发光管的制造工艺加以避免,通过软件校正可以改善某一角度的亮度、色度均匀性,在另一角度却又变得不均匀。

4. LED 发光管随时间的衰减程度不同,本来亮度均匀一致的发光管在用一段时间后就会变得不均匀。

5. 其它因素,如驱动电路的不一致性、环境温度的影响、电路设计的缺陷、结构加工的误差等都会成为不均匀性的原因。

由于上述原因,组装成的 LED 平板显示屏的每一个显示像素在输入同一颜色数据时,显示的亮度、色度都不能完全一致。就像在均匀一致的画面蒙上一层弥散的固定噪声,看上去就像“麻点”,所以我们称之为“麻点”现象,如图 1.1 所示。

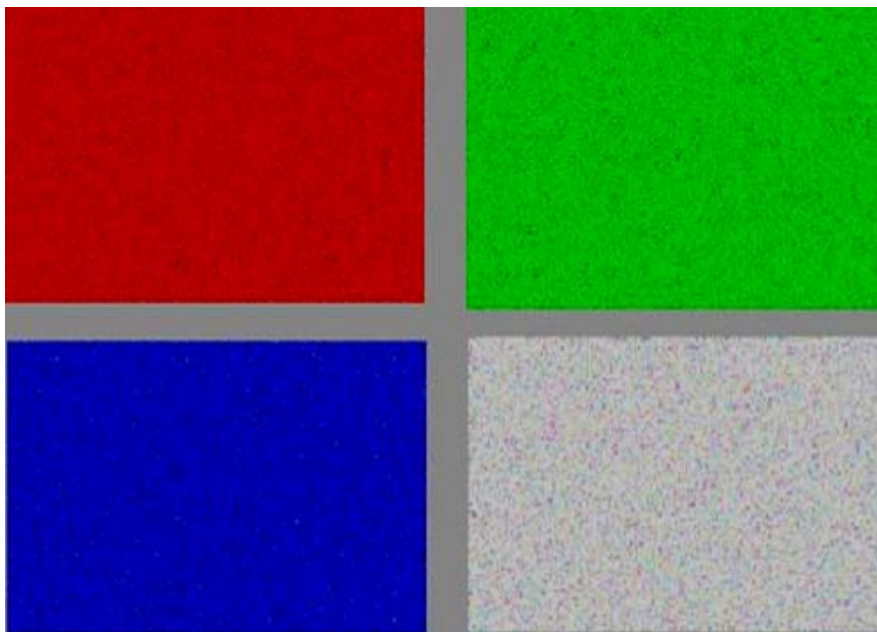


图 1.1 显示红、绿、蓝、白色时的“麻点”缺陷

又由于 LED 平板显示屏采用模块化的组装方式，使得同一模块内的 LED 平板显示的亮度、色度特性差异较小或趋于一致，而模块与模块之间表现出更大的差异，表现为较大区域的块状固定噪声，如图 1.2 所示，我们称之为 LED 平板显示的“马赛克”现象。

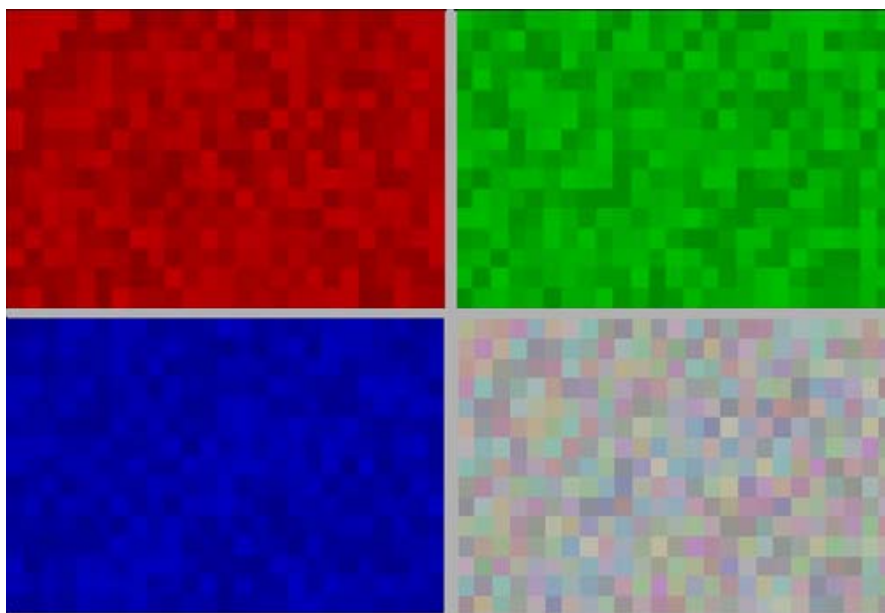


图 1.2 显示红、绿、蓝、白色时的“马赛克”缺陷

通常，“麻点”与“马赛克”在LED平板显示屏中都存在，结果如图1.3所示。于是，这些大大小小的固定噪声成为LED平板显示不同于其他平板显示设备的独特缺陷。在显示图像的时候情况更是十分复杂，各种缺陷在图像中色调比较单一的区域，如天空、地面等，尤其严重，如图1.4所示。

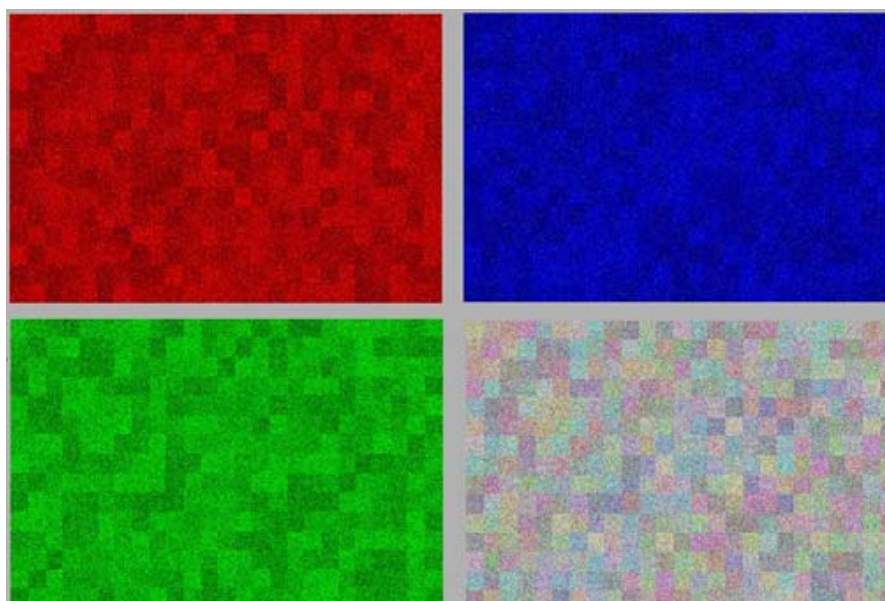


图 1.3 显示红、绿、蓝、白色时同时具有“麻点”与“马赛克”缺陷



图 1.4 “麻点”与“马赛克”缺陷对图像显示的影响

目前国内市场上 LED 平板显示的这种亮度、色度不均匀非常普遍，模块间显示亮度的差异达到其亮度的 50%，模块内的单点亮度差甚至达到其亮度的 60%。特别是在经过一定时间的衰减，经过维修更换之后，造成显示图像灰度层次的混乱、颜色失真问题非常突出，显示效果很难满足客户最初的满意度，甚至“惨不忍睹”。随着显示技术的发展以及人们娱乐水平的提高，在 LED 平板显示领域这一问题越来越成为影响显示质量的突出问题，进行颜色均匀性校正研究成为目前该领域的焦点和热点。

随着我国经济迅猛发展及综合国力的增强，各种大型国际会议相继在我国召开，特别是 2008 年北京奥运会、2009 年国庆 60 年庆典和 2010 年上海世博会、广州亚运会等重大活动的成功举办，对我国 LED 显示屏行业的进一步发展是一个巨大推动，其示范效应也不容忽视。而高画质均匀性的 LED 显示屏才能代表我国 LED 显示应用行业技术水平达到国际先进水平，才能代表我国经济水平和综合国力位居世界前列。因此，本文在高质量、高均匀度的 LED 平板显示器方面的研究工作为实现上述目标奠定了基础，有十分重要的意义。

1.2 国内外研究现状

早期的 LED 平板显示屏在全屏均匀性校正方面采用的主要方法是 LED 筛选法，即采用同一厂家、同一批次的器件，从大量的 LED 器件中挑选出显示亮度、色度尽量一致的显示器件来组成 LED 平板显示器，因此最后产品的价格达到惊人的程度，国内外市场都难以普及。而且这种办法只是一次性的办法，随着显示器件的衰减，在一两年内也会带来显示亮度的不一致，出现同样糟糕的显示质量。

由于相对于“麻点”缺陷，“马赛克”缺陷以较大区域、更为明显的不均匀现象出现，更严重的影响了屏幕的质量，消除“马赛克”现象是提高屏幕均匀性的首要任务。目前，市场上的 LED 平板显示屏多采用 LED 器件混杂排列的办法来改善屏幕的“马赛克”不均匀性，即将不同种类、亮度色度不均匀的 LED 器件随机排列，均匀混合，使屏上的不均匀性均匀分布。这样，可以消除大面积的“马赛克”缺陷，但实际上并未改善屏幕不均匀度，反而产生更多“麻点”噪声。

在此基础上，为了达到更好的显示均匀性，许多厂商开始研究亮度的逐点修正技术，即通过精确控制显示像素三基色发光二极管的驱动电流的方法，控制显示像素相同基色之间的亮度比例关系，使得显示屏的所有显示像素的亮度一致。

这种方法得到的效果要优于筛选,可实现基于像素级别的亮度精细控制,但电流的变化会引起 LED 发光管波长偏移的问题,即 LED 色度偏移问题,所以该方法的实施具有一定的局限性^[8-10]。

随着高档 LED 显示屏竞争趋于激烈,对其亮度均匀性以及色彩精准度的要求更加严格,完全依靠精细筛选 LED 发光管的方法来保证 LED 显示屏的品质已无法符合需求,而且不利于大规模工业化生产;而通过调整限流电阻来调节电流的模拟方式修正方案,又具有控制器负荷高、设计复杂以及会引起色度偏移等问题,难以满足逐点校正的需求。

要克服这些问题,使 LED 显示屏达到比较满意的显示均匀性,较为理想的方法是全屏逐点校正,即根据整屏原始显示信息建立修正查找表,通过显示控制系统脉宽调制的方法精确调整各个显示像素同一基色的亮度比例关系,使得全屏幕显示像素的亮度色度基本一致,达到亮度显示均匀度控制的目的。这种方法的原理是保持相同的驱动电流,通过调整每个显示像素的导通时间来确保亮度一致性,因为在相同驱动电流下 LED 发出的光的颜色是一致的,所以无须担心进行逐点校正所造成的 LED 色度偏移问题。

近几年,得益于 CCD 相机在 LED 显示屏亮度参数采集方面的应用,国内 LED 显示屏生产厂家和为显示屏配套的控制系统生产厂家已纷纷开展亮度逐点校正技术的研究和应用工作,使国内 LED 显示屏行业的整体技术水平有了较大提升。其中,自主研发并完成亮度逐点校正商业化应用的有长春希达电子技术有限公司、中庆微数字设备开发有限公司、西安诺瓦电子科技有限公司等。

经亮度逐点校正后,LED 显示屏可以消除亮度显示效果不一致问题,但对于存在色差问题的 LED 显示屏,依然难以取得好的显示效果,有时候“马赛克”现象比校正前更加明显。这种情况,在 LED 显示屏的逐点校正过程中,就不能仅仅考虑显示像素之间的亮度差异,需要将显示像素之间的色度差异也考虑在内同时进行处理,即本论文要开展的颜色均匀性校正方法研究。

在 LED 显示屏颜色均匀性校正领域,成立于 1981 年的美国 Radiant Imaging 公司在光色量测、影像系统及照明工程用工具与服务方面居世界领导地位,它推出的 PM-LED 系列产品以 CCD 技术为基础,并搭配特别设计的镜头和滤色片,可以在实验室条件下实现较为理想的 LED 显示屏的颜色均匀性校正。另外,美国 Daktronics 公司、比利时 Barco 公司等世界著名 LED 显示屏生产商在该颜色均

匀性校正领域也具有一定的技术基础。但为了确保其在高端 LED 大屏幕显示屏方面的利益，上述公司均拒绝对此类技术进行转让。而根据吉林省科技情报研究所查新项目报告书 GN2008101839 的结论：“国内尚无科研机构以及其他团体开展类似技术领域研究”。

1.3 论文主要研究内容

本论文主要支撑项目为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新三期项目“高清晰、高均匀全彩色 LED 大屏幕显示器关键技术研究”。整个项目是对 LED 大屏幕显示器的最新技术发展趋势进行相关核心技术方面的研究，本论文主要对 LED 显示屏颜色均匀性校正技术的某些方面进行较为深入的研究。

论文根据色度学的相关理论，重点研究了全彩 LED 模块显示屏的颜色均匀性校正方法。颜色均匀性校正，实际上就是合理利用人眼“颜色宽容量”的概念消除显示屏上存在的亮度色度差异的过程。根据加色法原理，对存在亮度色度差异的某一显示基色掺杂一定比例的另外两种基色，使混合后的显示屏各个显示像素之间亮度和色度坐标趋于一致，将其差异控制在人眼的“颜色宽容量”以内。

论文通过理论分析，首先完成从 LED 显示屏所有显示像素或显示模块“基准颜色空间”选取的算法研究，并得到各个显示像素或显示模块颜色空间到“基准颜色空间”的色域转换方程，实现全彩 LED 模块显示屏颜色均匀性校正方法的算法研究。

在此基础上，结合工程实践，论文对存在显著色度差异的全彩 LED 模块显示屏的成像显示特点进行研究，分析了颜色均匀性校正方法工程实现的可行性，提出了高效的亮度色度分离采集混合校正的全彩 LED 模块显示屏颜色均匀性校正方法。

为进一步提高校正过程中的运算效率、减轻显示控制系统的存储压力，论文对全彩 LED 模块显示屏颜色均匀性校正的亮度色度系数分离算法实现的可行性进行了研究，并据此提出亮度色度系数分离的校正方法，使颜色均匀性校正方法能够初步应用于 LED 显示产品的设计中，从而从根本上解决 LED 显示屏上的“麻点”和“马赛克”问题，达到理想的显示效果，满足人们对全彩 LED 显示屏高画质的要求。

1.4 论文的结构安排

论文共分为六章，各章内容编排如下：

第1章是绪论，首先介绍了目前LED显示器在光色缺陷方面亟待解决的颜色显示不均匀的问题，即“马赛克”和“麻点”缺陷，并分析了引起不均匀性的原因；其次总结介绍了目前国内外对这一问题的解决办法及颜色均匀性校正的研究现状；最后概述了论文的研究内容和结构安排。

第2章主要介绍LED显示屏颜色均匀性校正的理论基础，主要是色度学理论的介绍。首先介绍了三基色原理以及两个常用的CIE标准色度学系统；其次对人眼“颜色宽容量”在色度学中的体现做了简要介绍；最后介绍了有关彩色复现和色域转换的一些基础知识。通过这些理论的介绍使得论文的研究有据可依。

第3章是颜色均匀性校正算法的核心。首先介绍了色差与人眼可识别颜色的关系和有关的颜色测量技术；其次重点阐述了全彩LED显示屏各个显示像素或显示模块“基准颜色空间”的选取方法；最后给出通用的全彩LED显示屏颜色均匀性校正方法。

第4章是第3章研究内容的延续。首先结合颜色均匀性校正算法的工程实现，分析了全彩LED模块显示屏的成像特点；其次提出高效的亮度色度分离采集混合校正的颜色均匀性校正算法；最后在工程中对这一方法进行了验证。

第5章是第4章研究内容的深化。首先结合现有显示控制系统的特点，分析了第四章校正算法的不足；其次重点分析了亮度色度系数分离的可行性；最后给出全彩LED模块显示屏亮度色度分离采集校正的算法模型，并使颜色均匀性校正工程中得到有效应用。

第6章对本论文的工作进行了总结，并对进一步工作进行了展望，提出其中有待改进或延伸的研究内容。

第 2 章 色度学原理

2.1 三基色原理

根据人眼视觉的特性，在彩色复现过程中，并不要求恢复原景物辐射光的光谱成分，而重要的是应获得与原景物相同的彩色感觉。与某一颜色相同的彩色感觉，可由不同光谱分布的色光的组合产生^[11-13]。

如果适当选择三基色，将它们按不同比例进行合成，就可以引起各种不同的色彩感觉，合成彩色的亮度由这三个基色的亮度相加之和决定，而色度则由三个基色分量的比例决定。三个基色必须是相互独立的，也就是说，其中任意基色都不能由其他两个基色混合产生，这样就能匹配出很多颜色。这就是三基色原理的主要内容。

根据三基色原理，可以采用不同的三色组合。但是在显示领域中，比较恰当的还是在红色、绿色和蓝色的光谱色区域内选择三个基色。这样自然界中所能观察到的各种颜色，几乎都能由它们匹配出来^[11, 14]。

我们以 C^* 代表被匹配的颜色，以 (R) 、 (G) 、 (B) 分别代表产生混合色的红、绿、蓝三基色，以 R 、 G 、 B 分别代表红、绿、蓝三基色的数量，即三刺激值，则可以写出颜色方程：

$$C^* \equiv R(R) + G(G) + B(B) \quad (2.1)$$

式中“ \equiv ”代表匹配，即视觉上相等。为匹配等能光谱色的三基色数量称为光谱三刺激值，一般用 \bar{r} 、 \bar{g} 、 \bar{b} 表示。

在色度学中，一般不直接用三基色的数量 R 、 G 、 B 来表示颜色，而用三基色各自在 $R+G+B$ 总量中的相对比例来表示。这一比例值叫做色度坐标，即红绿蓝三基色的色度坐标 r 、 g 、 b 分别为：

$$\begin{cases} r = \frac{R}{R+G+B} \\ g = \frac{G}{R+G+B} \\ b = \frac{B}{R+G+B} \end{cases} \quad (2.2)$$

由于 $r+g+b=1$ ，所以只用 r 和 g 即可表示一个颜色。那么，某一特定颜色 C^* 的一个单位 (C) 的方程可以写成：

$$(C) = r(R) + g(G) + b(B) \quad (2.3)$$

2.2 CIE 标准色度学系统

在实际工程中往往需要对颜色进行定量计算，现代色度学采用国际照明委员会(CIE)所规定的一套颜色测量原理、数据和计算方法，称为 CIE 标准色度学系统。

2.2.1 1931CIE - RGB 颜色系统

1931 年 CIE 在 2° 视场条件下，进行了专门的颜色混合匹配实验，定出匹配等能光谱色的 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$ 光谱三刺激值，称为“1931 CIE-RGB 系统标准色度观察者光谱三刺激值”，简称为“1931 CIE-RGB 光谱三刺激值”，如图 2.1 所示。进行颜色匹配实验时，1931 CIE-RGB 系统采用波长为 700 nm 的红、546.1 nm 的绿和 435.8 nm 的蓝作为 (R) 、 (G) 、 (B) 三原色^[11, 15-18]，如图 2.2 所示。

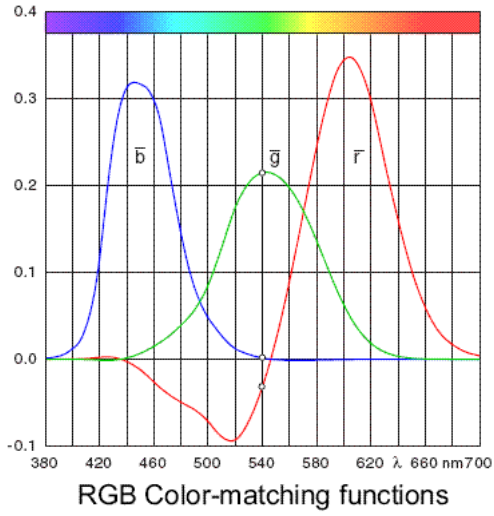


图 2.1 1931 CIE-RGB 光谱三刺激值

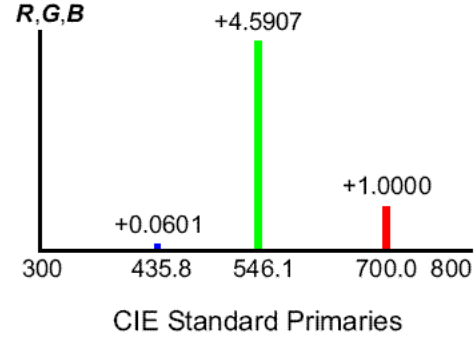


图 2.2 1931CIE-RGB 标准色

则根据颜色相加原理，对于任一个光谱功率分布为 $S(\lambda)$ 的光源，在 1931 CIE-RGB 系统中的三刺激值应该等于匹配该光源各波长光谱色的三刺激值各自之和，即：

$$\begin{cases} R = \int_{\lambda} kS(\lambda)\bar{r}(\lambda)d\lambda \\ G = \int_{\lambda} kS(\lambda)\bar{g}(\lambda)d\lambda \\ B = \int_{\lambda} kS(\lambda)\bar{b}(\lambda)d\lambda \end{cases} \quad (2.4)$$

式中， k 是调整因数，相应的，可以得到其在 1931CIE-RGB 系统中红绿蓝三基色的色度坐标 r 、 g 、 b ，如式 (2.5) 所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} r = \frac{\int_{\lambda} kS(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} kS(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda} kS(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda} kS(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda} \\ g = \frac{\int_{\lambda} kS(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} kS(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda} kS(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda} kS(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda} \\ b = \frac{\int_{\lambda} kS(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} kS(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda} kS(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda} kS(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda} \end{array} \right. \quad (2.5)$$

图 2.3 是根据 1931 CIE-rgb 光谱三刺激值所绘制的色度图。色度图中，马蹄形曲线是光谱轨迹。

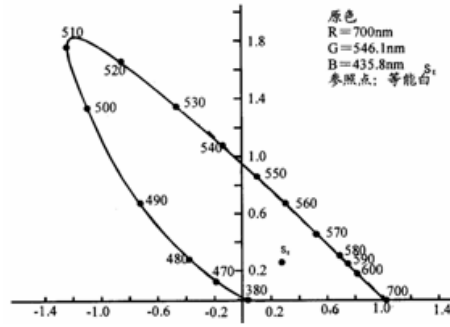


图 2.3 1931 CIE-rgb 系统色度图

2.2.2 1931CIE -XYZ 颜色系统

1931CIE-rgb 系统的光谱三刺激值 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$ 是从实验得出的，本来可以用于色度学计算以及色彩的定标。但是，用来定标某些光谱色的原色时会出现负值，如图 2.1 中的 $\bar{r}(\lambda)$ 刺激值以及图 2.2 色度图中的 r 坐标都会出现负值，这样，计算起来正负交替十分不便，也不易理解。因此 1931 年 CIE 推荐了一个新的国际通用的标准色度学系统——1931CIE-XYZ 系统^[11, 15-18]。

1931CIE-XYZ 颜色系统是在 1931CIE-rgb 颜色系统的基础上，用数学方法，

选用三个理想的三原色 (X) 、 (Y) 、 (Z) ，将 1931CIE- RGB 系统中的光谱三刺激值 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$ 和色度坐标 r 、 g 、 b 均变为正值。三原色 (X) 代表红原色， (Y) 代表绿原色， (Z) 代表蓝原色， (X) 、 (Y) 、 (Z) 三原色不是物理上真正的实色，而是虚构的假想色。

建立 1931CIE- XYZ 系统主要基于以下几点考虑：

1. (X) 、 (Y) 、 (Z) 三原色形成的三角形将整个光谱色轨迹包含在内，使其色度坐标均变为正值。
2. 光谱轨迹 540nm-700nm 在 1931CIE- RGB 色度图上基本是一段直线，新的 XYZ 三角形的 XY 边和这段直线重合。
3. 规定 (X) 和 (Z) 的亮度为 0， XYZ 三角形的 XZ 线称为无亮度线。

由此确定 (X) 、 (Y) 、 (Z) 三原色在 1931CIE- RGB 系统的坐标 r 、 g 、 b ，可以求得由 1931CIE- RGB 系统色度坐标向 1931CIE- XYZ 系统色度坐标转换的关系为：

$$\begin{cases} x = \frac{0.490r + 0.310g + 0.200b}{0.667r + 1.132g + 1.200b} \\ y = \frac{0.177r + 0.821g + 0.010b}{0.667r + 1.132g + 1.200b} \\ z = \frac{0.000r + 0.010g + 0.990b}{0.667r + 1.132g + 1.200b} \end{cases} \quad (2.6)$$

通过式(2.6)的变换，对于光谱色或一切自然界的颜色而言，色度坐标均为正值。为了使用方便， XYZ 三角形经转换后变为直角三角形，如图 2.4 所示。

在 1931CIE- XYZ 系统中，用于匹配等能光谱三刺激值的 (X) 、 (Y) 、 (Z) 三原色的数量，叫做“CIE 1931 标准观察者光谱三刺激值”，记为 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 。并且规定 $\bar{y}(\lambda)$ 与明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 一致，则光谱三刺激值为：

$$\begin{cases} \bar{x}(\lambda) = \frac{x(\lambda)}{y(\lambda)} \bullet V(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) = V(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) = \frac{z(\lambda)}{y(\lambda)} \bullet V(\lambda) \end{cases} \quad (2.7)$$

式中 $x(\lambda)$ 、 $y(\lambda)$ 、 $z(\lambda)$ 为由式(2.6)转换来的在 1931CIE-XYZ 系统中的色度坐标。CIE 1931 标准观察者光谱三刺激值 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 曲线如图 2.5 所示。

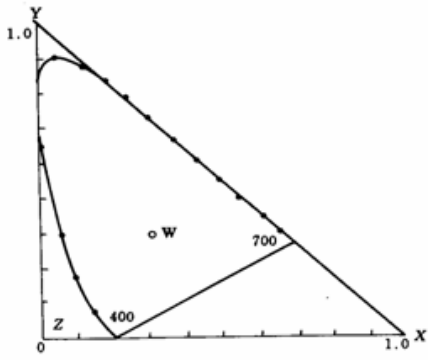


图 2-4 1931 CIE-XYZ 系统色度图

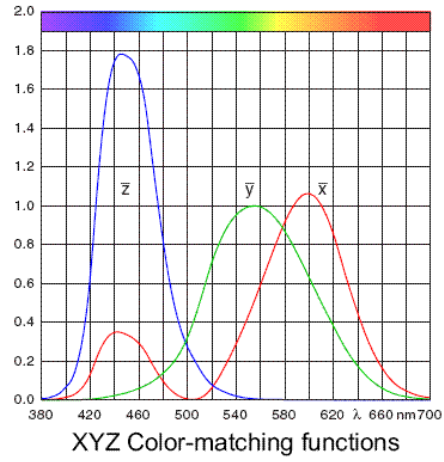


图 2-5 1931 CIE-XYZ 光谱三刺激值

对于任一个光谱功率分布为 $S(\lambda)$ 的光源，在 1931CIE-XYZ 系统中的三刺激值为：

$$\begin{cases} X = \int_{\lambda} kS(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \\ Y = \int_{\lambda} kS(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \\ Z = \int_{\lambda} kS(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \end{cases} \quad (2.8)$$

式中， k 是调整因数。在实际计算中，通常用求和来近似代替积分，即：

$$\begin{cases} X = k \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y = k \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z = k \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{cases} \quad (2.9)$$

同时，对于反射物体有：

$$\begin{cases} X = \int_{\lambda} k S(\lambda) \bar{x}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda = k \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) \rho(\lambda) \Delta\lambda \\ Y = \int_{\lambda} k S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda = k \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \rho(\lambda) \Delta\lambda \\ Z = \int_{\lambda} k S(\lambda) \bar{z}(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda = k \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) \rho(\lambda) \Delta\lambda \end{cases} \quad (2.10)$$

式中， $\rho(\lambda)$ 为物体的光谱反射率。

对于透射物体有：

$$\begin{cases} X = \int_{\lambda} k S(\lambda) \bar{x}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda = k \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) \tau(\lambda) \Delta\lambda \\ Y = \int_{\lambda} k S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda = k \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \tau(\lambda) \Delta\lambda \\ Z = \int_{\lambda} k S(\lambda) \bar{z}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda = k \sum_{\lambda} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) \tau(\lambda) \Delta\lambda \end{cases} \quad (2.11)$$

式中， $\tau(\lambda)$ 为物体的光谱透过率。则在 1931 CIE-XYZ 系统中相应的色度坐

标 x 、 y 、 z 则分别为：

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z} \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z = \frac{Z}{X+Y+Z} \end{cases} \quad (2.11)$$

2.2.3 颜色宽容量

我们把人眼感觉不出的色彩差别量叫做颜色的宽容量，它反映在色度图上就是两个色度点之间的距离^[11]。1942 年，美国柯达研究所的研究人员麦克亚当研究发现，在 1931CIE-XYZ 系统中，不同位置、不同方向上颜色的宽容量是不相同的，即标准 CIE 色度图上相同的几何距离，在不同的颜色区域里、不同的颜色变化方向上，所对应的视觉颜色差别量大小是不同的：蓝色区域颜色宽容量最小，绿色区域颜色宽容量最大，即在 XYZ 色度图上色度空间是不均匀的，如图 2.6 所示。

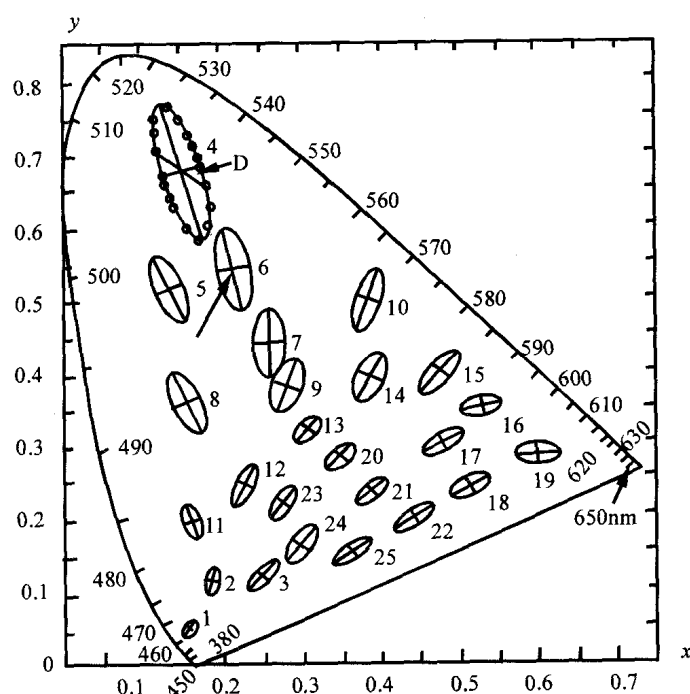


图 2.6 麦克亚当的颜色椭圆形宽容量范围

如果 LED 显示屏上任意显示像素坐标的距离都小于它所在基色的颜色宽容量，那么就可以认为该显示屏不存在色度差异。

2.3 显示系统的颜色复现

由于三原色相加基本上能够产生各种颜色，在显示系统的设计中要选择适当的红、绿、蓝三基色来复现各种颜色。复现的颜色区域为所选定的红、绿、蓝三

基色在色度图上的坐标点所形成的三角形，称之为“色域”，三角形内部的颜色都能被复现出来，三角形外部的颜色不能被复现^[11, 19-20]。

显示系统所选用的三基色 (R) 、 (G) 、 (B) 与 CIE 色度学系统的三基色 (X) 、 (Y) 、 (Z) 是不同的。同一颜色对于两组不同的三原色组，将有不同的三刺激值与色度坐标。如果在不同的颜色系统输入相同的刺激值就会使得同一颜色在两个系统复现为不同的颜色，出现颜色的失真^[20-28]。

这种情况下，如果要将同一颜色在不同的颜色系统复现为同一颜色，我们需要知道这两个颜色系统之间的转换关系，从而可以把某一颜色在一个颜色系统的三刺激值和色度坐标换算成另一颜色系统的三刺激值和色度坐标^[11]。

设第一个颜色系统三原色为 (X) 、 (Y) 、 (Z) ，第二个颜色系统的三原色为 (R) 、 (G) 、 (B) 。匹配一个单位 (R) 原色所用的 (X) 、 (Y) 、 (Z) 三刺激值分别为 X_r 、 Y_r 、 Z_r ，匹配一个单位 (G) 原色所用的 (X) 、 (Y) 、 (Z) 三刺激值分别为 X_g 、 Y_g 、 Z_g ，匹配一个单位 (B) 原色所用的 (X) 、 (Y) 、 (Z) 三刺激值分别为 X_b 、 Y_b 、 Z_b 。则 (R) 、 (G) 、 (B) 可分别为 X_r 、 Y_r 、 Z_r 、 X_g 、 Y_g 、 Z_g 、 X_b 、 Y_b 、 Z_b 所代替。即：

$$\begin{cases} (R) = X_r(X) + Y_r(Y) + Z_r(Z) \\ (G) = X_g(X) + Y_g(Y) + Z_g(Z) \\ (B) = X_b(X) + Y_b(Y) + Z_b(Z) \end{cases} \quad (2.12)$$

如果某一颜色由 R 单位 (R) 原色、 G 单位 (G) 原色、 B 单位 (B) 原色相加组成，则用 (X) 、 (Y) 、 (Z) 系统表示为：

$$\begin{cases} R(R) = R(X_r(X) + Y_r(Y) + Z_r(Z)) \\ G(G) = G(X_g(X) + Y_g(Y) + Z_g(Z)) \\ B(B) = B(X_b(X) + Y_b(Y) + Z_b(Z)) \end{cases} \quad (2.13)$$

即：

$$R(R)+G(G)+B(B)=(X_rR+X_gG+X_bB)(X)+(Y_rR+Y_gG+Y_bB)(Y)+(Z_rR+Z_gG+Z_bB)(Z) \quad (2.14)$$

则在 (X) 、 (Y) 、 (Z) 系统中三刺激值为：

$$\begin{cases} X = X_rR + X_gG + X_bB \\ Y = Y_rR + Y_gG + Y_bB \\ Z = Z_rR + Z_gG + Z_bB \end{cases} \quad (2.15)$$

式(2.15)是一组转换方程，其中 X_r 、 Y_r 、 Z_r 、 X_g 、 Y_g 、 Z_g 、 X_b 、 Y_b 、 Z_b 为转换系数。令：

$$\begin{cases} C_r = X_r + Y_r + Z_r \\ C_g = X_g + Y_g + Z_g \\ C_b = X_b + Y_b + Z_b \end{cases} \quad (2.16)$$

则：

$$\begin{cases} X_r = C_r x_r \\ X_g = C_g x_g \\ X_b = C_b x_b \end{cases} \quad (2.17)$$

$$\begin{cases} Y_r = C_r y_r \\ Y_g = C_g y_g \\ Y_b = C_b y_b \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} Z_r = C_r z_r \\ Z_g = C_g z_g \\ Z_b = C_b z_b \end{cases} \quad (2.19)$$

将式(2.17)到(2.19)代入式(2.16)得到：

$$\begin{cases} X = C_r x_r R + C_g x_g G + C_b x_b B \\ Y = C_r y_r R + C_g y_g G + C_b y_b B \\ Z = C_r z_r R + C_g z_g G + C_b z_b B \end{cases} \quad (2.20)$$

为求解 C_r 、 C_g 、 C_b ，需要先求出式(2.20)的逆方程：

$$\begin{cases} R = \frac{y_g z_b - y_b z_g}{C_r \Delta'} X + \frac{x_b z_g - x_g z_b}{C_r \Delta'} Y + \frac{x_g y_b - x_b y_g}{C_r \Delta'} Z \\ G = \frac{y_b z_r - y_r z_b}{C_g \Delta'} X + \frac{x_r z_b - x_b z_r}{C_g \Delta'} Y + \frac{x_b y_r - x_r y_b}{C_g \Delta'} Z \\ B = \frac{y_r z_g - y_g z_r}{C_b \Delta'} X + \frac{x_g z_r - x_r z_g}{C_b \Delta'} Y + \frac{x_r y_g - x_g y_r}{C_b \Delta'} Z \end{cases} \quad (2.21)$$

其中 Δ' 为转换矩阵的行列式:

$$\Delta' = x_r(y_g z_b - y_b z_g) + x_g(y_b z_r - y_r z_b) + x_b(y_r z_g - y_g z_r) \quad (2.22)$$

将 Δ' 带入式 (2.21), 并选定以参照白光, 将其 X 、 Y 、 Z 三刺激值也带入式 (2.21), 令 $R=G=B=1$, 进行归一化, 就可以求得 C_r 、 C_g 、 C_b 。将求得的 C_r 、 C_g 、 C_b 结果带入式 2.17-2.19 得到相应的转换方程。

两个颜色系统的转换方程对于显示系统颜色的复现有很大的用处。对于任何一个在 CIE 色度系统中, 已知 X 、 Y 、 Z 三刺激值的颜色, 如果要在相应的显示系统上用 (R) 、 (G) 、 (B) 三原色复现这一颜色, 只需带入求得的转换方程式 (2.20) 进行颜色转换, 得出相应的 R 、 G 、 B , 就可以正确复现所要显示的颜色^[11, 13-14]。

2.4 色域转换原理

根据色度学基本原理^[11, 20], 在一个基色对之间产生的颜色坐标位于色域中该基色对的连线上, 当对这些混色加入第三种基色时, 所产生的混合颜色的色度坐标将位于该三种基色所形成的色度三角形内, 这种原则适合所有的色域图^[29-34]。

CIE 色度学系统常用一组 $(X)(Y)(Z)$ 三原色表示颜色的系统, 在全彩 LED 显示屏中用一组 $(R)(G)(B)$ 值来表示颜色的系统, 两个颜色系统的具体关系如式 (2.23):

$$\begin{cases} X = X_r R + X_g G + X_b B \\ Y = Y_r R + Y_g G + Y_b B \\ Z = Z_r R + Z_g G + Z_b B \end{cases} \quad (2.23)$$

其中, X_r 、 Y_r 、 Z_r 为匹配一个单位(R)原色所用的(X)(Y)(Z)原色的数量, X_g 、 Y_g 、 Z_g 为匹配一个单位(G)原色所用的(X)(Y)(Z)原色的数量, X_b 、 Y_b 、 Z_b 为匹配一个单位(B)原色所用的(X)(Y)(Z)原色的数量。

该(X)(Y)(Z)三原色表示的颜色系统的标准颜色空间的数学方程可设为下式:

$$\begin{cases} X_{std} = X_{r_std} R + X_{g_std} G + X_{b_std} B \\ Y_{std} = Y_{r_std} R + Y_{g_std} G + Y_{b_std} B \\ Z_{std} = Z_{r_std} R + Z_{g_std} G + Z_{b_std} B \end{cases} \quad (2.24)$$

其中, X_{r_std} 、 Y_{r_std} 、 Z_{r_std} 为匹配一个单位(R)原色所用的(X)(Y)(Z)标准原色的数量, X_{g_std} 、 Y_{g_std} 、 Z_{g_std} 为匹配一个单位(G)原色所用的(X)(Y)(Z)标准原色的数量, X_{b_std} 、 Y_{b_std} 、 Z_{b_std} 为匹配一个单位(B)原色所用的(X)(Y)(Z)标准原色的数量。

在同一颜色系统中, 将非标准色域空间向建立的标准色域空间转换的过程即为色域空间转换^[35-40]。可以将这个过程分解成两个步骤, 第一个步骤为色度坐标的移动, 第二个步骤为亮度值的调节。

色度坐标的移动, 其实就是将非标准色域空间的离散的色度坐标值, 转换为标准的色度坐标值。该移动过程为在各非标准色域的三基色中混合另两种颜色的过程。即当显示红色时, 掺入绿基色和蓝基色; 当显示绿色时, 掺入了红基色和蓝基色; 当显示蓝色时, 掺入红基色和绿基色。亮度的方向为垂直于色度平面的方向, 亮度值的变更只是对同基色显示时亮度差异的调整。

由上述可知, 非标准空间向标准空间转换过程中, 红基色显示时建立的转换方程为:

$$\begin{cases} X'_r = X_r k_1 R + X_g m_1 R + X_b n_1 R \\ Y'_r = Y_r k_1 R + Y_g m_1 R + Y_b n_1 R \\ Z'_r = Z_r k_1 R + Z_g m_1 R + Z_b n_1 R \end{cases} \quad (2.26)$$

其中， X'_r 、 Y'_r 、 Z'_r 为红基色显示时，对其进行颜色匹配后的三刺激值； k_1 、 m_1 、 n_1 为将非标准红基色修正为标准红基色时的修正参数；其他参数同上。

对非标准绿基色进行校修时，其转换方程为：

$$\begin{cases} X'_g = X_r k_2 G + X_g m_2 G + X_b n_2 G \\ Y'_g = Y_r k_2 G + Y_g m_2 G + Y_b n_2 G \\ Z'_g = Z_r k_2 G + Z_g m_2 G + Z_b n_2 G \end{cases} \quad (2.27)$$

其中， X'_g 、 Y'_g 、 Z'_g 为绿基色显示时，对其进行颜色匹配后的三刺激值； k_2 、 m_2 、 n_2 为将非标准绿基色修正为标准绿基色时的修正参数；其他参数同上。

对非标准蓝基色进行校修时，其转换方程为：

$$\begin{cases} X'_b = X_r k_3 B + X_g m_3 B + X_b n_3 B \\ Y'_b = Y_r k_3 B + Y_g m_3 B + Y_b n_3 B \\ Z'_b = Z_r k_3 B + Z_g m_3 B + Z_b n_3 B \end{cases} \quad (2.28)$$

其中， X'_b 、 Y'_b 、 Z'_b 为蓝基色显示时，对其进行颜色匹配后的三刺激值； k_3 、 m_3 、 n_3 为将非标准蓝基色修正为标准蓝基色时的修正参数；其他参数同上。

将非标准三基色进行转换后，其三刺激值应与对应的标准颜色空间的三刺激值相等，即：

$$\begin{pmatrix} X'_r \\ Y'_r \\ Z'_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{r_std} \\ Y_{r_std} \\ Z_{r_std} \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

$$\begin{pmatrix} X_g' \\ Y_g' \\ Z_g' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{g_std} \\ Y_{g_std} \\ Z_{g_std} \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

$$\begin{pmatrix} X_b' \\ Y_b' \\ Z_b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{b_std} \\ Y_{b_std} \\ Z_{b_std} \end{pmatrix} \quad (2.31)$$

经计算，可得出转换参数 k_1 、 m_1 、 n_1 、 k_2 、 m_2 、 n_2 、 k_3 、 m_3 、 n_3 的值。

$$k_1 = \frac{\begin{vmatrix} X_{r_std} & X_g & X_b \\ Y_{r_std} & Y_g & Y_b \\ Z_{r_std} & Z_g & Z_b \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{vmatrix}} \quad (2.32)$$

$$m_1 = \frac{\begin{vmatrix} X_r & X_{r_std} & X_b \\ Y_r & Y_{r_std} & Y_b \\ Z_r & Z_{r_std} & Z_b \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{vmatrix}} \quad (2.33)$$

$$n_1 = \frac{\begin{vmatrix} X_r & X_g & X_{r_std} \\ Y_r & Y_g & Y_{r_std} \\ Z_r & Z_g & Z_{r_std} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{vmatrix}} \quad (2.34)$$

$$k_2 = \frac{\begin{vmatrix} X_{g_std} & X_g & X_b \\ Y_{g_std} & Y_g & Y_b \\ Z_{g_std} & Z_g & Z_b \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{vmatrix}} \quad (2.35)$$

$$m_2 = \frac{\begin{vmatrix} X_r & X_{g_std} & X_b \\ Y_r & Y_{g_std} & Y_b \\ Z_r & Z_{g_std} & Z_b \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{vmatrix}} \quad (2.36)$$

$$n_2 = \frac{\begin{vmatrix} X_r & X_g & X_{g_std} \\ Y_r & Y_g & Y_{g_std} \\ Z_r & Z_g & Z_{g_std} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{vmatrix}} \quad (2.37)$$

$$k_3 = \frac{\begin{vmatrix} X_{b_std} & X_g & X_b \\ Y_{b_std} & Y_g & Y_b \\ Z_{b_std} & Z_g & Z_b \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{vmatrix}} \quad (2.38)$$

$$m_3 = \frac{\begin{vmatrix} X_r & X_{b_std} & X_b \\ Y_r & Y_{b_std} & Y_b \\ Z_r & Z_{b_std} & Z_b \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{vmatrix}} \quad (2.39)$$

$$n_3 = \frac{\begin{vmatrix} X_r & X_g & X_{b_std} \\ Y_r & Y_g & Y_{b_std} \\ Z_r & Z_g & Z_{b_std} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{vmatrix}} \quad (2.40)$$

由转换参数组成的转换矩阵可表示为：

$$T = \begin{pmatrix} k_1 & k_2 & k_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{pmatrix} \quad (2.41)$$

将转换矩阵中的各个参数赋予具体的含义，又可将转换矩阵表示为：

$$T = \begin{pmatrix} T^{rr} & T^{rg} & T^{rb} \\ T^{gr} & T^{gg} & T^{gb} \\ T^{br} & T^{bg} & T^{bb} \end{pmatrix} \quad (2.42)$$

其中， T^{rr} 代表转换后显示红基色时(R)原色的转换参数， T^{gr} 代表换后显示红基色时(G)原色的转换参数， T^{br} 代表换后显示红基色时(B)原色的转换参数， T^{rg} 代表转换后显示绿基色时(R)原色的转换参数， T^{gg} 代表换后显示绿基色时(G)原色的转换参数， T^{bg} 代表换后显示绿基色时(B)原色的转换参数， T^{rb} 代表转换后显示蓝基色时(R)原色的转换参数， T^{gb} 代表换后显示蓝基色时(G)原色的转换参数， T^{bb} 代表换后显示蓝基色时(B)原色的转换参数。

由此得到，在同一颜色系统中将非标准色域空间转换到标准色域空间的具体实现过程可表达为：

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T^{rr} & T^{rg} & T^{rb} \\ T^{gr} & T^{gg} & T^{gb} \\ T^{br} & T^{bg} & T^{bb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (2.43)$$

2.5 小结

本章节主要介绍了后续章节中 LED 显示屏颜色均匀性校正模型建立和实现的基础，主要包括三基色原理、1931CIE-RGB 系统、1931CIE-XYZ 系统以及代表人眼辨别颜色差异能力的颜色宽容量的介绍，同时，本章节还介绍了颜色复现的推导过程，并据此给出同一颜色系统中通用的色域转换方法。

第 3 章 逐点颜色均匀性校正研究

本章节在第 2 章基本理论和方法介绍的基础上，对全彩 LED 显示屏通用的颜色均匀性校正方法开展研究。

3.1 LED 显示屏颜色空间亮度色度的基本关系

根据色度学原理，人眼只能分辨颜色的三种变化：亮度、色调和饱和度。假定颜色 $A \equiv$ 颜色 B ，颜色 $C \equiv$ 颜色 D ，那么颜色 $A +$ 颜色 $C \equiv$ 颜色 $B +$ 颜色 D 。混合色的总亮度等于组成混合色的各颜色亮度的总和^[11, 41-43]。

在 1931CIE-XYZ 标准色度学系统中，如能设计一种机制，使得在复现图像的每一点上都具有与原物点相同的光谱能量分布，并在亮度上也具有相应比例关系，这样的颜色复现应是最理想的。利用这种机制复现的颜色仅限于由 n 基色所形成的多边形范围之内。

在红绿蓝三基色 LED 显示体系中，首要的问题是各个基色的匹配，它直接关系到复现颜色的质量。因此必须根据选定的白场和基色的色调坐标来进行颜色匹配。不同的显示体系的色彩空间，在不同的亮度情况下都能形成一个复现的颜色范围，就好像不同大小的颜色盘，大的颜色盘比小的能放更多的颜色。一般在整个空间显示体系的亮度低端部分都存在一个较大的颜色盘，即可复现这个显示体系最大的颜色范围。人们一般认为这个颜色盘能代表显示体系颜色空间复现的颜色范围，如图 3.1 所示。实际上，这种看法是不正确的，该颜色范围仅仅表示屏亮度小于亮度值最小的基色的最大亮度时，显示屏所能复现的颜色范围。

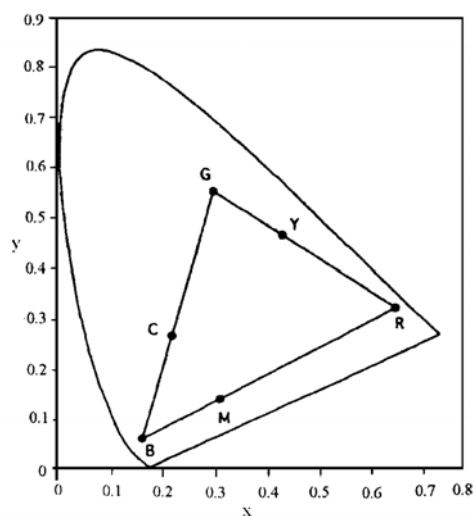


图 3.1 颜色最大复现范围示意图

在正常条件下，可根据色度学要求匹配出显示白场，确定三基色的亮度比例关系，因此各种基色的最大亮度值是不同的。正因为各种基色的最大亮度值存在差异，使得显示的色域的范围边界是不对称的，导致在不同的显示亮度条件下，显示颜色范围产生变化，同时使构成的颜色空间的边界变得复杂化。例如，屏幕的显示亮度提高时，显示颜色的复现范围将产生缩小的现象^[44]，如图 3.2 所示。可以看到，此时的边界呈现出多边形方式的缩进。

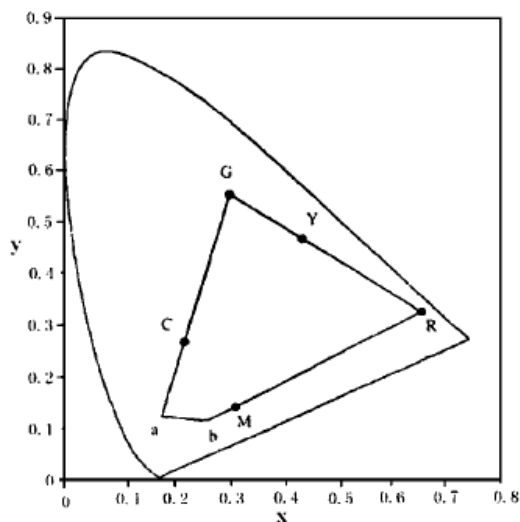


图 3.2 亮度提高时的颜色复现范围示意图

在不同的显示亮度前提下，显示的色域的边界会发生一定变化，这里用简单的三维视图来直观地表示显示亮度对于复现颜色范围的影响，如图 3.3 所示。图

中基底为平面色度域， x 轴和 y 轴为色度坐标， L 轴为显示亮度。可以看到，随着亮度的提升，色度边界是向中心收缩的，当三基色的亮度达到最大时，它们将复现出显示屏的最亮点，为白场的最大值。

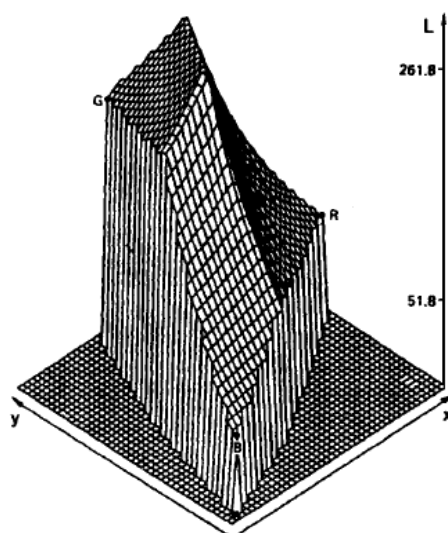


图 3.3 不同显示亮度下颜色复现范围示意图

3.2 LED 显示屏颜色测量技术

LED 是一种主动发光器件，它所发出的光的颜色属于光源色。光源色的测量方法，通常有光谱光度测量法和刺激值直读法两种，当需要高准确度测量时，应当采用光谱光度测量法^[45-49]。而 LED 显示屏是由成千上万颗的独立发光的 LED 发光管阵列组成，所以 LED 显示屏除了可整体视为一个不均匀的面光源外，也可以视为成千上万个互相独立的点光源。要完成 LED 显示屏的颜色均匀性校正，需要采集得到屏上各个显示像素之间的原始亮度色度差异，即在采集过程中需要将屏上各个显示像素的原始亮度色度信息独立得到。

对 LED 显示屏的颜色测量设备，从采集方式上可分为点检测设备和面检测设备两种^[50-53]。一般来讲，高档点检测设备多采用光谱光度测量法，具备采集精度高、体积小、重量轻、使用灵活等优点，且价格低廉，但一次只能采集得到一组显示像素的亮度色度数据；面检测设备则得益于 CCD 技术的发展，将高精度的 XYZ 滤镜和高分辨率的 CCD 相结合，一次可以采集得到上百甚至上千显示像素点的亮度色度数据，但相对点检测设备，其采集精度较低，对采集环境要求苛刻，

价格也动辄几十万甚至上百万。市场上典型的点检测设备和面检测设备的性能参数对比如表 3.1 所示。

表 3.1 典型点检测设备和面检测设备性能参数对比

类 型	点检测设备	面检测设备
设备型号	PR655	CA2000
设备厂商	PHOTO RESEARCH	KONICA MINOLTA
设备国别	美国	日本
亮度精度	$\pm 2\%$	$\pm 3\%$
色度精度	± 0.0015	± 0.005
测量距离	$>0.35\text{m}$	0.25m, 0.5m, 1m, 2m
重 量	1.7kg	3.5kg
价 格	约 15 万	约 60 万

由表 3.1 可以看出，点检测设备 PR655 采集精度要大大高于面检测设备 CA2000，且采集距离灵活，重量轻，使用方便，价格也只有 CA2000 的 1/4。另外，市场上针对 LED 显示屏的面检测设备很少，而点检测设备的相关技术则成熟得多，产品种类较多，选择余地大，特别是作为算法研究，也比较适合选用精度较高的点检测设备。

3.3 LED 显示基准颜色空间的定位定标方法研究

LED 显示屏的发光面板是由几万、甚至上百万组独立的 LED 发光管或由 LED 发光管组成的 LED 显示模块组成。受 LED 半导体器件的自身物理特性及其生产工艺等影响，致使 LED 显示屏各个显示像素之间存在不同的亮度和色度的不一致性，使得 LED 显示屏的亮度和色度分布情况复杂。而由这些离散分布带来的显示色域的大小范围以及分布边界也随之复杂化。

图 3.4 根据检测数据给出了某 LED 显示屏幕上部分测定显示像素在相同的驱动条件下，测得的各个显示像素的色度坐标点不一致性的离散分布情况。图中的粉色聚集区域表示红基色的色度坐标点的分布情况，在一般情况下，红基色色度坐标点呈线形的分布，方向由右下指向左上，本实验数据来源于红基色分布复杂的 LED 显示屏，有的红色基色饱和度不足，因此有某些显示像素的色度坐标点并

没有完全分布在线形上。

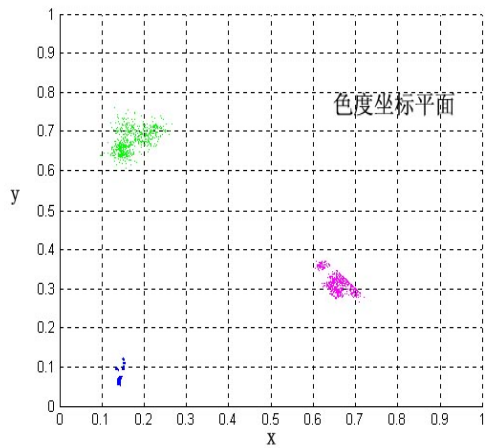


图 3.4 部分显示像素色度坐标的不一致性

图中绿色聚集区域表示绿基色的色度坐标点的分布情况，可以看到绿基色的色度坐标点呈大范围的圈形分布；图中蓝色聚集区域表示蓝基色的色度坐标点的分布情况，可以看到蓝基色色度坐标点分布的离散范围最小，似乎是色度偏差比较小，但人眼看来，其色度偏差甚至比绿基色还要大，这与人眼的“颜色宽容量”在蓝色区域最小有关。

根据 1931CIE-XYZ 标准色度学系统，可以加入亮度参数，来分析测得的各个显示像素颜色空间的分布情况。

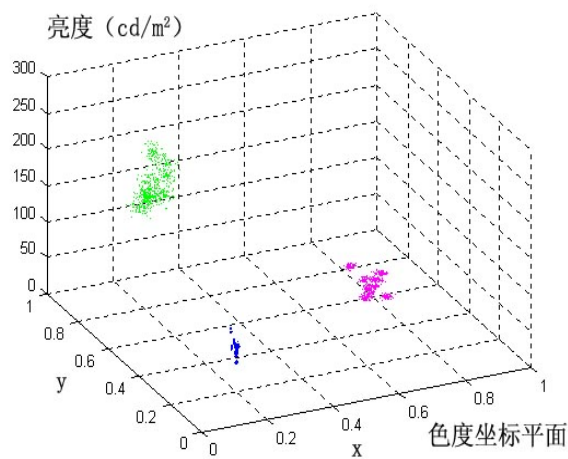


图 3.5 部分显示像素颜色空间分布的不一致性

从图 3.5 可以看到，各个显示像素的亮度、色度在颜色空间的位置是不同的，

也就是说，在相同的显示数据条件下所表现的颜色也完全不同，通过第 2 章的描述，各个显示像素的颜色空间可表示为：

$$\begin{cases} X_c = C_{r-c}x_{r-c}R_c + C_{g-c}x_{g-c}G_c + C_{b-c}x_{b-c}B_c \\ Y_c = C_{r-c}y_{r-c}R_c + C_{g-c}y_{g-c}G_c + C_{b-c}y_{b-c}B_c \\ Z_c = C_{r-c}z_{r-c}R_c + C_{g-c}z_{g-c}G_c + C_{b-c}z_{b-c}B_c \end{cases} \quad (3.1)$$

可以看到，由于各个显示像素的亮度色度参数互不相同，这样就造成 X_c 、 Y_c 、 Z_c 在颜色空间的位置产生不同，后果是同一种颜色数据在 LED 显示屏上会产生色度弥散，导致各个显示像素之间存在颜色偏差，产生“麻点”或“马赛克”现象。

要解决这种颜色不均匀性，进行逐点颜色均匀性校正算法研究，首先面临的的就是基准色域空间的选取问题^[54-56]。根据色度学原理，基准颜色空间选取过大，总有部分显示像素不能完成颜色的均匀性校正；基准颜色空间选取过小，又会损害 LED 显示屏色域广的特有优势，都会影响显示效果。

3.3.1 平面色域的确定

所谓平面色域就是前面提及的所谓颜色盘，体现该显示体系的颜色平面覆盖范围。诚然在此颜色盘上确定一个标准色域是完全可行的，不过确定的方法多种多样^[57-59]；而且根据式 (3.1)，该颜色色域可以让所有的显示像素的颜色空间 $(X_c \ Y_c \ Z_c)$ 通过调整各自的 $(R_c \ G_c \ B_c)$ 数据就可以形成对标准色域的映射。

这里将确定一个标准色度空间分为两个步骤，第一个步骤为色坐标的移动过程，第二个步骤为亮度值变更。此处重点描述的是第一个步骤，即确定一个标准的平面映射色域，从而为确定一个标准的色度空间打下一个良好的基础。根据 (3.1)，假定标准的颜色空间为：

$$\begin{cases} X_{std} = C_{r-std}x_{r-std}R_{std} + C_{g-std}x_{g-std}G_{std} + C_{b-std}x_{b-std}B_{std} \\ Y_{std} = C_{r-std}y_{r-std}R_{std} + C_{g-std}y_{g-std}G_{std} + C_{b-std}y_{b-std}B_{std} \\ Z_{std} = C_{r-std}z_{r-std}R_{std} + C_{g-std}z_{g-std}G_{std} + C_{b-std}z_{b-std}B_{std} \end{cases} \quad (3.2)$$

那么其标准的色域范围由以下的基色色度指标所决定：

$$\begin{cases} X_{r_std} = C_{r_std} x_{r_std} R_{std} \\ Y_{r_std} = C_{r_std} y_{r_std} R_{std} \\ Z_{r_std} = C_{r_std} z_{r_std} R_{std} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} X_{g_std} = C_{g_std} x_{g_std} G_{std} \\ Y_{g_std} = C_{g_std} y_{g_std} G_{std} \\ Z_{g_std} = C_{g_std} z_{g_std} G_{std} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} X_{b_std} = C_{b_std} x_{b_std} B_{std} \\ Y_{b_std} = C_{b_std} y_{b_std} B_{std} \\ Z_{b_std} = C_{b_std} z_{b_std} B_{std} \end{cases} \quad (3.5)$$

其中,

$$\begin{cases} x_{r_std} = \frac{X_{r_std}}{X_{r_std} + Y_{r_std} + Z_{r_std}} \\ y_{r_std} = \frac{Y_{r_std}}{X_{r_std} + Y_{r_std} + Z_{r_std}} \\ x_{g_std} = \frac{X_{g_std}}{X_{g_std} + Y_{g_std} + Z_{g_std}} \\ y_{g_std} = \frac{Y_{g_std}}{X_{g_std} + Y_{g_std} + Z_{g_std}} \\ x_{b_std} = \frac{X_{b_std}}{X_{b_std} + Y_{b_std} + Z_{b_std}} \\ y_{b_std} = \frac{Y_{b_std}}{X_{b_std} + Y_{b_std} + Z_{b_std}} \end{cases} \quad (3.6)$$

式(3.6)表示标准颜色空间的基准色度指标, 这些坐标决定了标准色域的范围。对于屏幕上的任何一个颜色 $(X_c \ Y_c \ Z_c)$, 都可以通过调节 $(R_c \ G_c \ B_c)$ 的数据映射到标准颜色空间 $(X_{std} \ Y_{std} \ Z_{std})$ 。所以如何对式(3.6)中的基准色度坐标进行选取, 成为平面色域确定的一个重要步骤。

通常为了选取方便, 标准颜色的定标参数可以这样选取:

$$\begin{cases} x_{r_std} = \min(x_{r_c}) \\ y_{r_std} = \max(y_{r_c}) \\ x_{g_std} = \max(x_{g_c}) \\ y_{g_std} = \min(y_{g_c}) \\ x_{b_std} = \max(x_{b_c}) \\ y_{b_std} = \max(y_{r_c}) \end{cases} \quad (3.7)$$

在许多情况下，式（3.7）可以有效地确定标准色域，但是该方法在某些条件下也不能满足标准色域定标的需要。

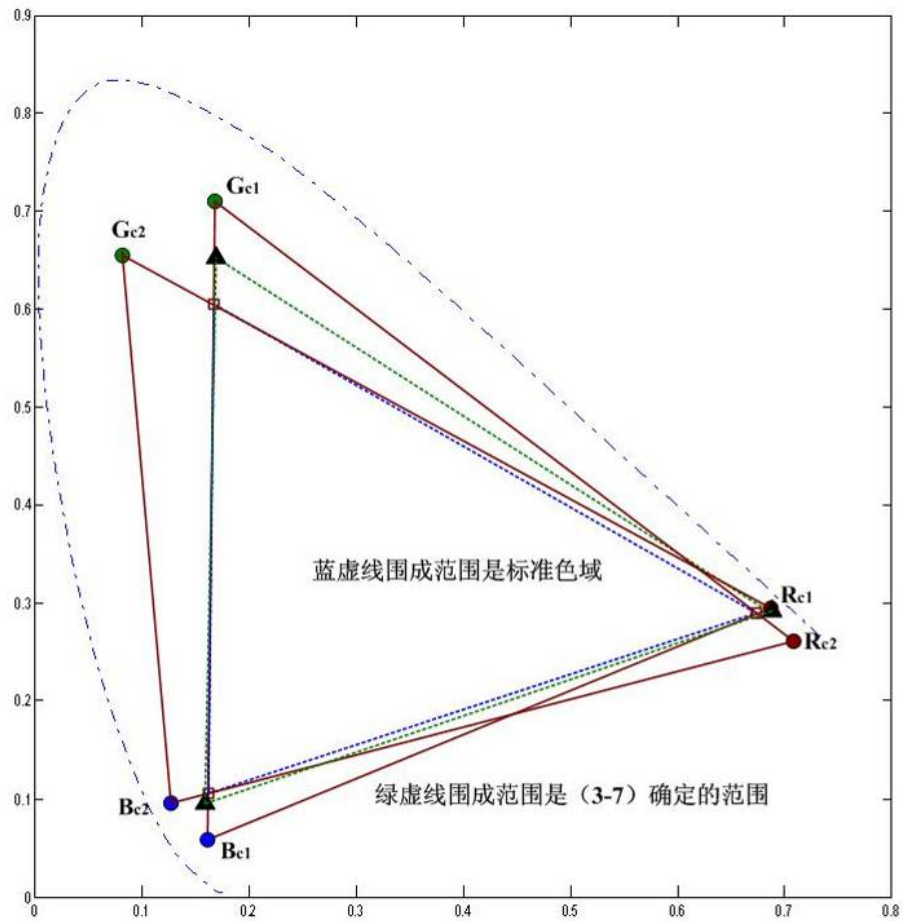


图 3.6 基于极值的平面标准色域选取示意图

如图 3.6 所示，这里 LED 显示屏上的不同颜色区域有 2 种，一种为

$(R_{c1} \ G_{c1} \ B_{c1})$ ，色度坐标参数分别为 x_{r_c1} 、 y_{r_c1} 、 x_{g_c1} 、 y_{g_c1} 、 x_{b_c1} 、 y_{b_c1} ，另一种为 $(R_{c2} \ G_{c2} \ B_{c2})$ ，色度坐标参数分别为 x_{r_c2} 、 y_{r_c2} 、 x_{g_c2} 、 y_{g_c2} 、 x_{b_c2} 、 y_{b_c2} ，其色盘有重叠部分，为了找到它们之间的标准色域范围，若采用式 (3.7) 提出的方法，则其形成的基准色度坐标为 x'_{r_std} 、 y'_{r_std} 、 x'_{g_std} 、 y'_{g_std} 、 x'_{b_std} 、 y'_{b_std} ，如图中黑色三角形标明的色度坐标点所示。而根据色度学原理，显而易见， G_{c2} 是无法调整到 G'_{std} 的；同样 B_{c2} 也调整不到 B'_{std} 的位置。

也就是说，无论我们选取那组 $(R_{c2} \ G_{c2} \ B_{c2})$ 显示数据，也不会得到：

$$\begin{cases} x'_{g_std} = x_{g_c2} \\ y'_{g_std} = y_{g_c2} \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\begin{cases} x'_{b_std} = x_{b_c2} \\ y'_{b_std} = y_{b_c2} \end{cases} \quad (3.9)$$

这样，式 (3.7) 提出的方法并不适合所有的色度情况，因此，为了简便实用，可将其修订为：

$$\begin{cases} x_{r_std} = \min(x_{r_c}) \pm \Delta x_{r_c} \\ y_{r_std} = \max(y_{r_c}) \pm \Delta y_{r_c} \\ x_{g_std} = \max(x_{g_c}) \pm \Delta x_{g_c} \\ y_{g_std} = \min(y_{g_c}) \pm \Delta y_{g_c} \\ x_{b_std} = \max(x_{b_c}) \pm \Delta x_{b_c} \\ y_{b_std} = \max(y_{r_c}) \pm \Delta y_{b_c} \end{cases} \quad (3.10)$$

但是可以看到， Δx_{r_c} 、 Δy_{r_c} 、 Δx_{g_c} 、 Δy_{g_c} 、 Δx_{b_c} 、 Δy_{b_c} 的数值调整的不定因素会使结果产生很大的不确定性，更为重要的是即使通过式 (3.10) 的调整确定了可实现所有显示像素颜色复现的标准色域，这一标准色域也不是所应该找到的最大色调的区域，会直接降低标准色域的颜色复现范围。

这种方案虽然比较适合于工程性的方案，但是对于本论文研究来说是不严谨

的方法，会造成不容许的偏差，并不是理想的选择。对此，本论文提出一种基于线簇交集的方法来进行标准色度色标的确定，如图 3.7 所示。在图 3.7 中，假定需要校正的不同颜色组为 i 组，即最大存在 $3i$ 个不同的基色色度坐标参数，由此形成的调整连线为 $3i$ 条，其中 L_{Rci_Gci} 存在 i 条， L_{Rci_Bci} 存在 i 条， L_{Bci_Gci} 存在 i 条，这样就形成 3 组大的线簇，这些线簇的交集集中在 R、G、B 附近，分别命名为 $\Phi(R)$ 、 $\Phi(G)$ 、 $\Phi(B)$ 。

图 3.7 表明了这一情况，可以看到，线簇 L_{Rci_Gci} 与 L_{Rci_Bci} 出现了集中的相交，其中 L_{Rci_Gci} 与 L_{Rci_Bci} 的自身交集基本在各自的 RG 段和 RB 段。这里以 $\Phi(R)$ 交集区域红基色基准色坐标的选取为例介绍平面色域基准色度坐标的选取过程。

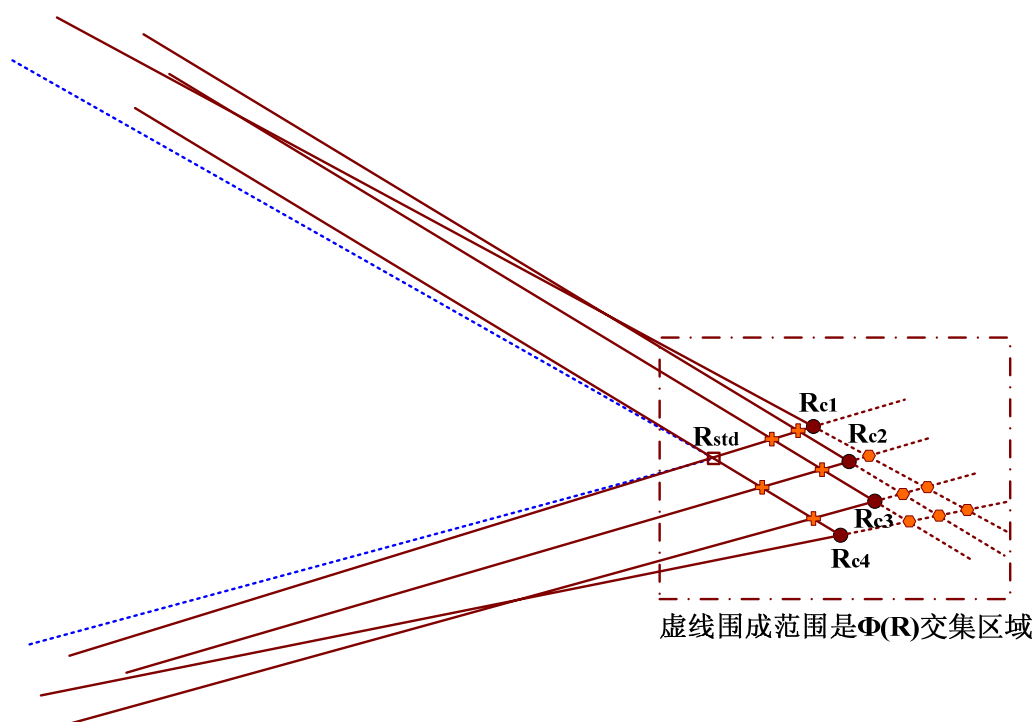


图 3.7 基于线簇交集的平面标准色域选取示意图

在 $\Phi(R)$ 交集的区域，图中方框内的点集，可以看到 L_{Rci_Gci} 与 L_{Rci_Bci} 形成了 3 个交集区域：一是内部交集区域，为图中的十字形标点，一是原始坐标点，图中是红色圆点表示；一是外部交集区域，为图中六边形点集。

对于外部交集区域，这些点是 L_{Rci_Gci} 与 L_{Rci_Bci} 交汇的外延点，在原始坐标点范围以外，因此这些色度坐标点不可能成为标准色度坐标点；而一般情况下，原始坐标点也不会成为选取的标准的色度坐标点；所以，标准色度坐标点的选取应该在内部交集区域内。按这样的规律分析，可以得到以下的结论：

在 L_{Rci_Gci} 与 L_{Rci_Bci} 形成的共 $2i$ 条线形中，交集指数的最大数值为 i^2 ，在这些线形的交集中，如果按 RG 方向的线簇交点区分，可以写为：

$$\begin{cases} \Phi_{rg1} = \Phi(L_{Rc1_Gci}) \cap (L_{Rci_Bci}) \\ \Phi_{rg2} = \Phi(L_{Rc2_Gci}) \cap (L_{Rci_Bci}) \\ \dots \\ \Phi_{rgi} = \Phi(L_{Rci_Gci}) \cap (L_{Rci_Bci}) \end{cases} \quad (3.11)$$

在这些线簇交点区域，选取的方式是参照 2.3 中所描述的颜色复现原理的中间色调基点的距离来判断最终的标准参考点。

由于在 RG 方向的线簇交点区理论上存在 i 个交点，由此令这些交点的色度指标为：

$$\begin{cases} x_{RG_{i_j}} = x[\Phi(L_{Rci_Gci}) \cap (L_{Rcj_Bcj})] \\ y_{RG_{i_j}} = y[\Phi(L_{Rci_Gci}) \cap (L_{Rcj_Bcj})] \end{cases} \quad (3.12)$$

令中间色调基点的色度指标为 $(x_0 \ y_0)$ ，这样中间色调基点的色度距离为：

$$D(\Phi(RG_{i_j})) = \sqrt{(x_0 - x_{RG_{i_j}})^2 + (y_0 - y_{RG_{i_j}})^2} \quad (3.13)$$

通过对不同线簇的交集的色度距离进行计算，最终得到 $\min(D(\Phi(RG_{i_j})))$ ，找到该最小距离的对应色度点，得到：

$$\begin{cases} x_{r_std} = x[\min(D(\Phi(RG_{i_j})))]) \\ y_{r_std} = y[\min(D(\Phi(RG_{i_j})))]) \end{cases} \quad (3.14)$$

同样可以得到：

$$\begin{cases} x_{g_std} = x[\min(D(\Phi(GR_{i_j}))) \\ y_{g_std} = y[\min(D(\Phi(GR_{i_j}))) \\ x_{b_std} = x[\min(D(\Phi(BR_{i_j}))) \\ y_{b_std} = y[\min(D(\Phi(BR_{i_j}))) \end{cases} \quad (3.15)$$

这样就可以得到，红基色基准色度坐标 $(x_{r_std} \quad y_{r_std})$ ；绿基色基准色度坐标 $(x_{g_std} \quad y_{g_std})$ ；蓝基色基准色度坐标 $(x_{b_std} \quad y_{b_std})$ 。平面色域已经进行了确定。

3.3.2 标准色度空间的确定

根据 2.4 中所述原理，过红基色基准色度坐标、绿基色基准色度坐标和蓝基色基准色度坐标做垂直于色度平面的直线，该 3 条直线围成的 3 棱柱作为基准色度空间基本外壁。该 3 条直线定义为基准色度空间参考线。而基色亮度方面的变化是在这些参考线方向发生变化的。

同平面色域选取的情况类似，标准色度空间亮度数值的选取通常可以挑选各个基色的最低亮度作为标准空间的亮度数值，即：

$$\begin{cases} L_{r_std} = \min(L_{r_c}) \\ L_{g_std} = \max(L_{g_c}) \\ L_{b_std} = \max(L_{b_c}) \end{cases} \quad (3.16)$$

但是这样选取带来两方面的问题，一是色度空间会产生不必要的损失，这方面容易在亮度较低的基色方面发生，此外由于这种选取方法打破了不同模块的颜变色组合，产生了很大的空间浪费。

二是有时这种情况会由于模块的颜色组合而产生如下问题。

在任何两组 $(R_{ci} \quad G_{ci} \quad B_{ci})$ 和 $(R_{cj} \quad G_{cj} \quad B_{cj})$ 空间平面斜率确定情况下，例如在最高亮度的绿颜色断电， $(R_{cj} \quad G_{cj} \quad B_{cj})$ 的 L_{g_cj} 比 L_{g_ci} 大，所以绿基准色度空间参考线相交的参考点的亮度数值为 L_{g_ci} ，但是由于颜色组合的问题，

$(R_{cj} \ G_{cj} \ B_{cj})$ 空间平面在绿基准色度空间参考线方向的下降量大，即偏微分向量数值很大，这样与绿基准色度空间参考线相交形成的 L'_{g_std} 反而小于 L_{g_ci} ，造成色度空间的选取错误。

这样，考虑到对于任何一组 $(R_{ci} \ G_{ci} \ B_{ci})$ ，色度参数为 x_{r_ci} 、 y_{r_ci} 、 x_{g_ci} 、 y_{g_ci} 、 x_{b_ci} 、 y_{b_ci} ，亮度数值为 $(L_{r_ci} \ L_{g_ci} \ L_{b_ci})$ ，在空间分布的这3个点会形成3条空间的线段（一般这3个点是不会在同一线段上的），任意选取其中的2条线段计算其空间斜率。

空间斜率 u 可以表示为：

$$\begin{cases} u_{x_ci} = x_{r_ci} - x_{g_ci} \\ u_{y_ci} = y_{r_ci} - y_{g_ci} \\ u_{z_ci} = L_{r_ci} - L_{g_ci} \end{cases} \quad (3.17)$$

空间斜率 v 可以表示为：

$$\begin{cases} v_{x_ci} = x_{r_ci} - x_{b_ci} \\ v_{y_ci} = y_{r_ci} - y_{b_ci} \\ v_{z_ci} = L_{r_ci} - L_{b_ci} \end{cases} \quad (3.18)$$

$$\begin{cases} u_{ci} = [u_{x_ci} \ u_{y_ci} \ u_{z_ci}] \\ v_{ci} = [v_{x_ci} \ v_{y_ci} \ v_{z_ci}] \end{cases} \quad (3.19)$$

根据式(3.18)和(3.19)可确定该平面的向量 $VTL_{ci} = cross(u_{ci} \ v_{ci})$ ，每个平面同3条基准色度空间参考线分别有一个交点，一共有3个，分别对应3个基色，记为 $(x_{r_std} \ y_{r_std} \ L_{r_vtl_ci})$ 、 $(x_{g_std} \ y_{g_std} \ L_{g_vtl_ci})$ 和 $(x_{b_std} \ y_{b_std} \ L_{b_vtl_ci})$ 。

将所有的平面向量 VTL_{ci} 同3条基准色度空间参考线相交，得到3组空间坐标点集合，它们分布在3条基准色度空间参考线上，特征在于亮度数值不同，分别为 $L_{b_vtl_ci}$ 、 $L_{g_vtl_ci}$ 和 $L_{r_vtl_ci}$ ；在空间坐标点集合 $(x_{r_std} \ y_{r_std} \ L_{r_vtl_ci})$ 中选取最小的色度空间点 $(x_{r_std} \ y_{r_std} \ \min(L_{r_vtl_ci}))$ 作为红基色基准色度空间点，

记为 $(x_{r_std} \ y_{r_std} \ Y_{r_std})$ ；在空间坐标点集合 $(x_{g_std} \ y_{g_std} \ L_{g_vtl_ci})$ 中选取最小的色度空间点 $(x_{g_std} \ y_{g_std} \ \min(L_{g_vtl_ci}))$ 作为绿基色基准色度空间点，记为 $(x_{g_std} \ y_{g_std} \ Y_{g_std})$ ；在空间坐标点集合 $(x_{b_std} \ y_{b_std} \ L_{b_vtl_ci})$ 中选取最小的色度空间点 $(x_{b_std} \ y_{b_std} \ \min(L_{b_vtl_ci}))$ 作为蓝基色基准色度空间点，记为 $(x_{b_std} \ y_{b_std} \ Y_{b_std})$ 。

这样就得到了 LED 显示屏基准颜色空间的色度参数 $(x_{r_std} \ y_{r_std} \ Y_{r_std})$ 、 $(x_{g_std} \ y_{g_std} \ Y_{g_std})$ 、 $(x_{b_std} \ y_{b_std} \ Y_{b_std})$ ，相应的，该基准颜色空间可以描述为：

$$\begin{cases} X_{std} = \frac{Y_{r_std}}{y_{r_std}} x_{r_std} R + \frac{Y_{g_std}}{y_{g_std}} x_{g_std} G + \frac{Y_{b_std}}{y_{b_std}} x_{b_std} B \\ Y_{std} = \frac{Y_{r_std}}{y_{r_std}} y_{r_std} R + \frac{Y_{g_std}}{y_{g_std}} y_{g_std} G + \frac{Y_{b_std}}{y_{b_std}} y_{b_std} B \\ Z_{std} = \frac{Y_{r_std}}{y_{r_std}} z_{r_std} R + \frac{Y_{g_std}}{y_{g_std}} z_{g_std} G + \frac{Y_{b_std}}{y_{b_std}} z_{b_std} B \end{cases} \quad (3.20)$$

3.4 逐点颜色均匀性校正算法实现

根据 2.4 章节中色域转换原理的相关描述，可把每一显示像素视为一独立的颜色空间，只要采集得到 LED 显示屏上每一显示像素的亮度和色度坐标值，即可依据色域转换原理将 LED 显示屏上所有显示像素的颜色空间转换到 3.3 章节所确定的基准颜色空间，实现全彩 LED 显示屏的逐点颜色均匀性校正。

在进行工程实践之前，我们假定已经获取到了 LED 显示屏上每一显示像素的亮度和色度坐标值。对屏上任意显示像素 p_i ，记其红基色亮度和色度坐标值分别为： $Y_{r_p_i}$ 、 $x_{r_p_i}$ 、 $y_{r_p_i}$ ，绿基色亮度和色度坐标值分别为： $Y_{g_p_i}$ 、 $x_{g_p_i}$ 、 $y_{g_p_i}$ ，

蓝基色亮度和色度坐标值分别为： Y_{b-p_i} 、 x_{b-p_i} 、 y_{b-p_i} 。那么，这一显示像素代表的颜色空间可描述为：

$$\begin{cases} X_{p_i} = \frac{Y_{r-p_i}}{y_{r-p_i}} x_{r-p_i} R + \frac{Y_{g-p_i}}{y_{g-p_i}} x_{g-p_i} G + \frac{Y_{b-p_i}}{y_{b-p_i}} x_{b-p_i} B \\ Y_{p_i} = \frac{Y_{r-p_i}}{y_{r-p_i}} y_{r-std} R + \frac{Y_{g-p_i}}{y_{g-p_i}} y_{g-std} G + \frac{Y_{b-p_i}}{y_{b-p_i}} y_{b-p_i} B \\ Z_{p_i} = \frac{Y_{r-p_i}}{y_{r-p_i}} z_{r-std} R + \frac{Y_{g-p_i}}{y_{g-p_i}} z_{g-std} G + \frac{Y_{b-p_i}}{y_{b-p_i}} z_{b-p_i} B \end{cases} \quad (3.21)$$

根据式 (3.20) 和 (3.21)，即可求出显示屏上任意显示像素 p_i 完成颜色均匀性校正所需要的系数转换矩阵 T 的表达式，如式 (3.22) 所示：

$$T = \begin{pmatrix} T^{rr} & T^{rg} & T^{rb} \\ T^{gr} & T^{gg} & T^{gb} \\ T^{br} & T^{bg} & T^{bb} \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

其中，各元素 T^{rr} 、 T^{rg} 、 T^{rb} 、 T^{gr} 、 T^{gg} 、 T^{gb} 、 T^{br} 、 T^{bg} 、 T^{bb} 分别为：

$$T^{rr} = \frac{\frac{Y_{r-std}}{Y_{r-p_i}}}{y_{r-p_i}} \begin{vmatrix} x_{r-std} & x_{g-p_i} & x_{b-p_i} \\ y_{r-std} & y_{g-p_i} & y_{b-p_i} \\ z_{r-std} & z_{g-p_i} & z_{b-p_i} \end{vmatrix} \quad (3.23)$$

$$T^{rg} = \frac{\frac{Y_{r-std}}{Y_{g-p_i}}}{y_{g-p_i}} \begin{vmatrix} x_{r-p_i} & x_{r-std} & x_{b-p_i} \\ y_{r-p_i} & y_{r-std} & y_{b-p_i} \\ z_{r-p_i} & z_{r-std} & z_{b-p_i} \end{vmatrix} \quad (3.24)$$

$$T^{rb} = \frac{\frac{Y_{r_std}}{y_{r_std}}}{\frac{Y_{b_p_i}}{y_{b_p_i}}} \left| \begin{array}{ccc} x_{r_p_i} & x_{g_p_i} & x_{r_std} \\ y_{r_p_i} & y_{g_p_i} & y_{r_std} \\ z_{r_p_i} & z_{g_p_i} & z_{r_std} \end{array} \right| \quad (3.25)$$

$$T^{gr} = \frac{\frac{Y_{g_std}}{y_{g_std}}}{\frac{Y_{r_p_i}}{y_{r_p_i}}} \left| \begin{array}{ccc} x_{g_std} & x_{g_p_i} & x_{b_p_i} \\ y_{g_std} & y_{g_p_i} & y_{b_p_i} \\ z_{g_std} & z_{g_p_i} & z_{b_p_i} \end{array} \right| \quad (3.26)$$

$$T^{gs} = \frac{\frac{Y_{g_std}}{y_{g_std}}}{\frac{Y_{g_p_i}}{y_{g_p_i}}} \left| \begin{array}{ccc} x_{r_p_i} & x_{g_std} & x_{b_p_i} \\ y_{r_p_i} & y_{g_std} & y_{b_p_i} \\ z_{r_p_i} & z_{g_std} & z_{b_p_i} \end{array} \right| \quad (3.27)$$

$$T^{gb} = \frac{\frac{Y_{g_std}}{y_{g_std}}}{\frac{Y_{b_p_i}}{y_{b_p_i}}} \left| \begin{array}{ccc} x_{r_p_i} & x_{g_p_i} & x_{g_std} \\ y_{r_p_i} & y_{g_p_i} & y_{g_std} \\ z_{r_p_i} & z_{g_p_i} & z_{g_std} \end{array} \right| \quad (3.28)$$

$$T^{br} = \frac{\begin{matrix} Y_{b_std} \\ y_{b_std} \end{matrix}}{\begin{matrix} Y_{r_p_i} \\ y_{r_p_i} \end{matrix}} \begin{vmatrix} x_{b_std} & x_{g_p_i} & x_{b_p_i} \\ y_{b_std} & y_{g_p_i} & y_{b_p_i} \\ z_{b_std} & z_{g_p_i} & z_{b_p_i} \end{vmatrix} \quad (3.29)$$

$$T^{gg} = \frac{\begin{matrix} Y_{b_std} \\ y_{b_std} \end{matrix}}{\begin{matrix} Y_{g_p_i} \\ y_{g_p_i} \end{matrix}} \begin{vmatrix} x_{r_p_i} & x_{b_std} & x_{b_p_i} \\ y_{r_p_i} & y_{b_std} & y_{b_p_i} \\ z_{r_p_i} & z_{b_std} & z_{b_p_i} \end{vmatrix} \quad (3.30)$$

$$T^{gb} = \frac{\begin{matrix} Y_{b_std} \\ y_{b_std} \end{matrix}}{\begin{matrix} Y_{b_p_i} \\ y_{b_p_i} \end{matrix}} \begin{vmatrix} x_{r_p_i} & x_{g_p_i} & x_{b_std} \\ y_{r_p_i} & y_{g_p_i} & y_{b_std} \\ z_{r_p_i} & z_{g_p_i} & z_{b_std} \end{vmatrix} \quad (3.31)$$

理论上，将彩色亮度仪测得的 LED 显示屏上每一显示像素的亮度和色度坐标值以及确定的基准颜色空间的色度参数代入式（3.23）到（3.31），即可求出颜色均匀性校正所需要的转换矩阵。以红基色为例，校正后显示红基色时，控制屏幕亮 T^r 的红、 T^g 的绿和 T^b 的蓝即可实现红基色的校正。

但实际上，用点检测设备完成 LED 显示屏上逐点的亮度和色度坐标的采集，是不可能完成的。理想状况下，以测量并记录一个显示像素一个基色的亮度和色度坐标值的时间为 1 分钟估算，每天连续测量 6 小时，完成像素分辨率为 192×64 的 LED 显示屏每一显示像素的各个基色亮度和色度坐标值的测量也得需要 102 天！考虑到实际测量过程中采集平台的搭建、设备损耗、人力等因素，完成该样屏的测量所需的时间至少要半年。另外，随着 LED 发光器件的衰减，半年以后测得的数据和初始值相比，必定有较大偏差，所以这种测量方法也便失去了可行

性。

3.5 小结

本章节在 LED 显示色域中亮度色度基础关系和相关颜色测量技术介绍的基础上，提出了一种 LED 显示屏基准颜色空间的定位定标方法，并完成 LED 显示屏通用的逐点颜色均匀性校正算法研究，同时分析了这种方法在工程上的可行性，为后续章节内容做了铺垫。

第 4 章 亮度色度分离采集混合校正研究

本章节重点针对第三章提出的理论方法,结合工程实现,对市场上较为普遍的全彩 LED 模块显示屏的颜色均匀性校正方法进行进一步研究。

4.1 全彩 LED 模块显示屏的成像显示特点

全彩 LED 显示屏的发光面板由几万甚至上百万个独立的全彩色发光二极管或由发光二极管组成的显示模块组成,受 LED 半导体器件自身物理特性及其生产工艺影响,显示屏模块内和模块间都存在显示的不一致性,即亮度和色度分布不均^[61-63]。这种不均匀性表现为 LED 显示屏在显示相同的显示数据时所表现的亮度和色彩也完全不同,会造成同一种颜色的颜色数据在显示器上会产生色度弥散。正常条件下,LED 发光器件在拼装成 LED 显示屏之前,通常都要首先组装成基本显示模块单元,然后由该基本显示模块拼装成 LED 显示屏,即全彩 LED 模块显示屏。

4.1.1 成像显示按像素分布

将第三章中 LED 显示屏各像素颜色空间的数学模型具体到全彩 LED 显示屏上,以图 4-1 所示的全彩 LED 模块显示屏为例:该显示屏一共有 $M \times N$ 个显示模块,每个模块包含 $I \times J$ 个像素(图中 $i=8$ 、 $j=8$);第 1 行第 1 列的显示模块记为 m_{1_1} ,第 1 行第 2 列的显示模块记为 m_{1_2} ,第 2 行第 1 列的显示模块记为 m_{2_1} ,以此类推,则第 m 行、第 n 列的显示模块单元可记为 m_{m_n} 。在显示模块 m_{1_1} 中,第 1 行第 1 列的显示像素记为 d_{1_1} ,第 1 行第 2 列的显示像素记为 d_{1_2} ,第 2 行第 1 列的显示像素记为 d_{2_1} ,以此类推,则第 i 行、第 j 列的显示像素可记为 d_{i_j} 。显示屏上每一个显示模块内的各像素都按这种方式描述和标记。

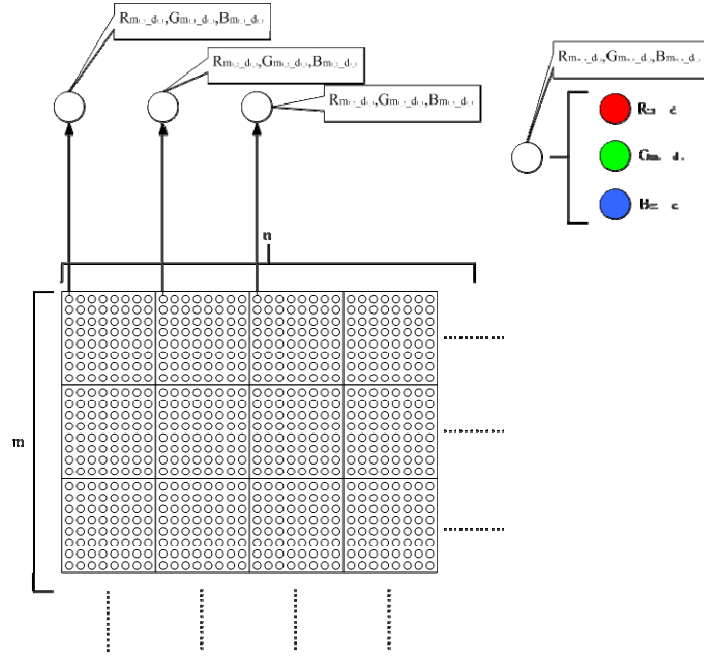


图4.1 全彩LED模块显示屏结构及成像显示颜色空间参数差异示意图

图 4.1 的右方说明每一个显示像素都包括红绿蓝三种基色，分别表示为 $R_{m_{m-n}-d_{i-j}}$ 、 $G_{m_{m-n}-d_{i-j}}$ 、 $B_{m_{m-n}-d_{i-j}}$ ，其中下标 m_{m-n} 代表该像素所在的显示模块在显示屏中的位置，而 d_{i-j} 表示该像素在显示模块中的位置。同样，对像素中每一个基色的颜色参数都有 $(Y \ x \ y)$ ，分别表示该颜色的亮度值和色度坐标，则红基色的颜色参数可表示为 $(Y_{r-m_{m-n}-d_{i-j}} \ x_{r-m_{m-n}-d_{i-j}} \ y_{r-m_{m-n}-d_{i-j}})$ ；绿基色的颜色参数可表示为 $(Y_{g-m_{m-n}-d_{i-j}} \ x_{g-m_{m-n}-d_{i-j}} \ y_{g-m_{m-n}-d_{i-j}})$ ；蓝基色的颜色参数可表示为 $(Y_{b-m_{m-n}-d_{i-j}} \ x_{b-m_{m-n}-d_{i-j}} \ y_{b-m_{m-n}-d_{i-j}})$ 。

这样，对于全彩 LED 显示屏上任意模块 m_{m-n} 中的任意像素 d_{i-j} ，其颜色参数可以表示为：

$$P_{color} = \begin{pmatrix} Y_{r-m_{m-n}-d_{i-j}} & x_{r-m_{m-n}-d_{i-j}} & y_{r-m_{m-n}-d_{i-j}} \\ Y_{g-m_{m-n}-d_{i-j}} & x_{g-m_{m-n}-d_{i-j}} & y_{g-m_{m-n}-d_{i-j}} \\ Y_{b-m_{m-n}-d_{i-j}} & x_{b-m_{m-n}-d_{i-j}} & y_{b-m_{m-n}-d_{i-j}} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

相应的，其颜色空间可描述为：

$$\begin{pmatrix} X_{m_n-d_{i_j}} \\ Y_{m_n-d_{i_j}} \\ Z_{m_n-d_{i_j}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{r-m_n-d_{i_j}} x_{r-m_n-d_{i_j}} & C_{g-m_n-d_{i_j}} x_{g-m_n-d_{i_j}} & C_{b-m_n-d_{i_j}} x_{b-m_n-d_{i_j}} \\ C_{r-m_n-d_{i_j}} y_{r-m_n-d_{i_j}} & C_{g-m_n-d_{i_j}} y_{g-m_n-d_{i_j}} & C_{b-m_n-d_{i_j}} y_{b-m_n-d_{i_j}} \\ C_{r-m_n-d_{i_j}} z_{r-m_n-d_{i_j}} & C_{g-m_n-d_{i_j}} z_{g-m_n-d_{i_j}} & C_{b-m_n-d_{i_j}} z_{b-m_n-d_{i_j}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

其中，

$$\begin{cases} C_{r-m_n-d_{i_j}} = \frac{Y_{r-m_n-d_{i_j}}}{y_{r-m_n-d_{i_j}}} \\ C_{g-m_n-d_{i_j}} = \frac{Y_{g-m_n-d_{i_j}}}{y_{g-m_n-d_{i_j}}} \\ C_{b-m_n-d_{i_j}} = \frac{Y_{b-m_n-d_{i_j}}}{y_{b-m_n-d_{i_j}}} \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\begin{cases} z_{r-m_n-d_{i_j}} = 1 - x_{r-m_n-d_{i_j}} - y_{r-m_n-d_{i_j}} \\ z_{g-m_n-d_{i_j}} = 1 - x_{g-m_n-d_{i_j}} - y_{g-m_n-d_{i_j}} \\ z_{b-m_n-d_{i_j}} = 1 - x_{b-m_n-d_{i_j}} - y_{b-m_n-d_{i_j}} \end{cases} \quad (4.4)$$

如果任意显示模块的任意显示像素的颜色参数都相等，那么显示屏显示像素种类的数量为最小值 1，像素颜色空间的数量也为最小值 1；如果任意显示模块的任意显示像素的颜色参数都互不相等，则显示屏显示像素种类的数量为最大值 $M \times N \times I \times J$ ，像素颜色空间的数量也为最大值 $M \times N \times I \times J$ 。则对整个全彩 LED 显示屏而言，所有显示像素的颜色空间数量在 1 和 $M \times N \times I \times J$ 之间，而实际上，受 LED 发光器件物理特性及生产工艺影响，显示屏上不同色度种类一般都会达到或接近 $M \times N \times I \times J$ ，这种情况下，采用彩色亮度仪进行单点检测的方式来获取整个屏幕显示像素的颜色参数是非常困难的，基本上不具备可行性。

4.1.2 成像显示按模块分布

组成基本显示单元模组的 LED 发光器件通常都来自同一批次生产的产品，由于 LED 发光器件的色度不一致现象主要发生在不同批次生产的器件中，所以显示模块单元内部的色度差异一般都在“颜色宽容量”以内。这样，全彩 LED

模块显示屏的颜色不一致问题，将主要呈现出一种以显示模块为单位的色度不一致和同时伴有模块内和模块间的以像素为单位的亮度不一致现象，如图 4.2 所示。

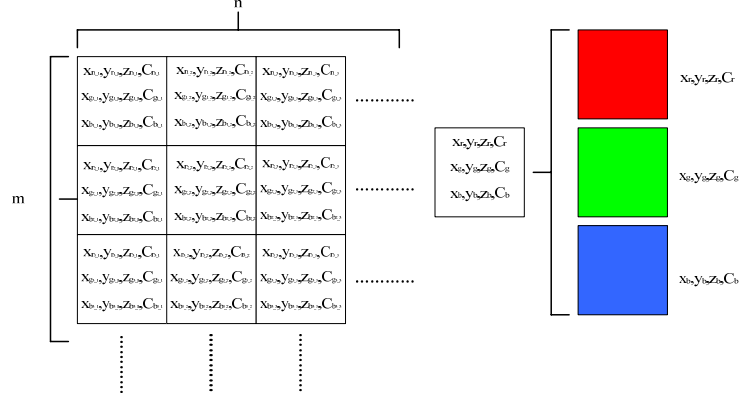


图4.2 LED显示屏以模块形式出现色度空间参数差异示意图

在这种情况下，如忽略显示模块内部的亮度差异，则对图 4-2 所示的全彩 LED 模块显示屏而言，一共有 $M \times N$ 个显示模块，第 1 行第 1 列的显示模块记为 m_{1_1} ，第 1 行第 2 列的显示模块记为 m_{1_2} ，第 2 行第 1 列的显示模块记为 m_{2_1} ，以此类推，则第 m 行、第 n 列的显示模块单元可记为 m_{m_n} 。显示屏上每一个显示模块都按这种方式描述和标记。

每一个显示模块都包括红绿蓝三种基色，每一个基色也都有颜色参数 ($Y \ x \ y$)，分别表示该颜色的亮度值和色度坐标，则红基色的颜色参数可表示为 $(Y_{r_m_{m_n}} \ x_{r_m_{m_n}} \ y_{r_m_{m_n}})$ ；绿基色的颜色参数可表示为 $(Y_{g_m_{m_n}} \ x_{g_m_{m_n}} \ y_{g_m_{m_n}})$ ；蓝基色的颜色参数可表示为 $(Y_{b_m_{m_n}} \ x_{b_m_{m_n}} \ y_{b_m_{m_n}})$ 。

这样，对于全彩 LED 模块显示屏上任意模块 m_{m_n} ，其颜色参数可以表示为：

$$P_{color} = \begin{pmatrix} Y_{r_m_{m_n}} & x_{r_m_{m_n}} & y_{r_m_{m_n}} \\ Y_{g_m_{m_n}} & x_{g_m_{m_n}} & y_{g_m_{m_n}} \\ Y_{b_m_{m_n}} & x_{b_m_{m_n}} & y_{b_m_{m_n}} \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

类似可得其颜色空间的数学表达，在此不做赘述。

如果任意显示模块的颜色参数都相等，那么显示屏显示模块种类的数量为最小值 1，模块颜色空间的数量也为最小值 1；如果任意显示模块的颜色参数都互不相等，则显示屏显示模块种类的数量为最大值 $M \times N$ ，模块颜色空间的数量也为最大值 $M \times N$ 。则对整个全彩 LED 模块显示屏而言，所有显示模块的颜色空间数量在 1 和 $M \times N$ 之间。尽管模块的数量也不少，但对于常见的 8×8 模块显示屏来说，色度采集压力即可减小为原来的 $1/64$ ，考虑到进行全彩 LED 显示屏颜色均匀性校正方法研究的样屏像素面积也不会太大，这种情况下，采用彩色亮度仪进行模块检测的方式来获取表征整个屏幕所有显示像素的色度参数，还是可行的。

4.2 亮度色度分离采集的可行性分析

如果全彩 LED 模块显示屏的成像显示满足上述特点，即显示模块间的色度偏差远大于显示模块内的色度偏差，且显示模块内的色度偏差远小于人眼视觉宽容度，那么就可以采用彩色亮度仪来完成对整个屏幕显示模块的色坐标来表征整个屏幕所有显示像素的色度参数。下面，从定性和定量两个方面对 LED 显示屏的成像显示特点进行分析。

4.2.1 亮度校正结果分析

亮度校正是忽略显示屏上所有显示像素或模块间的色度差异，针对显示屏显示像素之间的亮度差异引起的成像不均而采取的一种校调方式，可以说，它是一种特例式的全彩 LED 显示屏颜色均匀性校正^[61, 64-66]。其基本原理为：由 CCD 相机采集到的图像求得显示像素的相对亮度分布函数，得到显示屏上各个显示像素的相对亮度信息表；找出全屏相对亮度最小的显示像素，并将其指定为参考亮度，校正权值定为 1，而其余所有显示像素的权值为参考亮度该像素相对亮度的比值（小于等于 1），这样便得到全屏亮度校正权值表；然后把这个权值表反馈到控制系统，对每个像素各个基色的显示脉宽进行调整，相对亮度高的显示像素显示脉宽相应减少，便达到了亮度一致化的目的。

对于整屏任意像素间色度偏差可控制在人眼的视觉宽容度范围以内的全彩 LED 显示屏，在校正前的显示不均匀性通常表现为麻点现象，显示屏上的显示

图像可以看清楚，但是显示效果不细腻，给人一种雾里看花的朦胧感。这种显示屏通过亮度校正即可实现均匀、清晰的显示效果。如图 4.3 所示，其中图(a)(b)(c)分别为亮度校正后红绿蓝三基色的成像显示结果。

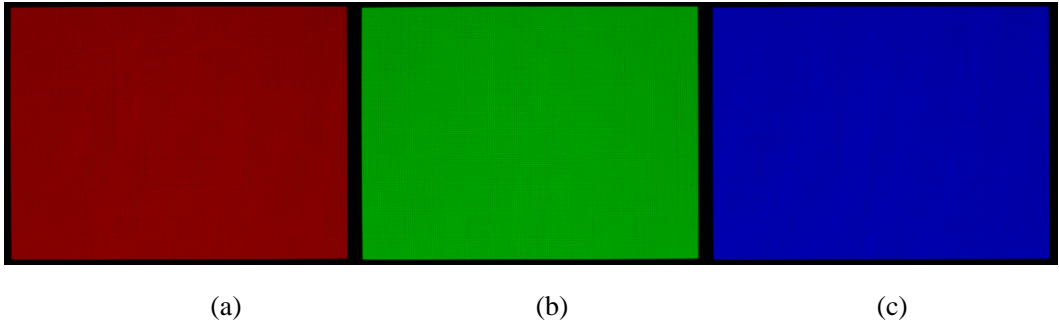


图 4.3 显示像素间无显著色度差异的 LED 显示屏亮度校正后成像显示结果

但对大部分全彩 LED 显示屏而言，经过亮度校正以后，显示屏的颜色均匀性效果仍然不能满足人眼的需求，而导致该结果的原因为决定颜色的另外两个参量 x 坐标和 y 坐标存在差异，即显示屏显示像素或模块间的色度偏差超出了人眼的视觉宽容量范围。这种显示屏亮度校正后的三基色成像显示结果如图 4.4 所示。

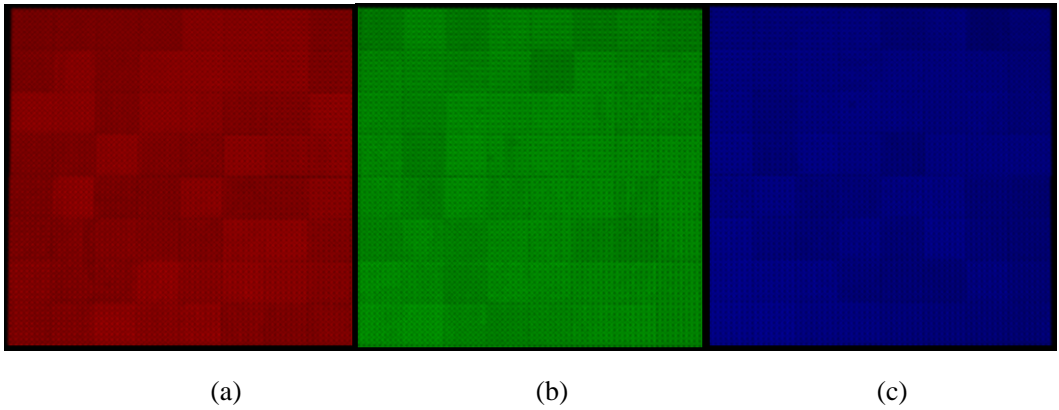


图 4.4 存在色度差异的 LED 模块显示屏亮度校正后三基色成像显示结果

由图 4.4 可见，经亮度校正以后，全彩 LED 模块显示屏显示模块内部显示效果清晰均匀，而显示模块之间还存在明显亮度色度差异，也就是说显示屏满足显示模块间的色度偏差远大于显示模块内的色度偏差，且显示模块内的色度偏差远小于人眼视觉宽容量的成像显示特点。

4.2.2 模块显示屏单点测量分析

为进一步证明全彩 LED 模块显示屏的成像显示特点，选取试验样屏上的两

个显示单元模块，用彩色亮度仪逐点测量每一像素在校正前的亮度色度数据，进行定量分析^[67-73]。

分别记两个显示单元模块为 m_1 和 m_2 ，在相同距离、光圈、焦距、环境照度和温湿度等条件下，逐点测量两个显示单元模块三基色在亮度校正前每一显示像素的亮度值和色度坐标，每一基色都有相应的颜色参数 $(Y \ x \ y)$ 。

那么，对于显示模块 m_1 中任意显示像素点 d_{i-j} ，红基色颜色参数可表示为 $(Y_{r-m_1-d_{i-j}} \ x_{r-m_1-d_{i-j}} \ y_{r-m_1-d_{i-j}})$ ，绿基色颜色参数可表示为 $(Y_{g-m_1-d_{i-j}} \ x_{g-m_1-d_{i-j}} \ y_{g-m_1-d_{i-j}})$ ，蓝基色颜色参数可表示为 $(Y_{b-m_1-d_{i-j}} \ x_{b-m_1-d_{i-j}} \ y_{b-m_1-d_{i-j}})$ 。同样，对于显示模块 m_2 中任意显示像素点 d_{i-j} ，红基色颜色参数可表示为 $(Y_{r-m_2-d_{i-j}} \ x_{r-m_2-d_{i-j}} \ y_{r-m_2-d_{i-j}})$ ，绿基色颜色参数可表示为 $(Y_{g-m_2-d_{i-j}} \ x_{g-m_2-d_{i-j}} \ y_{g-m_2-d_{i-j}})$ ，蓝基色颜色参数可表示为 $(Y_{b-m_2-d_{i-j}} \ x_{b-m_2-d_{i-j}} \ y_{b-m_2-d_{i-j}})$ 。

对于亮度差异，首先确定两显示模块所有显示像素红绿蓝三基色亮度的最小值 Y_{r_min} 、 Y_{g_min} 、 Y_{b_min} 作为基准；以其他显示像素相同基色的亮度值相对于该标准值的偏离程度来衡量两显示模块所有显示像素之间的亮度差异，如式（4-6）所示：

$$\begin{cases} \eta_r = \frac{Y_{r-m_{m-n}-d_{i-j}} - Y_{r_min}}{Y_{r_min}} \times 100\% \\ \eta_g = \frac{Y_{g-m_{m-n}-d_{i-j}} - Y_{g_min}}{Y_{g_min}} \times 100\% \\ \eta_b = \frac{Y_{b-m_{m-n}-d_{i-j}} - Y_{b_min}}{Y_{b_min}} \times 100\% \end{cases} \quad (4.6)$$

由于色度参数有两个，为衡量显示像素之间的色度差异，首先计算出红绿蓝

三基色色度坐标在 CIE1931-XYZ 色度图中的位置到 D65 标准白场色度坐标点的距离 $L_{r_{m_n-d_{i-j}}}$ 、 $L_{g_{m_n-d_{i-j}}}$ 、 $L_{b_{m_n-d_{i-j}}}$ ：

$$\begin{cases} L_{r_{m_n-d_{i-j}}} = \sqrt{(x_{r_{m_n-d_{i-j}}} - x_{D65})^2 + (y_{r_{m_n-d_{i-j}}} - y_{D65})^2} \\ L_{g_{m_n-d_{i-j}}} = \sqrt{(x_{g_{m_n-d_{i-j}}} - x_{D65})^2 + (y_{g_{m_n-d_{i-j}}} - y_{D65})^2} \\ L_{b_{m_n-d_{i-j}}} = \sqrt{(x_{b_{m_n-d_{i-j}}} - x_{D65})^2 + (y_{b_{m_n-d_{i-j}}} - y_{D65})^2} \end{cases} \quad (4.7)$$

这就可以根据 $L_{r_{m_n-d_{i-j}}}$ 、 $L_{g_{m_n-d_{i-j}}}$ 、 $L_{b_{m_n-d_{i-j}}}$ 的分布情况，来衡量两显示模块所有显示像素之间的色度差异。

两显示模块所有显示像素红绿蓝三基色在亮度校正前的亮度差异和色度差异，分别如图 4.5、图 4.6、图 4.7、图 4.8、图 4.9、图 4.10 所示。其中，横坐标代表两显示模块的像素序列，前 64 点位显示模块 m_1 的各个显示像素，后 64 点位显示模块 m_2 的各个显示像素；亮度差异的纵坐标为相应显示像素偏离亮度标准值的百分比；色度差异的纵坐标为相应显示像素色度坐标点到参考坐标点的直线距离。

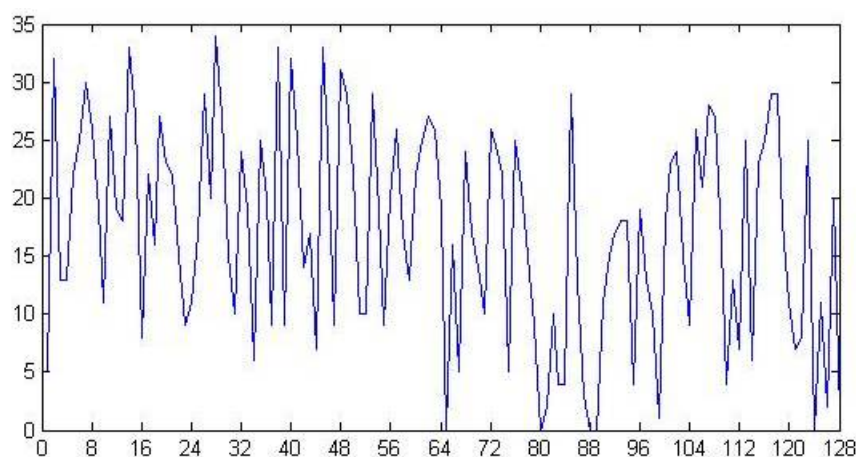


图 4.5 两显示模块各个显示像素红基色校正前亮度差异

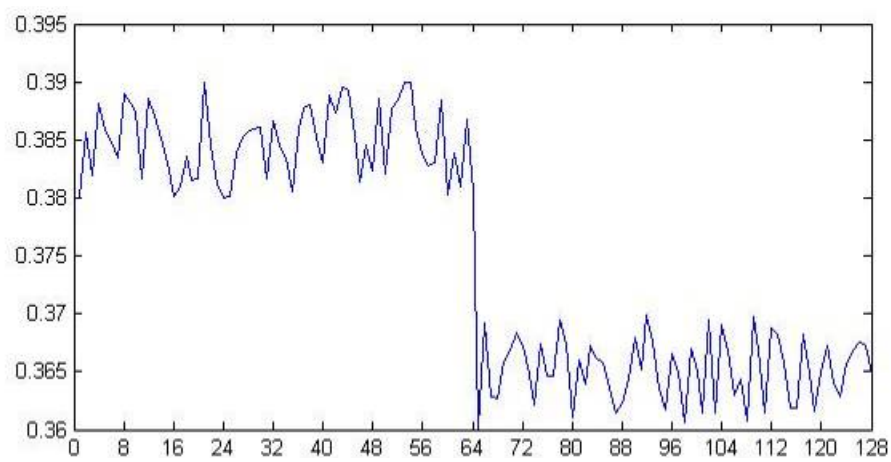


图 4.6 两显示模块各个显示像素红基色校正前色度差异

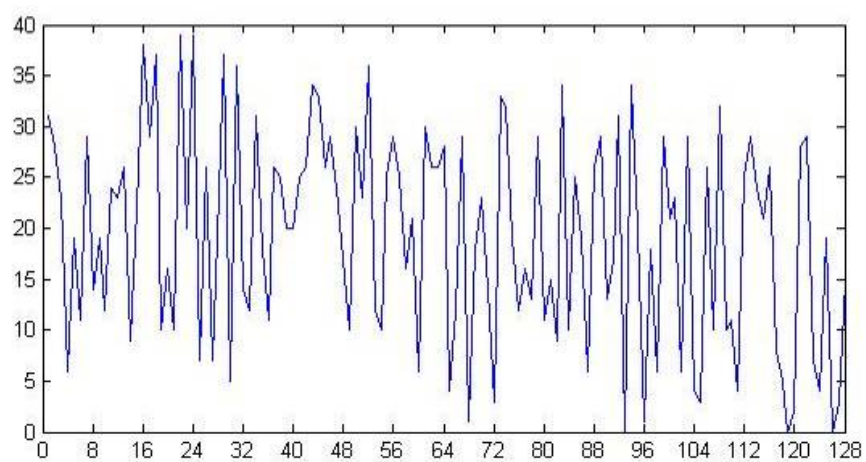


图 4.7 两显示模块各个显示像素绿基色校正前亮度差异

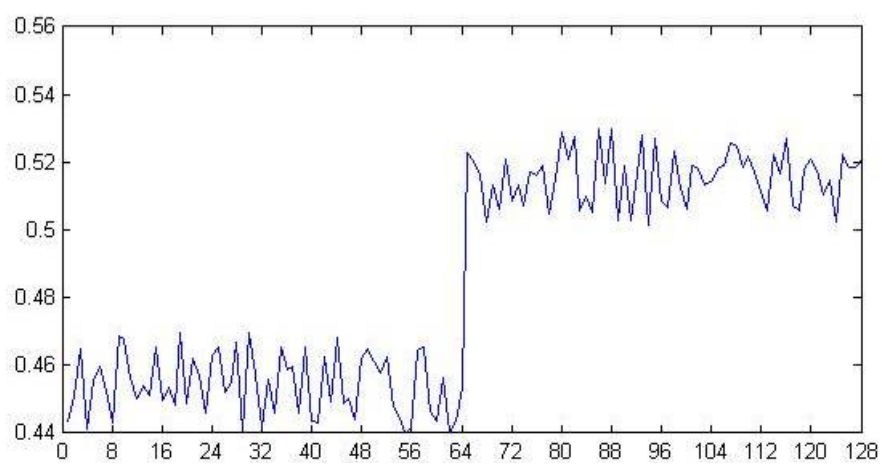


图 4.8 两显示模块各个显示像素绿基色校正前色度差异

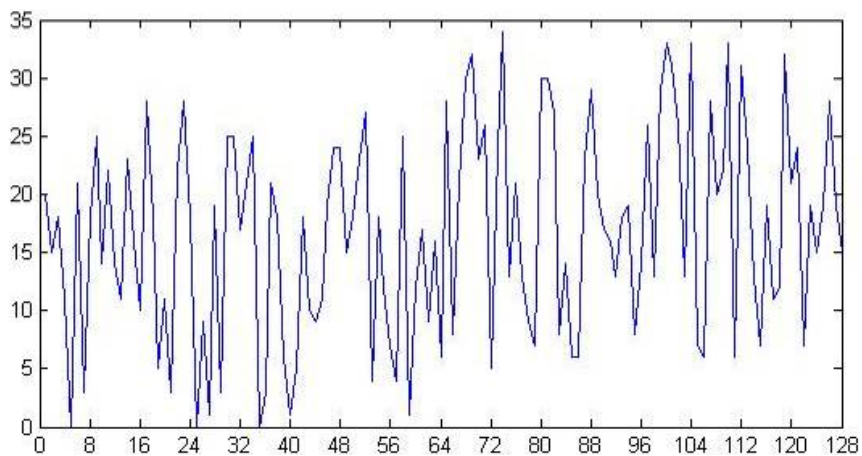


图 4.9 两显示模块各个显示像素蓝基色校正前亮度差异

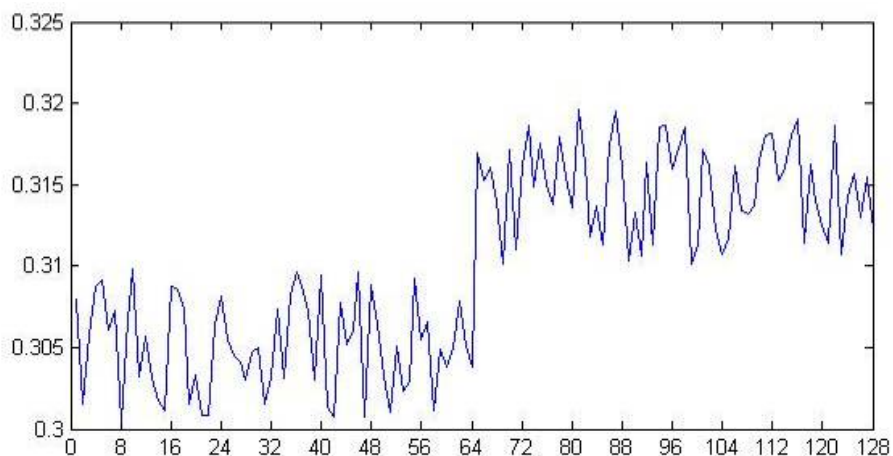


图 4.10 两显示模块各个显示像素蓝基色校正前色度差异

同样可以得到，全彩 LED 模块显示屏校正前的亮度差异以显示像素为单位体现，而色度差异以显示模块为单位体现。结合 4.2.1 章节中的定性分析，可以得出：对于模块间存在色度偏差的全彩 LED 模块显示屏，亮度校正过程中 CCD 采集的各个显示模块的相对亮度差异虽然会存在较大偏差，但显示模块内部各个显示像素之间的相对亮度差异却可以精准获得，这为亮度色度分离采集方法的实现奠定了基础。

4.2.3 亮度色度分离采集方法实现

据上述分析，全彩 LED 模块显示屏的成像显示具备以下特点：显示模块间的色度偏差远大于显示模块内的色度偏差，且显示模块内的色度偏差远小于人眼

视觉宽容量。对于没有色度差异的 LED 显示像素或模块，用于亮度校正的 CCD 相机采集到的相对亮度差异代表了显示像素或模块间的实际亮度差异。

因此，要实现对整屏 LED 显示像素的颜色参数采集，可以采取亮度色度分离采集的方法：用彩色亮度仪来完成全彩 LED 显示屏逐模块的实际亮度和色坐标测量，用 CCD 图像传感器来完成 LED 显示屏各像素间相对亮度的快速测量。

利用彩色亮度仪进行逐模块测量，可以获得 LED 显示屏 $M \times N$ 个模块的绝对亮度值和色度坐标。为方便描述，将显示屏上第 m 行、第 n 列的显示模块 m_{m_n} 的红绿蓝三基色亮度值和色度坐标分别表示为： $Y_{r_m_{m_n}}$ 、 $x_{r_m_{m_n}}$ 、 $y_{r_m_{m_n}}$ 、 $Y_{g_m_{m_n}}$ 、 $x_{g_m_{m_n}}$ 、 $y_{g_m_{m_n}}$ 、 $Y_{b_m_{m_n}}$ 、 $x_{b_m_{m_n}}$ 、 $y_{b_m_{m_n}}$ 。

对全彩 LED 显示屏所有显示像素的相对亮度的采集要比色度参数方便很多，直接拿亮度校正过程中 CCD 相机采集得到的所有显示像素的原始数值来用就可以了。为方便描述，将显示屏上第 m 行、第 n 列的显示模块 m_{m_n} 中第 i 行、第 j 列的显示像素 d_{i_j} 的红绿蓝三基色相对亮度分别表示为： $B_{r_m_{m_n}-d_{i_j}}$ 、 $B_{g_m_{m_n}-d_{i_j}}$ 、 $B_{b_m_{m_n}-d_{i_j}}$ 。

这样对于显示屏上第 m 行、第 n 列的显示模块 m_{m_n} 中第 i 行、第 j 列的显示像素 d_{i_j} ，它的颜色参数集合就包括显示像素相对亮度、色坐标和像素所在显示模块的绝对亮度，可记为：

$$P_{color} = \begin{pmatrix} B_{r_m_{m_n}-d_{i_j}} & x_{r_m_{m_n}} & y_{r_m_{m_n}} & Y_{r_m_{m_n}} \\ B_{g_m_{m_n}-d_{i_j}} & x_{g_m_{m_n}} & y_{g_m_{m_n}} & Y_{g_m_{m_n}} \\ B_{b_m_{m_n}-d_{i_j}} & x_{b_m_{m_n}} & y_{b_m_{m_n}} & Y_{b_m_{m_n}} \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

这样，就完成了全彩 LED 显示屏的亮度色度分离采集过程。由于显示像素相对亮度的采集即已经成熟的亮度校正技术中 CCD 相机对显示屏各个显示像素的采集，可以在几分钟内完成，相对于用彩色亮度仪对显示屏逐像素或模块的点检测方式所占用的时间，显示像素相对亮度采集所花的时间可以忽略。这样，由

于色度参数是逐模块进行检测的，对于 $I \times J$ 大小的显示模块，色度采集的工作量就可减小为原来的 $1/IJ$ ，大大减轻了数据采集的压力。

以 3.4 章节中完成像素分辨率为 192×64 的 LED 显示屏每一显示模块的各个基色亮度和色度坐标值的测量为例，所需时间仅需一天半。这样，用点检测设备彩色亮度仪来完成 LED 显示屏亮度和色度坐标值的数据采集，便具备了可行性。

4.3 亮度色度混合校正的算法实现

根据第三章提出的全彩 LED 显示屏的颜色均匀性校正方法，要实现这一过程，前提是获取 LED 显示屏上任意显示像素所代表的颜色空间，即每一显示像素的颜色参数，具体到显示屏上，需要获取显示屏任意显示模块 m_{m_n} 中任意显示像素 d_{i_j} 的绝对亮度值和色度坐标。

4.3.1 逐点亮度色度参数的获得

鉴于显示模块内的色度差异可以忽略，所以任意显示模块 m_{m_n} 中任意显示像素 d_{i_j} 的色度坐标可近似等于该像素所在显示模块 m_{m_n} 的色度坐标，于是有：

$$\begin{cases} x_{r_m_{m_n}-d_{i_j}} = x_{r_m_{m_n}} \\ y_{r_m_{m_n}-d_{i_j}} = y_{r_m_{m_n}} \\ x_{g_m_{m_n}-d_{i_j}} = x_{g_m_{m_n}} \\ y_{g_m_{m_n}-d_{i_j}} = y_{g_m_{m_n}} \\ x_{b_m_{m_n}-d_{i_j}} = x_{b_m_{m_n}} \\ y_{b_m_{m_n}-d_{i_j}} = y_{b_m_{m_n}} \end{cases} \quad (4.9)$$

显示模块的绝对亮度已经通过彩色亮度仪采集得到，而 CCD 相机采集得到的模块内各个显示像素之间的相对亮度差异又代表了其绝对亮度差异。因此，可以根据 CCD 相机采集得到的模块内相对亮度差异和像素所在模块的实际亮度换算得到显示屏上任意显示模块 m_{m_n} 中任意显示像素 d_{i_j} 的绝对亮度值。

用彩色亮度仪测量得到的显示模块绝对亮度可视为该模块内所有显示像素绝对亮度的平均，即：

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{r_m_{m_n}} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{i=I, j=J} Y_{r_m_{m_n}-d_{i_j}}}{IJ} \\ Y_{g_m_{m_n}} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{i=I, j=J} Y_{g_m_{m_n}-d_{i_j}}}{IJ} \\ Y_{b_m_{m_n}} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{i=I, j=J} Y_{b_m_{m_n}-d_{i_j}}}{IJ} \end{array} \right. \quad (4.10)$$

其中， $Y_{r_m_{m_n}-d_{i_j}}$ 代表显示模块 m_{m_n} 中显示像素 d_{i_j} 红基色的绝对亮度， $Y_{g_m_{m_n}-d_{i_j}}$ 代表显示模块 m_{m_n} 中显示像素 d_{i_j} 绿基色的绝对亮度， $Y_{b_m_{m_n}-d_{i_j}}$ 代表显示模块 m_{m_n} 中显示像素 d_{i_j} 蓝基色的绝对亮度， I 代表显示模块 m_{m_n} 中显示像素的行数， J 代表显示模块 m_{m_n} 中显示像素的列数。

那么，根据显示模块内显示像素之间的相对亮度差异，即可计算得到显示屏上任意显示模块 m_{m_n} 中任意显示像素 d_{i_j} 的绝对亮度值，如式（4.11）所示：

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{r_m_{m_n}-d_{i_j}} = \frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i_j}}}{\sum_{i=1, j=1}^{i=I, j=J} B_{r_m_{m_n}-d_{i_j}}} \times Y_{r_m_{m_n}} \times IJ \\ Y_{g_m_{m_n}-d_{i_j}} = \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i_j}}}{\sum_{i=1, j=1}^{i=I, j=J} B_{g_m_{m_n}-d_{i_j}}} \times Y_{g_m_{m_n}} \times IJ \\ Y_{b_m_{m_n}-d_{i_j}} = \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i_j}}}{\sum_{i=1, j=1}^{i=I, j=J} B_{b_m_{m_n}-d_{i_j}}} \times Y_{b_m_{m_n}} \times IJ \end{array} \right. \quad (4.11)$$

根据式 (4.9) 和 (4.11)，即可获得全彩 LED 显示屏上任意显示模块 m_{m_n} 中任意显示像素 d_{i_j} 的绝对亮度值和色度坐标。

4.3.2 亮度色度混合校正数学模型

由上节内容可以得到全彩 LED 显示屏上任意显示模块 m_{m_n} 中任意显示像素 d_{i_j} 三基色的颜色分配参数 $C_{r_m_{m_n}-d_{i_j}}$ 、 $C_{g_m_{m_n}-d_{i_j}}$ 、 $C_{b_m_{m_n}-d_{i_j}}$ 分别为：

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{r_m_{m_n}-d_{i_j}} = \frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i_j}}}{\sum_{i=1, j=1}^{i=L, j=J} B_{r_m_{m_n}-d_{i_j}}} \times \frac{Y_{r_m_{m_n}}}{y_{r_m_{m_n}}} \times IJ \\ C_{g_m_{m_n}-d_{i_j}} = \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i_j}}}{\sum_{i=1, j=1}^{i=L, j=J} B_{g_m_{m_n}-d_{i_j}}} \times \frac{Y_{g_m_{m_n}}}{y_{g_m_{m_n}}} \times IJ \\ C_{b_m_{m_n}-d_{i_j}} = \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i_j}}}{\sum_{i=1, j=1}^{i=L, j=J} B_{b_m_{m_n}-d_{i_j}}} \times \frac{Y_{b_m_{m_n}}}{y_{b_m_{m_n}}} \times IJ \end{array} \right. \quad (4.12)$$

为简化后续运算，可将显示模块内所有显示像素红绿蓝三基色的相对亮度的平均值记为 $\bar{S}_{r_m_{m_n}}$ 、 $\bar{S}_{g_m_{m_n}}$ 、 $\bar{S}_{b_m_{m_n}}$ ：

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{S}_{r_m_{m_n}} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{i=L, j=J} B_{r_m_{m_n}-d_{i_j}}}{IJ} \\ \bar{S}_{g_m_{m_n}} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{i=L, j=J} B_{g_m_{m_n}-d_{i_j}}}{IJ} \\ \bar{S}_{b_m_{m_n}} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{i=L, j=J} B_{b_m_{m_n}-d_{i_j}}}{IJ} \end{array} \right. \quad (4.13)$$

对全彩 LED 显示屏上任意显示模块 m_{m_n} 中任意显示像素 d_{i_j} 所构成的颜色空间可描述为：

$$\begin{pmatrix} X_{m_{m_n}-d_{i_j}} \\ Y_{m_{m_n}-d_{i_j}} \\ Z_{m_{m_n}-d_{i_j}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i_j}}}{S_{r_m_{m_n}}} C_{r_m_{m_n}} x_{r_m_{m_n}} & \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i_j}}}{S_{g_m_{m_n}}} C_{g_m_{m_n}} x_{g_m_{m_n}} & \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i_j}}}{S_{b_m_{m_n}}} C_{b_m_{m_n}} x_{b_m_{m_n}} \\ \frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i_j}}}{S_{r_m_{m_n}}} C_{r_m_{m_n}} y_{r_m_{m_n}} & \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i_j}}}{S_{g_m_{m_n}}} C_{g_m_{m_n}} y_{g_m_{m_n}} & \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i_j}}}{S_{b_m_{m_n}}} C_{b_m_{m_n}} y_{b_m_{m_n}} \\ \frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i_j}}}{S_{r_m_{m_n}}} C_{r_m_{m_n}} z_{r_m_{m_n}} & \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i_j}}}{S_{g_m_{m_n}}} C_{g_m_{m_n}} z_{g_m_{m_n}} & \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i_j}}}{S_{b_m_{m_n}}} C_{b_m_{m_n}} z_{b_m_{m_n}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

其中，

$$\begin{cases} C_{r_m_{m_n}} = \frac{Y_{r_m_{m_n}}}{y_{r_m_{m_n}}} \\ C_{g_m_{m_n}} = \frac{Y_{g_m_{m_n}}}{y_{g_m_{m_n}}} \\ C_{b_m_{m_n}} = \frac{Y_{b_m_{m_n}}}{y_{b_m_{m_n}}} \end{cases} \quad (4.15)$$

$$\begin{cases} z_{r_m_{m_n}} = 1 - x_{r_m_{m_n}} - y_{r_m_{m_n}} \\ z_{g_m_{m_n}} = 1 - x_{g_m_{m_n}} - y_{g_m_{m_n}} \\ z_{b_m_{m_n}} = 1 - x_{b_m_{m_n}} - y_{b_m_{m_n}} \end{cases} \quad (4.16)$$

根据第三章提出的颜色均匀性校正方法中的内容，可将该全彩 LED 显示屏的基准颜色空间记为：

$$\begin{pmatrix} X_{std} \\ Y_{std} \\ Z_{std} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{r_std} x_{r_std} & C_{g_std} x_{g_std} & C_{b_std} x_{b_std} \\ C_{r_std} y_{r_std} & C_{g_std} y_{g_std} & C_{b_std} y_{b_std} \\ C_{r_std} z_{r_std} & C_{g_std} z_{g_std} & C_{b_std} z_{b_std} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

其中，

$$\begin{cases} C_{r_std} = \frac{Y_{r_std}}{y_{r_std}} \\ C_{g_std} = \frac{Y_{g_std}}{y_{g_std}} \\ C_{b_std} = \frac{Y_{b_std}}{y_{b_std}} \end{cases} \quad (4.18)$$

$$\begin{cases} z_{r_std} = 1 - x_{r_std} - y_{r_std} \\ z_{g_std} = 1 - x_{g_std} - y_{g_std} \\ z_{b_std} = 1 - x_{b_std} - y_{b_std} \end{cases} \quad (4.19)$$

根据式 (4.14) 和 (4.17), 即可求出显示屏上任意显示模块 m_{m_n} 中任意显示像素 d_{i_j} 完成颜色均匀性校正所需要的系数转换矩阵 T_{coff} 的表达式, 如式 (4.20) 所示:

$$T_{coff} = \begin{pmatrix} T_{coff}^{rr} & T_{coff}^{rg} & T_{coff}^{rb} \\ T_{coff}^{gr} & T_{coff}^{gg} & T_{coff}^{gb} \\ T_{coff}^{br} & T_{coff}^{bg} & T_{coff}^{bb} \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

其中, 各元素 T_{coff}^{rr} 、 T_{coff}^{rg} 、 T_{coff}^{rb} 、 T_{coff}^{gr} 、 T_{coff}^{gg} 、 T_{coff}^{gb} 、 T_{coff}^{br} 、 T_{coff}^{bg} 、 T_{coff}^{bb} 分别为:

$$T_{coff}^{rr} = \frac{\bar{S}_{r_m_{m_n}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i_j}}} \frac{C_{r_std}}{C_{r_m_{m_n}}} \frac{\begin{vmatrix} x_{r_std} & x_{g_m_{m_n}} & x_{b_m_{m_n}} \\ y_{r_std} & y_{g_m_{m_n}} & y_{b_m_{m_n}} \\ z_{r_std} & z_{g_m_{m_n}} & z_{b_m_{m_n}} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_{r_m_{m_n}} & x_{g_m_{m_n}} & x_{b_m_{m_n}} \\ y_{r_m_{m_n}} & y_{g_m_{m_n}} & y_{b_m_{m_n}} \\ z_{r_m_{m_n}} & z_{g_m_{m_n}} & z_{b_m_{m_n}} \end{vmatrix}} \quad (4.21)$$

$$T_{\text{coff}}^{rg} = \frac{\bar{S}_{r-m_{m-n}}}{B_{r-m_{m-n}-d_{i-j}}} \frac{C_{g-std}}{C_{r-m_{m-n}}} \begin{vmatrix} x_{g-std} & x_{g-m_{m-n}} & x_{b-m_{m-n}} \\ y_{g-std} & y_{g-m_{m-n}} & y_{b-m_{m-n}} \\ z_{g-std} & z_{g-m_{m-n}} & z_{b-m_{m-n}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_{r-m_{m-n}} & x_{g-m_{m-n}} & x_{b-m_{m-n}} \\ y_{r-m_{m-n}} & y_{g-m_{m-n}} & y_{b-m_{m-n}} \\ z_{r-m_{m-n}} & z_{g-m_{m-n}} & z_{b-m_{m-n}} \end{vmatrix} \quad (4.22)$$

$$T_{\text{coff}}^{rb} = \frac{\bar{S}_{r-m_{m-n}}}{B_{r-m_{m-n}-d_{i-j}}} \frac{C_{b-std}}{C_{r-m_{m-n}}} \begin{vmatrix} x_{b-std} & x_{g-m_{m-n}} & x_{b-m_{m-n}} \\ y_{b-std} & y_{g-m_{m-n}} & y_{b-m_{m-n}} \\ z_{b-std} & z_{g-m_{m-n}} & z_{b-m_{m-n}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_{r-m_{m-n}} & x_{g-m_{m-n}} & x_{b-m_{m-n}} \\ y_{r-m_{m-n}} & y_{g-m_{m-n}} & y_{b-m_{m-n}} \\ z_{r-m_{m-n}} & z_{g-m_{m-n}} & z_{b-m_{m-n}} \end{vmatrix} \quad (4.23)$$

$$T_{\text{coff}}^{gr} = \frac{\bar{S}_{g-m_{m-n}}}{B_{g-m_{m-n}-d_{i-j}}} \frac{C_{r-std}}{C_{g-m_{m-n}}} \begin{vmatrix} x_{r-m_{m-n}} & x_{r-std} & x_{b-m_{m-n}} \\ x_{r-m_{m-n}} & y_{r-std} & y_{b-m_{m-n}} \\ z_{r-m_{m-n}} & z_{r-std} & z_{b-m_{m-n}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_{r-m_{m-n}} & x_{g-m_{m-n}} & x_{b-m_{m-n}} \\ y_{r-m_{m-n}} & y_{g-m_{m-n}} & y_{b-m_{m-n}} \\ z_{r-m_{m-n}} & z_{g-m_{m-n}} & z_{b-m_{m-n}} \end{vmatrix} \quad (4.24)$$

$$T_{\text{coff}}^{gg} = \frac{\bar{S}_{g-m_{m-n}}}{B_{g-m_{m-n}-d_{i-j}}} \frac{C_{g-std}}{C_{g-m_{m-n}}} \begin{vmatrix} x_{r-m_{m-n}} & x_{g-std} & x_{b-m_{m-n}} \\ y_{r-m_{m-n}} & y_{g-std} & y_{b-m_{m-n}} \\ z_{r-m_{m-n}} & z_{g-std} & z_{b-m_{m-n}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_{r-m_{m-n}} & x_{g-m_{m-n}} & x_{b-m_{m-n}} \\ y_{r-m_{m-n}} & y_{g-m_{m-n}} & y_{b-m_{m-n}} \\ z_{r-m_{m-n}} & z_{g-m_{m-n}} & z_{b-m_{m-n}} \end{vmatrix} \quad (4.25)$$

$$T_{coff}^{gb} = \frac{\bar{S}_{g-m_{m-n}}}{B_{g-m_{m-n}-d_{i-j}}} \frac{C_{b-std}}{C_{g-m_{m-n}}} \begin{vmatrix} x_{r-m_{m-n}} & x_{b-std} & x_{b-m_{m-n}} \\ y_{r-m_{m-n}} & y_{b-std} & y_{b-m_{m-n}} \\ z_{r-m_{m-n}} & z_{b-std} & z_{b-m_{m-n}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_{r-m_{m-n}} & x_{g-m_{m-n}} & x_{b-m_{m-n}} \\ y_{r-m_{m-n}} & y_{g-m_{m-n}} & y_{b-m_{m-n}} \\ z_{r-m_{m-n}} & z_{g-m_{m-n}} & z_{b-m_{m-n}} \end{vmatrix} \quad (4.26)$$

$$T_{coff}^{br} = \frac{\bar{S}_{b-m_{m-n}}}{B_{b-m_{m-n}-d_{i-j}}} \frac{C_{r-std}}{C_{b-m_{m-n}}} \begin{vmatrix} x_{r-m_{m-n}} & x_{g-m_{m-n}} & x_{r-std} \\ y_{r-m_{m-n}} & y_{g-m_{m-n}} & y_{r-std} \\ z_{r-m_{m-n}} & z_{g-m_{m-n}} & z_{r-std} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_{r-m_{m-n}} & x_{g-m_{m-n}} & x_{b-m_{m-n}} \\ y_{r-m_{m-n}} & y_{g-m_{m-n}} & y_{b-m_{m-n}} \\ z_{r-m_{m-n}} & z_{g-m_{m-n}} & z_{b-m_{m-n}} \end{vmatrix} \quad (4.27)$$

$$T_{coff}^{bg} = \frac{\bar{S}_{b-m_{m-n}}}{B_{b-m_{m-n}-d_{i-j}}} \frac{C_{g-std}}{C_{b-m_{m-n}}} \begin{vmatrix} x_{r-m_{m-n}} & x_{g-m_{m-n}} & x_{g-std} \\ y_{r-m_{m-n}} & y_{g-m_{m-n}} & y_{g-std} \\ z_{r-m_{m-n}} & z_{g-m_{m-n}} & z_{g-std} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_{r-m_{m-n}} & x_{g-m_{m-n}} & x_{b-m_{m-n}} \\ y_{r-m_{m-n}} & y_{g-m_{m-n}} & y_{b-m_{m-n}} \\ z_{r-m_{m-n}} & z_{g-m_{m-n}} & z_{b-m_{m-n}} \end{vmatrix} \quad (4.28)$$

$$T_{coff}^{bb} = \frac{\bar{S}_{b-m_{m-n}}}{B_{b-m_{m-n}-d_{i-j}}} \frac{C_{b-std}}{C_{b-m_{m-n}}} \begin{vmatrix} x_{r-m_{m-n}} & x_{g-m_{m-n}} & x_{b-std} \\ y_{r-m_{m-n}} & y_{g-m_{m-n}} & y_{b-std} \\ z_{r-m_{m-n}} & z_{g-m_{m-n}} & z_{b-std} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_{r-m_{m-n}} & x_{g-m_{m-n}} & x_{b-m_{m-n}} \\ y_{r-m_{m-n}} & y_{g-m_{m-n}} & y_{b-m_{m-n}} \\ z_{r-m_{m-n}} & z_{g-m_{m-n}} & z_{b-m_{m-n}} \end{vmatrix} \quad (4.29)$$

将显示屏每一显示像素的系数转换矩阵 T_{coff} 反馈到控制系统，相应减少各主

基色的显示脉宽，并增加另外两种辅基色的显示脉宽，即可完成全彩 LED 显示屏的颜色均匀性校正。

4.4 亮度色度混合校正的工程实现

选用美国 PHOTO RESEARCH 公司生产的 PR655 型彩色亮度仪，对一像素分辨率为 192×64 的 NP7.62 户内全彩 LED 模块显示屏试验样屏逐模块采集其原始的亮度值和色度坐标等颜色参数；选用长春希达电子有限公司研制的 LED 显示屏亮度采集仪采集该显示屏各个显示模块内各个显示像素之间的相对亮度差异。

通过彩色亮度仪和 CCD 相机采集得到校正前每一显示模块的实际亮度、色坐标和模块内各像素之间的相对亮度关系，代入式（4.20）至（4.28）中，计算出校正系数，并反馈到显示控制系统，即可完成 LED 显示屏的颜色均匀性校正。图 4.11、图 4.12 分别为红基色颜色均匀性校正前后的照片，图 4.13、图 4.14 分别为绿基色颜色均匀性校正前后的照片。

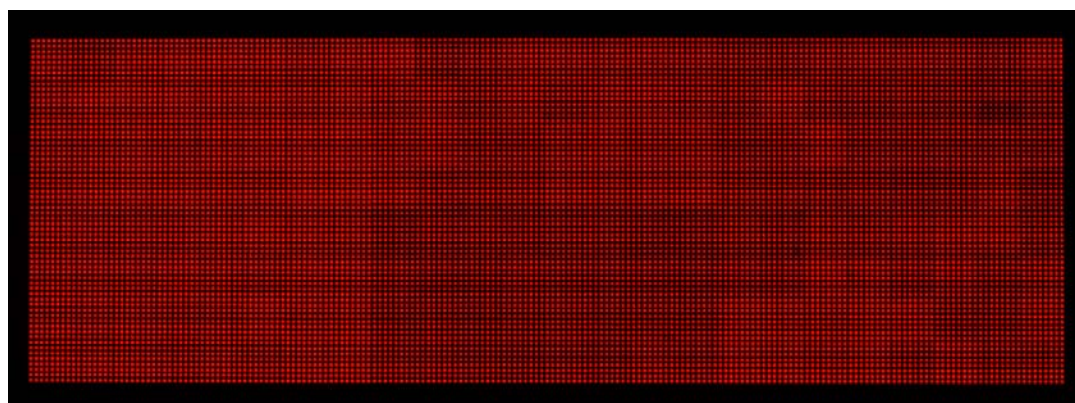


图 4.11 全彩 LED 模块显示屏样屏的红基色校正前照片

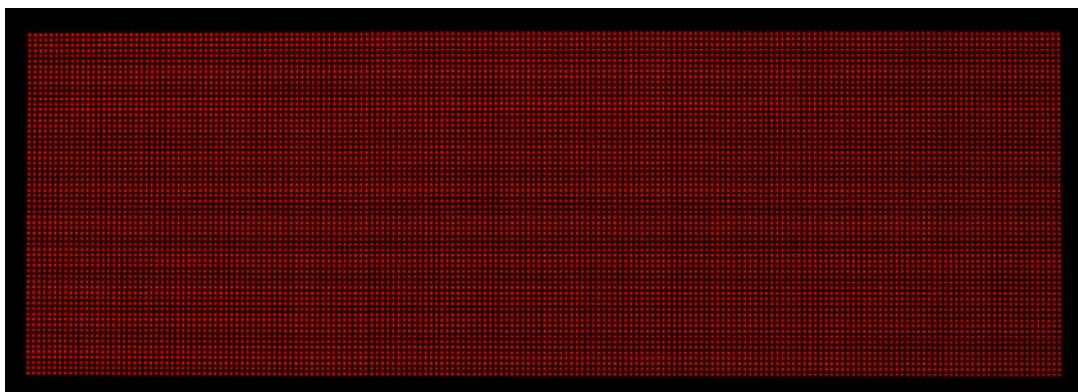


图 4.12 全彩 LED 模块显示屏样屏的红基色校正后照片

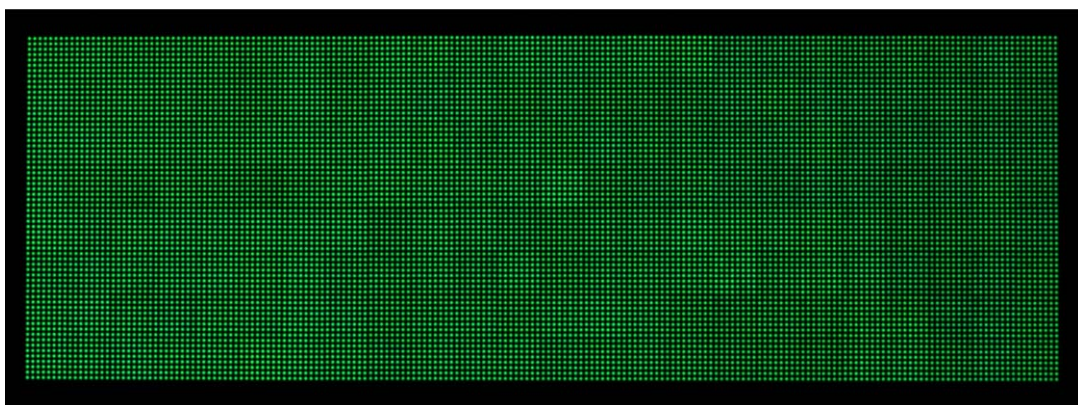


图 4.13 全彩 LED 模块显示屏样屏的绿基色校正前照片

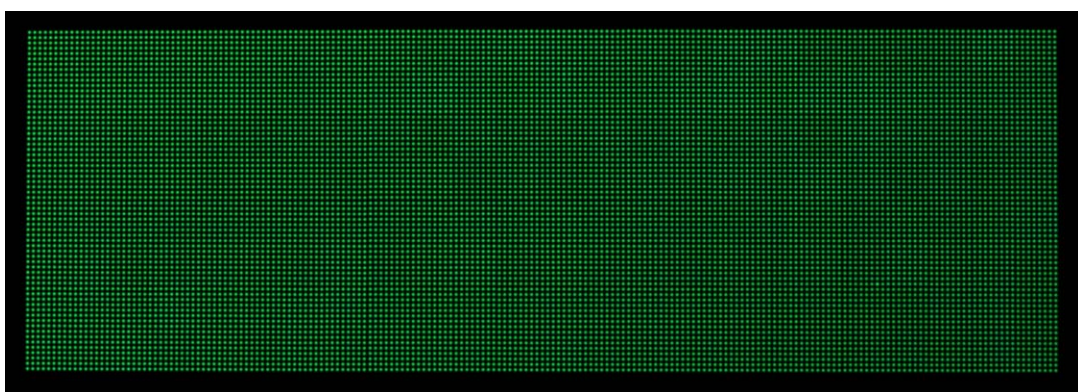


图 4.14 全彩 LED 模块显示屏样屏的绿基色校正后照片

可以看到，校正后模块间严重的色差问题已经消失，显示屏各个显示像素之间亮度色度一致，达到了进行颜色均匀性校正的目的。为了验证校正算法和校正过程的正确性，现对校正后显示模块 m_1 和显示模块 m_2 的成像显示特性进行定性

分析。图 4.15、图 4.16、图 4.17、图 4.18 分别为两显示模块所有显示像素红、绿基色在颜色均匀性校正后的亮度差异和色度差异。

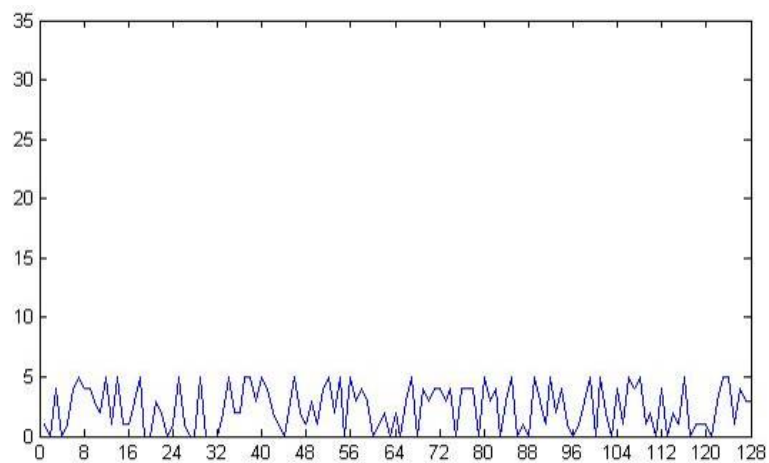


图 4.15 两显示模块各个显示像素红基色校正后亮度差异

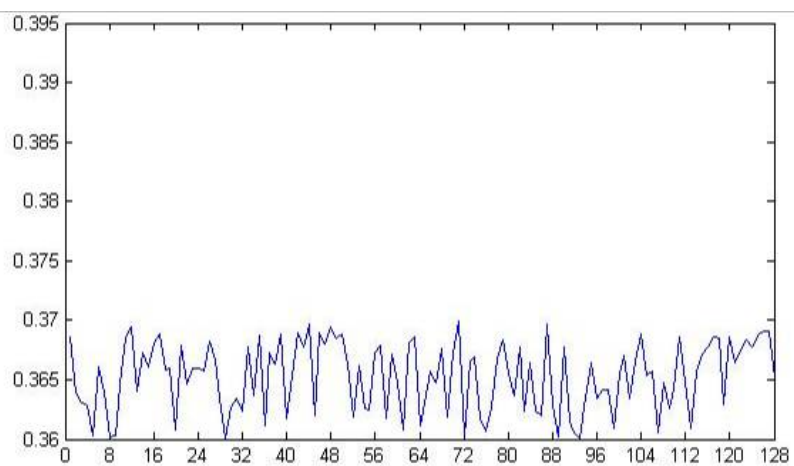


图 4.16 两显示模块各个显示像素红基色校正后色度差异

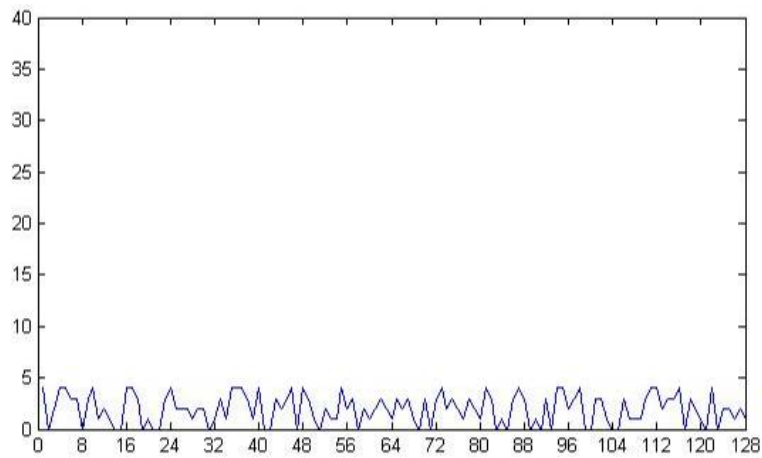


图 4.17 两显示模块各个显示像素绿基色校正后亮度差异

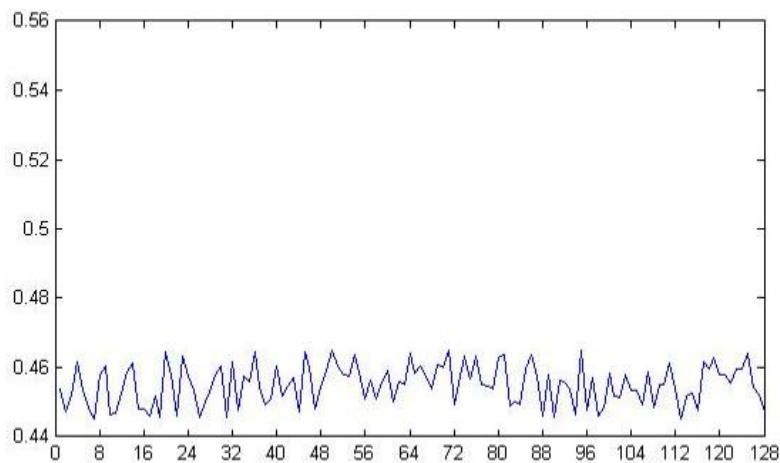


图 4.18 两显示模块各个显示像素绿基色校正后色度差异

可以看到，经颜色均匀性校正以后，显示屏上各个显示像素之间的红基色和绿基色的亮度差异由原来的近 40% 缩小到 5% 以内，而按显示模块为单位呈现的色度差异也得以消除，达到了进行颜色均匀性校正的目的。

然而，蓝基色的校正结果却存在一定的问题，表现为：每块显示控制卡所控制的 LED 显示屏区域的蓝基色显示时最后 11 行为黑，如图 4.19、图 4.20 所示。

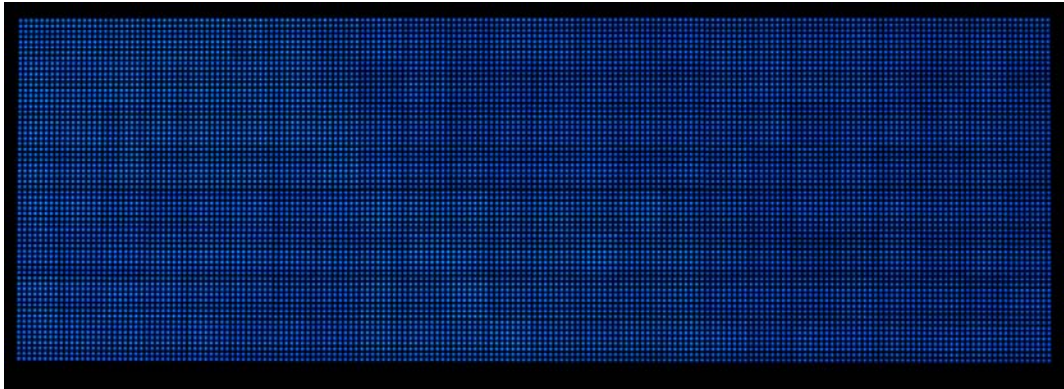


图 4.19 全彩 LED 模块显示屏样屏的蓝基色校正前照片



图 4.20 全彩 LED 模块显示屏样屏的蓝基色校正后照片

与此同时，我们可以看到在正常显示的部分，校正后的蓝基色模块间严重的色差问题也已经消失，显示屏各个显示像素之间亮度色度一致。同样，可以取校正后显示模块 m_1 和显示模块 m_2 蓝基色的成像显示特性进行定性分析，如图 4.21 和图 4.22 所示。

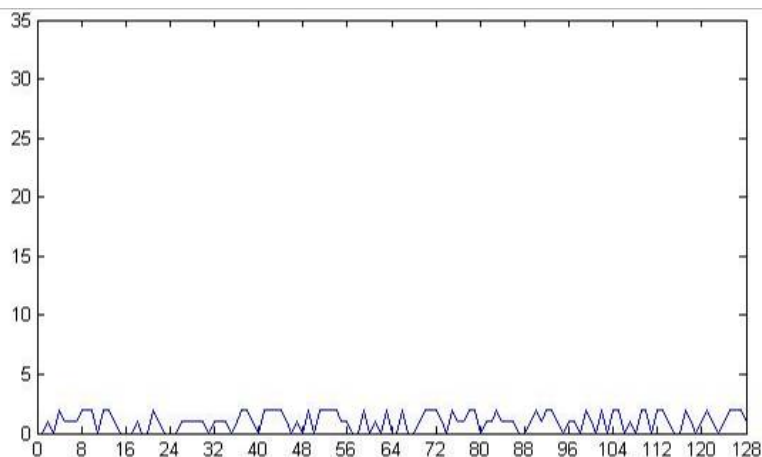


图 4.21 两显示模块各个显示像素绿基色校正后亮度差异

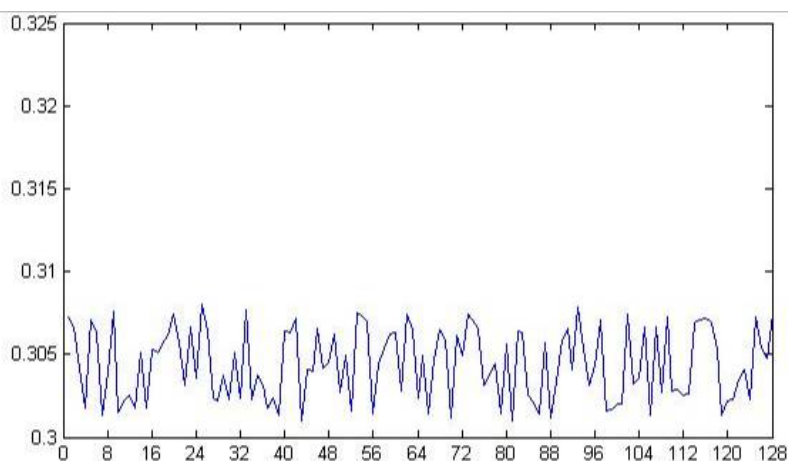


图 4.22 两显示模块各个显示像素绿基色校正后色度差异

可以看到，显示屏上各个显示像素之间的蓝基色的亮度差异由原来的近 35% 缩小到 4% 以内，而按显示模块为单位呈现的色度差异也得以消除，符合颜色均匀性校正结果要求。至于有近 11 行不能正确显示的原因及解决办法将在后续章节中展开讨论。

4.5 小结

本章节针对上一章节颜色均匀性校正方法存在的问题，结合工程实践，在分析全彩 LED 模块显示屏成像显示特点的基础上，通过对其定性和定量两方面的分析，提出一种亮度色度分离采集混合校正的全彩 LED 模块显示屏颜色均匀性校正方法，并建立相应的数学模型，最后在实际工程中对这一方法进行了验证。

同时，引出了该方法在工程中存在的问题，为后续章节内容的研究做了铺垫。

第 5 章 亮度色度系数分离校正研究

本章节针对第四章的试验结果存在的问题，结合控制系统的特点，进一步对全彩 LED 模块显示屏的颜色均匀性校正方法进行深入研究。

5.1 全彩 LED 显示屏控制系统

全彩 LED 显示屏作为一种新型的平板显示器件，它的系统组成主要包括信号源、数据传输系统、控制系统、驱动系统以及显示屏幕五部分^[74-76]，如图 5.1 所示。

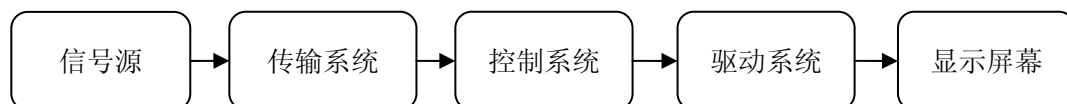


图 5.1 全彩 LED 显示屏系统组成

根据控制方式不同，全彩 LED 显示屏又可分为脱机显示屏和联机显示屏两种。脱机显示屏主要用来显示各种文字、符号和图形或动画等，近年来，随着 RISC 芯片技术的迅速发展及嵌入式操作系统的广泛应用，脱机显示屏也已经逐步支持大分辨率全彩 LED 屏幕的显示控制和标清、高清视频的播放^[77、78]。联机显示屏技术方案更加成熟，可以为用户提供更生动、更丰富的显示内容和更大的创意空间，广泛应用于交通、证券、银行、邮政、商业等领域，近年来，在公众信息显示和广告发布等方面的应用成为市场的主要增长点^[79-82]。本文对全彩 LED 显示屏颜色均匀性校正方法的研究基于联机显示屏开展。

联机显示屏的信号源主要有计算机输出的图文图像信号、电视视频信号、摄像机现场拍摄的各种信号和录像机播放的图像信息等；传输系统将信号源的数据进行处理、运算以及编码，然后经网线或光纤传输到控制系统；控制系统是整个 LED 显示屏系统的神经中枢，它由若干个可级联的控制单元板组成，负责将以一定格式传输的数据信号转换成 LED 显示所需要的驱动数据信号和控制信号，均匀性校正功能的实现也是在控制系统中完成的；驱动系统一方面接收控制系统的信号，一方面根据控制系统的命令把显示数据传送到各个显示单元；最终由显

示屏幕完成图像的显示。

LED 显示屏的控制系统在无校正技术嵌入的情况下，每个控制单元板可控制 256×128 像素分辨率的 LED 显示屏。

5.1.1 带亮度校正功能控制系统的特点

亮度校正功能的介入，意味着引入了新的转换参数，并且该转换参数跟图像数据一一对应，也就是说，亮度转换参数的数量等于控制单元板所能控制的图像数据的个数。

在发光器件的衰减引起 LED 显示屏再次呈现亮度不一致之前，LED 显示屏上每个显示像素对应的亮度转换参数的值可保持不变，因此存储亮度转换参数的器件应为掉电不丢失数据的器件。考虑到成本和实用性，硬件设计选用了 ATMEL 公司的 AT24C512 型 EEPROM 作为亮度转换参数的存储器件。

由于数据量的增大，受硬件资源限制，带亮度校正功能的控制单元板可控制最大 256×64 像素分辨率的 LED 显示屏。这一类型的控制系统已经在生产中广泛应用。

5.1.2 带颜色均匀性校正功能控制系统的特点

颜色均匀性校正功能的介入，对于控制系统的硬件设计，在原理上并没有什么变化，不同的是，要实现颜色均匀性校正，每一显示像素对应的颜色转换参数为一 3×3 的系数矩阵，而不再是跟亮度转换参数那样一一对应的关系，也就是说，引入颜色均匀性校正功能以后，转换参数的数量是原来的 3 倍之多。

在这种情况下，带颜色均匀性校正功能控制系统的每个控制单元板就只能控制最大 256×32 像素分辨率的 LED 显示屏了。第四章的工程实现部分所采用的控制系统即原有带亮度校正功能控制系统的改进版。

实验结果证明，该控制系统有效的实现了全彩 LED 显示屏红基色和绿基色的颜色均匀性校正功能，而蓝基色的校正尚存在一定欠缺。但同时发现，蓝基色可正常显示部分的校正效果达到了预期目标。因此，该控制系统存在的问题可归结于颜色转换系数的存储部分。

为便于分析，实现颜色均匀性校正所需的颜色转换参数的存储空间可记为 p ，则有：

$$p = 256 \times 32 \times 9 \times 8 \text{bits} = 576 \text{Kbits} \quad (5.1)$$

其中， 256×32 是控制单元板所能控制的 LED 显示屏像素分辨率，9 是每个显示像素所对应颜色转换参数的数量，8 是每个颜色转换参数的数位精度。

由 (5-1) 可得，实现颜色均匀性校正所需的颜色转换参数的存储空间为 576K ，而颜色转换参数的存储器件的容量只有 512K 。根据颜色转换参数在 EEPROM 中按照红绿蓝依次存放的规则，有部分蓝基色的颜色转换参数未能被控制系统读取，在运算中都按照默认值 0 进行计算，所以必然有部分蓝基色在校正以后显示为黑。

下面，进一步对每个控制单元板所控制的蓝基色校正后显示为黑的行数进行测算，记该行数为 l ，则有：

$$l = \frac{(576 - 512) \times 1024}{256 \times 3 \times 8} \quad (5.2)$$

其中， $576 - 512$ 是未被有效存储的蓝基色颜色转换参数的总量；256 是控制单元板所控制的像素宽度；3 是每个显示像素蓝基色颜色转换参数的数量；8 是每个颜色转换参数的数位精度。

由 (5.2) 可得，每个控制单元板所控制的蓝基色校正后显示为黑的行数为 10.7 行，这与第四章的工程实现部分的现象一致。

于是可以得到，引入颜色均匀性校正功能以后，控制系统与只带亮度校正功能时相比，每个控制单元板所能控制的面积变为原来的一半，即成本变为原来的两倍；同时，受颜色转换参数存储器件容量限制，每个控制单元板所控制像素分辨率范围的蓝基色在校正后有近 11 行显示为黑。也就是说，在原有带亮度校正功能控制系统基础上简单升级的显示控制系统所能实现的颜色均匀性校正功能并不具备实用价值。

5.1.3 进行亮度色度系数分离校正的必要性

对原有控制系统做出硬件改动进行重新设计，需要耗费大量的时间，影响全彩 LED 显示屏颜色均匀性校正研究进度的同时，也是一种高成本的解决方案。既然该控制系统存在的问题可归结于颜色转换系数的存储部分，相应的就会有两种思路来解决问题：一是选择容量更大的颜色转换参数存储器件；二是将颜色转换参数进行换算简化，使颜色转换参数能够完全存储于现有的存储器件。

考虑到每个显示模块的所有显示像素的色度参数相同，对一显示模块数为 M 行 N 列的、每一显示模块显示像素数为 I 行 J 列的全彩 LED 显示屏而言，亮度种类最多为 $M \times N \times I \times J$ 种，而色度种类最多为 $M \times N$ 种。如果可以实现亮度色度转换参数分离进行颜色均匀性校正，那么需要存储的颜色转换参数所占的存储空间就变为：各个显示像素红绿蓝三基色的亮度转换参数的存储空间为 $M \times N \times I \times J \times 3 \times 8bits$ ，各个显示模块的红绿蓝三基色色度转换参数的存储空间为 $M \times N \times 9 \times 8bits$ 。以最常见的 8×8 全彩 LED 模块显示屏为例，所有颜色转换参数所占的存储空间仅为 $M \times N \times 3 \times 8 \times (8 \times 8 + 3)$ ，其结果与只带亮度校正功能的控制系统存储亮度转换参数所需的存储空间相当。相应的，每个控制单元板在实现颜色均匀性校正的同时，所能控制的 LED 显示屏像素分辨率也可增大为 256×64 。

因此，第二种思路以其无需任何硬件改动且能节省一半成本等优点成为本论文开展进一步研究的首选方案，这就需要在颜色均匀性校正方法研究中首先完成亮度色度系数分离的算法研究。

5.2 亮度色度系数分离的可行性分析

根据以上设想，由于亮度校正技术已经相对成熟，而且从亮度校正的结果看，全彩 LED 显示屏显示模块内部显示效果清晰均匀，而显示模块之间还存在明显亮度色度差异；亮度色度系数分离以后，亮度转换参数在数量上仍要求与各个显示像素一一对应。因此首先对亮度校正后的 LED 显示屏颜色均匀性特性做出分析。

5.2.1 亮度校正后显示结果的均匀性分析

根据 4.2 章节中的相关内容，对于显示屏上第 m 行、第 n 列的显示模块 m_{m_n} 中第 i 行、第 j 列的显示像素 d_{i_j} ，它的颜色参数集合包括显示像素相对亮度、色坐标和像素所在显示模块的绝对亮度，即：

$$P_{color} = \begin{pmatrix} B_{r_m_{m_n}-d_{i_j}} & x_{r_m_{m_n}} & y_{r_m_{m_n}} & Y_{r_m_{m_n}} \\ B_{g_m_{m_n}-d_{i_j}} & x_{g_m_{m_n}} & y_{g_m_{m_n}} & Y_{g_m_{m_n}} \\ B_{b_m_{m_n}-d_{i_j}} & x_{b_m_{m_n}} & y_{b_m_{m_n}} & Y_{b_m_{m_n}} \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

根据第三章的提出的颜色均匀性校正方法中的内容，可确定 LED 显示屏的亮度基准参数 B_{r_std} 、 B_{g_std} 、 B_{b_std} 和色度基准参数 x_{r_std} 、 y_{r_std} 、 x_{g_std} 、 y_{g_std} 、 x_{b_std} 、 y_{b_std} 。这样，各个显示像素亮度校正后的显示数据 $R'_{m_{m_n}-d_{i_j}}$ 、 $G'_{m_{m_n}-d_{i_j}}$ 、 $B'_{m_{m_n}-d_{i_j}}$ 可记为：

$$\begin{pmatrix} R'_{m_{m_n}-d_{i_j}} \\ G'_{m_{m_n}-d_{i_j}} \\ B'_{m_{m_n}-d_{i_j}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i_j}}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i_j}}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i_j}}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

而对于显示屏上第 m 行、第 n 列的显示模块 m_{m_n} 中第 i 行、第 j 列的显示像素 d_{i_j} 在亮度校正以后所显示的颜色空间可表示为：

$$\begin{pmatrix} X_{m_{m_n}-d_{i_j}} \\ Y_{m_{m_n}-d_{i_j}} \\ Z_{m_{m_n}-d_{i_j}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{r_m_{m_n}-d_{i_j}} x_{r_m_{m_n}} & C_{g_m_{m_n}-d_{i_j}} x_{g_m_{m_n}} & C_{b_m_{m_n}-d_{i_j}} x_{b_m_{m_n}} \\ C_{r_m_{m_n}-d_{i_j}} y_{r_m_{m_n}} & C_{g_m_{m_n}-d_{i_j}} y_{g_m_{m_n}} & C_{b_m_{m_n}-d_{i_j}} y_{b_m_{m_n}} \\ C_{r_m_{m_n}-d_{i_j}} z_{r_m_{m_n}} & C_{g_m_{m_n}-d_{i_j}} z_{g_m_{m_n}} & C_{b_m_{m_n}-d_{i_j}} z_{b_m_{m_n}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R'_{m_{m_n}-d_{i_j}} \\ G'_{m_{m_n}-d_{i_j}} \\ B'_{m_{m_n}-d_{i_j}} \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

其中，亮度校正过程中的颜色分配参数 $C_{r_m_{m_n}-d_{i_j}}$ 、 $C_{g_m_{m_n}-d_{i_j}}$ 、 $C_{b_m_{m_n}-d_{i_j}}$ 分别为：

$$\begin{cases} C_{r_m_{m_n}-d_{i_j}} = \frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i_j}}}{y_{r_m_{m_n}}} \\ C_{g_m_{m_n}-d_{i_j}} = \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i_j}}}{y_{g_m_{m_n}}} \\ C_{b_m_{m_n}-d_{i_j}} = \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i_j}}}{y_{b_m_{m_n}}} \end{cases} \quad (5.6)$$

于是得到亮度校正后任意显示模块 m_{m_n} 中任意显示像素 d_{i_j} 的颜色空间为：

$$\begin{pmatrix} X_{m_{m_n}-d_{i_j}} \\ Y_{m_{m_n}-d_{i_j}} \\ Z_{m_{m_n}-d_{i_j}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{B_{r_std}}{y_{r_m_{m_n}}} x_{r_m_{m_n}} & \frac{B_{g_std}}{y_{g_m_{m_n}}} x_{g_m_{m_n}} & \frac{B_{b_std}}{y_{b_m_{m_n}}} x_{b_m_{m_n}} \\ \frac{B_{r_std}}{y_{r_m_{m_n}}} y_{r_m_{m_n}} & \frac{B_{g_std}}{y_{g_m_{m_n}}} y_{g_m_{m_n}} & \frac{B_{b_std}}{y_{b_m_{m_n}}} y_{b_m_{m_n}} \\ \frac{B_{r_std}}{y_{r_m_{m_n}}} z_{r_m_{m_n}} & \frac{B_{g_std}}{y_{g_m_{m_n}}} z_{g_m_{m_n}} & \frac{B_{b_std}}{y_{b_m_{m_n}}} z_{b_m_{m_n}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

那么，亮度校正后任意显示模块 m_{m_n} 中任意显示像素 d_{i_j} 的显示亮度 $Y_{m_{m_n}-d_{i_j}}$ 为：

$$\begin{aligned} Y_{m_{m_n}-d_{i_j}} &= \frac{B_{r_std}}{y_{r_m_{m_n}}} y_{r_m_{m_n}} R + \frac{B_{g_std}}{y_{g_m_{m_n}}} y_{g_m_{m_n}} G + \frac{B_{b_std}}{y_{b_m_{m_n}}} y_{b_m_{m_n}} B \\ &= B_{r_std} R + B_{g_std} G + B_{b_std} B \end{aligned} \quad (5.8)$$

而基准颜色空间的显示亮度 Y_{std} 为：

$$\begin{aligned} Y_{std} &= \frac{B_{r_std}}{y_{r_std}} y_{r_std} R + \frac{B_{g_std}}{y_{g_std}} y_{g_std} G + \frac{B_{b_std}}{y_{b_std}} y_{b_std} B \\ &= B_{r_std} R + B_{g_std} G + B_{b_std} B \end{aligned} \quad (5.9)$$

也就是说，亮度校正以后，显示屏上任意显示模块 m_{m_n} 中任意显示像素 d_{i_j}

显示任意颜色时的显示亮度都与基准颜色空间的显示亮度一致。

对于决定颜色的另外两个三刺激值分量 $X_{m_{m-n}-d_{i-j}}$ 、 $Z_{m_{m-n}-d_{i-j}}$ ，则有：

$$\begin{cases} X_{m_{m-n}-d_{i-j}} = \frac{B_{r-std}}{y_{r-m_{m-n}}} x_{r-m_{m-n}} R + \frac{B_{g-std}}{y_{g-m_{m-n}}} x_{g-m_{m-n}} G + \frac{B_{b-std}}{y_{b-m_{m-n}}} x_{b-m_{m-n}} B \\ Z_{m_{m-n}-d_{i-j}} = \frac{B_{r-std}}{y_{r-m_{m-n}}} z_{r-m_{m-n}} R + \frac{B_{g-std}}{y_{g-m_{m-n}}} z_{g-m_{m-n}} G + \frac{B_{b-std}}{y_{b-m_{m-n}}} z_{b-m_{m-n}} B \end{cases} \quad (5.10)$$

那么，对于显示屏上同一显示模块 m_{m-n} 中的任意显示像素 d_{i-j} ，不管显示何种颜色， $X_{m_{m-n}-d_{i-j}}$ 、 $Z_{m_{m-n}-d_{i-j}}$ 都为同一数值，即显示模块内各个显示像素在

亮度校正以后的色彩表现一致；而在模块之间，由于 $\frac{x_{r-m_{m-n}}}{y_{r-m_{m-n}}}$ 、 $\frac{x_{g-m_{m-n}}}{y_{g-m_{m-n}}}$ 、 $\frac{x_{b-m_{m-n}}}{y_{b-m_{m-n}}}$ 、

$\frac{z_{r-m_{m-n}}}{y_{r-m_{m-n}}}$ 、 $\frac{z_{g-m_{m-n}}}{y_{g-m_{m-n}}}$ 、 $\frac{z_{b-m_{m-n}}}{y_{b-m_{m-n}}}$ 的比例都不尽相同，所以显示屏上任意显示模块 m_{m-n}

之间在显示同一颜色时的色彩表现也不尽相同，即显示屏会呈现出一种以显示模块为单位的“马赛克”现象。这与全彩 LED 显示屏经亮度校正以后的显示效果一致。

5.2.2 亮度校正基础上按模块颜色校正结果的均匀性分析

经亮度校正以后，显示屏上任意显示模块 m_{m-n} 内的各个显示像素之间的亮度和色度一致，即所表现的颜色空间相同；而显示屏上的颜色表现差异体现在各个显示模块之间，所以下一步需完成显示屏上 $M \times N$ 个显示模块之间的颜色均匀性校正，不同的是，此时的颜色均匀性校正过程是把每个显示模块当成一个显示单元，进行相应的颜色空间变换，使校正后的各个显示模块的颜色空间相同。

根据第三章的提出的颜色均匀性校正方法中的内容，任意显示模块 m_{m-n} 的颜色转换参数矩阵 $T_{m_{m-n}}$ 可表示为：

$$T_{m_{m-n}} = \begin{pmatrix} T_{m_{m-n}}^{rr} & T_{m_{m-n}}^{rg} & T_{m_{m-n}}^{rb} \\ T_{m_{m-n}}^{gr} & T_{m_{m-n}}^{gg} & T_{m_{m-n}}^{gb} \\ T_{m_{m-n}}^{br} & T_{m_{m-n}}^{bg} & T_{m_{m-n}}^{bb} \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

所以，对同一显示模块 m_{m-n} 中的两个显示像素 d_{i1_j1} 和 d_{i2_j2} ，在亮度校正基础上直接按照模块进行颜色均匀性校正的过程可分别表示为：

$$\begin{pmatrix} R_{m_{m-n}-d_{i1_j1}}'' \\ G_{m_{m-n}-d_{i1_j1}}'' \\ B_{m_{m-n}-d_{i1_j1}}'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{m_{m-n}}^{rr} & T_{m_{m-n}}^{rg} & T_{m_{m-n}}^{rb} \\ T_{m_{m-n}}^{gr} & T_{m_{m-n}}^{gg} & T_{m_{m-n}}^{gb} \\ T_{m_{m-n}}^{br} & T_{m_{m-n}}^{bg} & T_{m_{m-n}}^{bb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{m_{m-n}-d_{i1_j1}}' \\ G_{m_{m-n}-d_{i1_j1}}' \\ B_{m_{m-n}-d_{i1_j1}}' \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

$$\begin{pmatrix} R_{m_{m-n}-d_{i2_j2}}'' \\ G_{m_{m-n}-d_{i2_j2}}'' \\ B_{m_{m-n}-d_{i2_j2}}'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{m_{m-n}}^{rr} & T_{m_{m-n}}^{rg} & T_{m_{m-n}}^{rb} \\ T_{m_{m-n}}^{gr} & T_{m_{m-n}}^{gg} & T_{m_{m-n}}^{gb} \\ T_{m_{m-n}}^{br} & T_{m_{m-n}}^{bg} & T_{m_{m-n}}^{bb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{m_{m-n}-d_{i2_j2}}' \\ G_{m_{m-n}-d_{i2_j2}}' \\ B_{m_{m-n}-d_{i2_j2}}' \end{pmatrix} \quad (5.13)$$

根据 (5.4) 式，则有：

$$\begin{pmatrix} R_{m_{m-n}-d_{i1_j1}}'' \\ G_{m_{m-n}-d_{i1_j1}}'' \\ B_{m_{m-n}-d_{i1_j1}}'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m-n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m-n}}^{rr} & \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m-n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m-n}}^{rg} & \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m-n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m-n}}^{rb} \\ \frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m-n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m-n}}^{gr} & \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m-n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m-n}}^{gg} & \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m-n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m-n}}^{gb} \\ \frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m-n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m-n}}^{br} & \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m-n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m-n}}^{bg} & \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m-n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m-n}}^{bb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (5.14)$$

$$\begin{pmatrix} R_{m_{m-n}-d_{i2_j2}}'' \\ G_{m_{m-n}-d_{i2_j2}}'' \\ B_{m_{m-n}-d_{i2_j2}}'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m-n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m-n}}^{rr} & \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m-n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m-n}}^{rg} & \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m-n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m-n}}^{rb} \\ \frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m-n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m-n}}^{gr} & \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m-n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m-n}}^{gg} & \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m-n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m-n}}^{gb} \\ \frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m-n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m-n}}^{br} & \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m-n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m-n}}^{bg} & \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m-n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m-n}}^{bb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (5.15)$$

根据 (5.14) 和 (5.15) 式，可以得到同一显示模块 m_{m-n} 中的两个显示像素

d_{i1_j1} 和 d_{i2_j2} 在亮度校正基础上进行颜色均匀性校正后红绿蓝三基色的显示情

况，由此可以得到这两个显示像素校正后的颜色空间参数 $X_{m_{m_n}-d_{i1_j1}}$ 、

$Y_{m_{m_n}-d_{i1_j1}}$ 、 $Z_{m_{m_n}-d_{i1_j1}}$ 、 $X_{m_{m_n}-d_{i2_j2}}$ 、 $Y_{m_{m_n}-d_{i2_j2}}$ 、 $Z_{m_{m_n}-d_{i2_j2}}$ ：

$$\begin{aligned}
X_{m_{m_n}-d_{i1_j1}} = & C_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}} x_{r_m_{m_n}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{rr} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{rg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{rb} B \right) \\
& + C_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}} x_{g_m_{m_n}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gr} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gb} B \right) \\
& + C_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}} x_{b_m_{m_n}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{br} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{bg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{bb} B \right)
\end{aligned} \tag{5.16}$$

$$\begin{aligned}
Y_{m_{m_n}-d_{i1_j1}} = & C_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}} y_{r_m_{m_n}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{rr} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{rg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{rb} B \right) \\
& + C_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}} y_{g_m_{m_n}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gr} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gb} B \right) \\
& + C_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}} y_{b_m_{m_n}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{br} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{bg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{bb} B \right)
\end{aligned} \tag{5.17}$$

$$\begin{aligned}
Z_{m_{m_n}-d_{i1_j1}} = & C_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}} z_{r_m_{m_n}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{rr} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{rg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{rb} B \right) \\
& + C_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}} z_{g_m_{m_n}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gr} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gb} B \right) \\
& + C_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}} z_{b_m_{m_n}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{br} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{bg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{bb} B \right)
\end{aligned} \tag{5.18}$$

$$\begin{aligned}
X_{m_{m_n}-d_{i2_j2}} &= C_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}} x_{r_m_{m_n}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{rr} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{rg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{rb} B \right) \\
&+ C_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}} x_{g_m_{m_n}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gr} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gb} B \right) \\
&+ C_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}} x_{b_m_{m_n}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{br} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{bg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{bb} B \right)
\end{aligned} \tag{5.19}$$

$$\begin{aligned}
Y_{m_{m_n}-d_{i2_j2}} &= C_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}} y_{r_m_{m_n}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{rr} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{rg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{rb} B \right) \\
&+ C_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}} y_{g_m_{m_n}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gr} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gb} B \right) \\
&+ C_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}} y_{b_m_{m_n}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{br} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{bg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{bb} B \right)
\end{aligned} \tag{5.20}$$

$$\begin{aligned}
Z_{m_{m_n}-d_{i2_j2}} &= C_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}} z_{r_m_{m_n}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{rr} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{rg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{rb} B \right) \\
&+ C_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}} z_{g_m_{m_n}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gr} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gb} B \right) \\
&+ C_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}} z_{b_m_{m_n}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{br} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{bg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{bb} B \right)
\end{aligned} \tag{5.21}$$

这就可以对在亮度校正基础上进行颜色均匀性校正的结果进行评估。首先根据（5.17）和（5.20），对显示模块 m_{m_n} 中的两个显示像素 d_{i1_j1} 和 d_{i2_j2} 完成校正后的亮度情况进行分析，则有：

$$\begin{aligned}
Y_{m_{m_n}-d_{i1_j1}} &= B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{rr} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{rg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{rb} B \right) \\
&+ B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gr} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gb} B \right) \\
&+ B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{br} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{bg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{bb} B \right)
\end{aligned} \tag{5.22}$$

$$\begin{aligned}
Y_{m_{m_n}-d_{i2_j2}} &= B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{rr} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{rg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{rb} B \right) \\
&+ B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gr} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gb} B \right) \\
&+ B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}} \left(\frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{br} R + \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{bg} G + \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{bb} B \right)
\end{aligned} \tag{5.23}$$

要使显示模块 m_{m_n} 中的两个显示像素 d_{i1_j1} 和 d_{i2_j2} 完成校正后的亮度相同，则必须满足：

$$\begin{cases} \frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} = \frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} \\ \frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} = \frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} \\ \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} = \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} \end{cases} \tag{5.24}$$

而实际上，显示屏上任意两个显示像素红绿蓝三基色的亮度分布都不具备这种规律性，在概率上属于小概率事件。为对应完成校正后的三基色显示数据，(5.22) 和 (5.23) 可进一步表示为：

$$\begin{aligned}
Y_{m_{m_n}-d_{i1_j1}} &= B_{r_std} \left(\frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{rr} + \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gr} + \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{br} \right) R \\
&+ B_{g_std} \left(\frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{rg} + \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gg} + \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{bg} \right) G \\
&+ B_{b_std} \left(\frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{rb} + \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gb} + \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{bb} \right) B
\end{aligned} \tag{5.25}$$

$$\begin{aligned}
Y_{m_{m_n}-d_{i2_j2}} &= B_{r_std} \left(\frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{rr} + \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gr} + \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{br} \right) R \\
&+ B_{g_std} \left(\frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{rg} + \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gg} + \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{bg} \right) G \\
&+ B_{b_std} \left(\frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{rb} + \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gb} + \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{bb} \right) B
\end{aligned} \tag{5.26}$$

为简化描述，以完成校正后显示模块 m_{m_n} 中的两个显示像素 d_{i1_j1} 和 d_{i2_j2} 在显示红基色时的亮度为例，其亮度如式（5.27）、（5.28）所示：

$$Y_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}} = B_{r_std} \left(\frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{rr} + \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gr} + \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{br} \right) R \tag{5.27}$$

$$Y_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}} = B_{r_std} \left(\frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{rr} + \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gr} + \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{br} \right) R \tag{5.28}$$

由此可以得到，只要不满足式（5.24）所要求的必要条件，完成校正后，任意显示模块 m_{m_n} 内的各个显示像素的亮度都不一样。

下面继续对同一显示模块 m_{m_n} 内的两个显示像素 d_{i1_j1} 和 d_{i2_j2} 之间的色度

一致性情况进行分析，为简化描述，同样以校正完成后显示红基色的情况为例。根据式（5.16）至（5.21），可以得到这两个显示像素校正后显示红基色时颜色空间的三刺激值，如式（5.29）和（5.30）所示：

$$\begin{cases} X_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}} = B_{r_std} \left(\frac{x_{r_m_{m_n}}}{y_{r_m_{m_n}}} \frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{rr} + \frac{x_{g_m_{m_n}}}{y_{g_m_{m_n}}} \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gr} + \frac{x_{b_m_{m_n}}}{y_{b_m_{m_n}}} \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{br} \right) R \\ Y_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}} = B_{r_std} \left(\frac{y_{r_m_{m_n}}}{y_{r_m_{m_n}}} \frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{rr} + \frac{y_{g_m_{m_n}}}{y_{g_m_{m_n}}} \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gr} + \frac{y_{b_m_{m_n}}}{y_{b_m_{m_n}}} \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{br} \right) R \\ Z_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}} = B_{r_std} \left(\frac{z_{r_m_{m_n}}}{y_{r_m_{m_n}}} \frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{rr} + \frac{z_{g_m_{m_n}}}{y_{g_m_{m_n}}} \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gr} + \frac{z_{b_m_{m_n}}}{y_{b_m_{m_n}}} \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{br} \right) R \end{cases} \quad (5.29)$$

$$\begin{cases} X_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}} = B_{r_std} \left(\frac{x_{r_m_{m_n}}}{y_{r_m_{m_n}}} \frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{rr} + \frac{x_{g_m_{m_n}}}{y_{g_m_{m_n}}} \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gr} + \frac{x_{b_m_{m_n}}}{y_{b_m_{m_n}}} \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{br} \right) R \\ Y_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}} = B_{r_std} \left(\frac{y_{r_m_{m_n}}}{y_{r_m_{m_n}}} \frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{rr} + \frac{y_{g_m_{m_n}}}{y_{g_m_{m_n}}} \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gr} + \frac{y_{b_m_{m_n}}}{y_{b_m_{m_n}}} \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{br} \right) R \\ Z_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}} = B_{r_std} \left(\frac{z_{r_m_{m_n}}}{y_{r_m_{m_n}}} \frac{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{rr} + \frac{z_{g_m_{m_n}}}{y_{g_m_{m_n}}} \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gr} + \frac{z_{b_m_{m_n}}}{y_{b_m_{m_n}}} \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{br} \right) R \end{cases} \quad (5.30)$$

进而可以得到显示屏上任意显示模块 m_{m_n} 内的两个显示像素 d_{i1_j1} 和 d_{i2_j2} 经校正后显示红基色时的色度坐标：

$$\begin{cases} x_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}} = \frac{\frac{x_{r_m_{m_n}}}{y_{r_m_{m_n}}} T_{m_{m_n}}^{rr} + \frac{x_{g_m_{m_n}}}{y_{g_m_{m_n}}} \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gr} + \frac{x_{b_m_{m_n}}}{y_{b_m_{m_n}}} \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{br}}{\frac{1}{y_{r_m_{m_n}}} T_{m_{m_n}}^{rr} + \frac{1}{y_{g_m_{m_n}}} \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gr} + \frac{1}{y_{b_m_{m_n}}} \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{br}} \\ y_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}} = \frac{T_{m_{m_n}}^{rr} + \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gr} + \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{br}}{\frac{1}{y_{r_m_{m_n}}} T_{m_{m_n}}^{rr} + \frac{1}{y_{g_m_{m_n}}} \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{gr} + \frac{1}{y_{b_m_{m_n}}} \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m_n}}^{br}} \end{cases} \quad (5.31)$$

$$\begin{cases}
x_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}} = \frac{\frac{x_{r_m_{m_n}} T_{m_{m_n}}^{rr} + \frac{x_{g_m_{m_n}} B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gr} + \frac{x_{b_m_{m_n}} B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{br}}{\frac{1}{y_{r_m_{m_n}}} T_{m_{m_n}}^{rr} + \frac{1}{y_{g_m_{m_n}}} \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gr} + \frac{1}{y_{b_m_{m_n}}} \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{br}} \\
y_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}} = \frac{T_{m_{m_n}}^{rr} + \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gr} + \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{br}}{\frac{1}{y_{r_m_{m_n}}} T_{m_{m_n}}^{rr} + \frac{1}{y_{g_m_{m_n}}} \frac{B_{g_m_{m_n}-d_{i2_j2}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{gr} + \frac{1}{y_{b_m_{m_n}}} \frac{B_{b_m_{m_n}-d_{i2_j2}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m_n}}^{br}}
\end{cases} \quad (5.32)$$

同样可以看出，只要不满足式（5.24）所要求的必要条件，完成校正后，任意显示模块 m_{m_n} 内的各个显示像素的色度坐标也都不一样。

那么，不同显示模块内的显示像素原来的色度差异是否得到了有效校正呢？下面对这种情况做进一步分析。取显示模块 m_{m1_n1} 内的显示像素 d_{i1_j1} 和显示模块 m_{m2_n2} 内的显示像素 d_{i2_j2} ，亮度校正后，这两个显示像素的亮度一致，即：

$$\begin{aligned}
Y_{m_{m1_n1}-d_{i1_j1}} &= \frac{B_{r_std}}{y_{r_m_{m1_n1}}} y_{r_m_{m1_n1}} R + \frac{B_{g_std}}{y_{g_m_{m1_n1}}} y_{g_m_{m1_n1}} G + \frac{B_{b_std}}{y_{b_m_{m1_n1}}} y_{b_m_{m1_n1}} B \\
&= B_{r_std} R + B_{g_std} G + B_{b_std} B \\
Y_{m_{m2_n2}-d_{i2_j2}} &= \frac{B_{r_std}}{y_{r_m_{m2_n2}}} y_{r_m_{m2_n2}} R + \frac{B_{g_std}}{y_{g_m_{m2_n2}}} y_{g_m_{m2_n2}} G + \frac{B_{b_std}}{y_{b_m_{m2_n2}}} y_{b_m_{m2_n2}} B \\
&= B_{r_std} R + B_{g_std} G + B_{b_std} B
\end{aligned} \quad (5.34)$$

由于两个显示像素位于不同的显示模块，其颜色转换参数矩阵也不同，分别记为 $T_{m_{m1_n1}}$ 、 $T_{m_{m2_n2}}$ ，根据式（5-12）和（5-13）则有：

$$\begin{pmatrix} R''_{m_{m1_n1}-d_{i1_j1}} \\ G''_{m_{m1_n1}-d_{i1_j1}} \\ B''_{m_{m1_n1}-d_{i1_j1}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{rr} & \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{rg} & \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{rb} \\ \frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{gr} & \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{gg} & \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{gb} \\ \frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{br} & \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{bg} & \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{bb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (5.35)$$

$$\begin{pmatrix} R''_{m_{m2_n2}-d_{i2_j2}} \\ G''_{m_{m2_n2}-d_{i2_j2}} \\ B''_{m_{m2_n2}-d_{i2_j2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{rr} & \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{rg} & \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{rb} \\ \frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{gr} & \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{gg} & \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{gb} \\ \frac{B_{r_std}}{B_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{br} & \frac{B_{g_std}}{B_{g_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{bg} & \frac{B_{b_std}}{B_{b_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{bb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (5.36)$$

跟同一显示模块内不同显示像素间校正以后的亮度色度一致性分析类似，以显示红基色为例，可以得到这两个显示像素的亮度和色坐标情况：

$$Y_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}} = B_{r_std} \left(\frac{B_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{rr} + \frac{B_{g_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{gr} + \frac{B_{b_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{br} \right) R \quad (5.37)$$

$$Y_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}} = B_{r_std} \left(\frac{B_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{rr} + \frac{B_{g_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{gr} + \frac{B_{b_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{br} \right) R \quad (5.38)$$

$$\left\{ \begin{aligned} x_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}} &= \frac{\frac{x_{r_m_{m1_n1}}}{y_{r_m_{m1_n1}}} T_{m_{m1_n1}}^{rrr} + \frac{x_{g_m_{m1_n1}}}{y_{g_m_{m1_n1}}} \frac{B_{g_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{gr} + \frac{x_{b_m_{m1_n1}}}{y_{b_m_{m1_n1}}} \frac{B_{b_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{br}}{\frac{1}{y_{r_m_{m1_n1}}} T_{m_{m1_n1}}^{rrr} + \frac{1}{y_{g_m_{m1_n1}}} \frac{B_{g_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{gr} + \frac{1}{y_{b_m_{m1_n1}}} \frac{B_{b_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{br}} \\ y_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}} &= \frac{T_{m_{m1_n1}}^{rrr} + \frac{B_{g_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{gr} + \frac{B_{b_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{br}}{\frac{1}{y_{r_m_{m1_n1}}} T_{m_{m1_n1}}^{rrr} + \frac{1}{y_{g_m_{m1_n1}}} \frac{B_{g_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{gr} + \frac{1}{y_{b_m_{m1_n1}}} \frac{B_{b_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}}{B_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}} T_{m_{m1_n1}}^{br}} \end{aligned} \right. \quad (5.39)$$

$$\left\{ \begin{aligned} x_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}} &= \frac{\frac{x_{r_m_{m2_n2}}}{y_{r_m_{m2_n2}}} T_{m_{m2_n2}}^{rrr} + \frac{x_{g_m_{m2_n2}}}{y_{g_m_{m2_n2}}} \frac{B_{g_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{gr} + \frac{x_{b_m_{m2_n2}}}{y_{b_m_{m2_n2}}} \frac{B_{b_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{br}}{\frac{1}{y_{r_m_{m2_n2}}} T_{m_{m2_n2}}^{rrr} + \frac{1}{y_{g_m_{m2_n2}}} \frac{B_{g_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{gr} + \frac{1}{y_{b_m_{m2_n2}}} \frac{B_{b_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{br}} \\ y_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}} &= \frac{T_{m_{m2_n2}}^{rrr} + \frac{B_{g_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{gr} + \frac{B_{b_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{br}}{\frac{1}{y_{r_m_{m2_n2}}} T_{m_{m2_n2}}^{rrr} + \frac{1}{y_{g_m_{m2_n2}}} \frac{B_{g_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{gr} + \frac{1}{y_{b_m_{m2_n2}}} \frac{B_{b_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}}{B_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}} T_{m_{m2_n2}}^{br}} \end{aligned} \right. \quad (5.40)$$

由式(5.37)至(5.40)可以得到, 分别位于显示模块 m_{m1_n1} 和显示模块 m_{m2_n2} 内的显示像素 d_{i1_j1} 和显示像素 d_{i2_j2} , 完成该校正过程以后, 其亮度和色坐标也均不相等。

也就是说, 在亮度校正基础上直接以显示模块为单位完成二次颜色均匀性校正过程, 不仅没有消除原来在显示模块间存在的色度差异, 反而破坏了显示模块间的亮度均匀性, 更加带来了显示模块内部各个显示像素之间的颜色不均匀性。

5.2.3 亮度校正基础上按模块颜色校正算法的问题分析

下面进一步分析在亮度校正基础上直接以显示模块为单位完成颜色均匀性校正出现错误的原因。对显示模块 m_{m1_n1} 内的显示像素 d_{i1_j1} 和显示模块 m_{m2_n2}

内的显示像素 d_{i2_j2} ，其红绿蓝三基色的亮度校正系数可分别表示为

$$K_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}、K_{g_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}、K_{b_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}、K_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}、K_{g_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}、K_{b_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}, \text{ 方便起见, 令:}$$

$$\begin{cases} K_{r1} = K_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}} \\ K_{g1} = K_{g_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}} \\ K_{b1} = K_{b_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}} \end{cases} \quad (5.41)$$

$$\begin{cases} K_{r2} = K_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}} \\ K_{g2} = K_{g_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}} \\ K_{b2} = K_{b_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}} \end{cases} \quad (5.42)$$

同样，对两个显示像素的其他颜色参数，都有：

$$\begin{cases} C_{r1} = C_{r_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}} \\ C_{g1} = C_{g_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}} \\ C_{b1} = C_{b_m_{m1_n1}-d_{i1_j1}} \end{cases} \quad (5.43)$$

$$\begin{cases} C_{r2} = C_{r_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}} \\ C_{g2} = C_{g_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}} \\ C_{b2} = C_{b_m_{m2_n2}-d_{i2_j2}} \end{cases} \quad (5.44)$$

$$\begin{cases} x_{r1} = x_{r_m_{m1_n1}} \\ y_{r1} = y_{r_m_{m1_n1}} \\ x_{g1} = x_{g_m_{m1_n1}} \\ y_{g1} = y_{g_m_{m1_n1}} \\ x_{b1} = x_{b_m_{m1_n1}} \\ y_{b1} = y_{b_m_{m1_n1}} \end{cases} \quad (5.45)$$

$$\begin{cases} x_{r2} = x_{r_m_{m2_n2}} \\ y_{r2} = y_{r_m_{m2_n2}} \\ x_{g2} = x_{g_m_{m2_n2}} \\ y_{g2} = y_{g_m_{m2_n2}} \\ x_{b2} = x_{b_m_{m2_n2}} \\ y_{b2} = y_{b_m_{m2_n2}} \end{cases} \quad (5.46)$$

从而可以得到两个显示像素亮度校正后颜色空间的三刺激值：

$$\begin{cases} X'_{m_{m1_n1}-d_{i1_j1}} = C_{r1}x_{r1}(K_{r1}R) + C_{g1}x_{g1}(K_{g1}G) + C_{b1}x_{b1}(K_{b1}B) \\ Y'_{m_{m1_n1}-d_{i1_j1}} = C_{r1}y_{r1}(K_{r1}R) + C_{g1}y_{g1}(K_{g1}G) + C_{b1}y_{b1}(K_{b1}B) \\ Z'_{m_{m1_n1}-d_{i1_j1}} = C_{r1}z_{r1}(K_{r1}R) + C_{g1}z_{g1}(K_{g1}G) + C_{b1}z_{b1}(K_{b1}B) \end{cases} \quad (5.47)$$

$$\begin{cases} X'_{m_{m2_n2}-d_{i2_j2}} = C_{r2}x_{r2}(K_{r2}R) + C_{g2}x_{g2}(K_{g2}G) + C_{b2}x_{b2}(K_{b2}B) \\ Y'_{m_{m2_n2}-d_{i2_j2}} = C_{r2}y_{r2}(K_{r2}R) + C_{g2}y_{g2}(K_{g2}G) + C_{b2}y_{b2}(K_{b2}B) \\ Z'_{m_{m2_n2}-d_{i2_j2}} = C_{r2}z_{r2}(K_{r2}R) + C_{g2}z_{g2}(K_{g2}G) + C_{b2}z_{b2}(K_{b2}B) \end{cases} \quad (5.48)$$

根据亮度校正过程的实现原理，有：

$$\begin{cases} C_{r1}y_{r1}(K_{r1}R) = C_{r2}y_{r2}(K_{r2}R) \\ C_{g1}y_{g1}(K_{g1}G) = C_{g2}y_{g2}(K_{g2}G) \\ C_{b1}y_{b1}(K_{b1}B) = C_{b2}y_{b2}(K_{b2}B) \end{cases} \quad (5.49)$$

即： $Y'_{m_{m1_n1}-d_{i1_j1}} = Y'_{m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}$ ，也就是说亮度校正以后，两像素的亮度相等，

其颜色差异则体现为色度的差异，以显示模块 m_{m2_n2} 内的显示像素 d_{i2_j2} 的亮度

校正系数作为参考标准，则有：

$$\begin{cases} X'_{m_{m1_n1}-d_{i1_j1}} = \frac{x_{r1}}{y_{r1}}Y_{r2}K_{r2}R + \frac{x_{g1}}{y_{g1}}Y_{g2}K_{g2}G + \frac{x_{b1}}{y_{b1}}Y_{b2}K_{b2}B \\ Z'_{m_{m1_n1}-d_{i1_j1}} = \frac{z_{r1}}{y_{r1}}Y_{r2}K_{r2}R + \frac{z_{g1}}{y_{g1}}Y_{g2}K_{g2}G + \frac{z_{b1}}{y_{b1}}Y_{b2}K_{b2}B \end{cases} \quad (5.50)$$

$$\begin{cases} X'_{m_{m2_n2} - d_{i2_j2}} = \frac{x_{r2}}{y_{r2}} Y_{r2} K_{r2} R + \frac{x_{g2}}{y_{g2}} Y_{g2} K_{g2} G + \frac{x_{b2}}{y_{b2}} Y_{b2} K_{b2} B \\ Z'_{m_{m2_n2} - d_{i2_j2}} = \frac{z_{r2}}{y_{r2}} Y_{r2} K_{r2} R + \frac{z_{g2}}{y_{g2}} Y_{g2} K_{g2} G + \frac{z_{b2}}{y_{b2}} Y_{b2} K_{b2} B \end{cases} \quad (5.51)$$

可以得到, 显示模块间各个显示像素之间的颜色差异取决于各个显示模块之间的色度差异, 这与前面章节中分析的情况相符。

以下进一步分析颜色均匀性校正过程的实质。如果只有红基色的各个显示模块之间存在色度差异, 即只需要对红基色完成颜色均匀性校正过程, 那么只需要在红基色中改变绿、蓝两种辅基色的配比, 即可消除显示模块之间的色度偏差, 相应的, 颜色转换参数也只有 T^{rr} 、 T^{gr} 、 T^{br} 三个。方便起见, 令:

$$\begin{cases} T_1^{rr} = T_{m_{m1_n1}}^{rr} \\ T_1^{gr} = T_{m_{m1_n1}}^{gr} \\ T_1^{br} = T_{m_{m1_n1}}^{br} \end{cases} \quad (5.52)$$

$$\begin{cases} T_2^{rr} = T_{m_{m2_n2}}^{rr} \\ T_2^{gr} = T_{m_{m2_n2}}^{gr} \\ T_2^{br} = T_{m_{m2_n2}}^{br} \end{cases} \quad (5.53)$$

同样, 对绿蓝两种基色的颜色转换参数则有:

$$\begin{cases} T_1^{rg} = T_{m_{m1_n1}}^{rg} \\ T_1^{gg} = T_{m_{m1_n1}}^{gg} \\ T_1^{bg} = T_{m_{m1_n1}}^{bg} \end{cases} \quad (5.54)$$

$$\begin{cases} T_2^{rg} = T_{m_{m2_n2}}^{rg} \\ T_2^{gg} = T_{m_{m2_n2}}^{gg} \\ T_2^{bg} = T_{m_{m2_n2}}^{bg} \end{cases} \quad (5.55)$$

$$\begin{cases} T_1^{rb} = T_{m_{m1_n1}}^{rb} \\ T_1^{gb} = T_{m_{m1_n1}}^{gb} \\ T_1^{bb} = T_{m_{m1_n1}}^{bb} \end{cases} \quad (5.56)$$

$$\begin{cases} T_2^{rb} = T_{m_{m2_n2}}^{rb} \\ T_2^{gb} = T_{m_{m2_n2}}^{gb} \\ T_2^{bb} = T_{m_{m2_n2}}^{bb} \end{cases} \quad (5.57)$$

当红绿蓝三基色的各个显示模块之间都存在色度差异, 完成颜色均匀性校正的颜色转换参数构成一个 3×3 的系数矩阵。对亮度校正后的显示屏按显示模块为单位进行颜色均匀性校正, 则有:

$$\begin{cases} X_{m_{m1_n1} - d_{i1_j1}}'' = \frac{x_{r1}}{y_{r1}} Y_{r2} K_{r2} R T_1^{rr} + \frac{x_{g1}}{y_{g1}} Y_{g2} K_{g2} G T_1^{rg} + \frac{x_{b1}}{y_{b1}} Y_{b2} K_{b2} B T_1^{rb} \\ Y_{m_{m1_n1} - d_{i1_j1}}'' = \frac{y_{r1}}{y_{r1}} Y_{r2} K_{r2} R T_1^{gr} + \frac{y_{g1}}{y_{g1}} Y_{g2} K_{g2} G T_1^{gg} + \frac{y_{b1}}{y_{b1}} Y_{b2} K_{b2} B T_1^{gb} \\ Z_{m_{m1_n1} - d_{i1_j1}}'' = \frac{z_{r1}}{y_{r1}} Y_{r2} K_{r2} R T_1^{br} + \frac{z_{g1}}{y_{g1}} Y_{g2} K_{g2} G T_1^{bg} + \frac{z_{b1}}{y_{b1}} Y_{b2} K_{b2} B T_1^{bb} \end{cases} \quad (5.58)$$

$$\begin{cases} X_{m_{m2_n2} - d_{i2_j2}}'' = \frac{x_{r2}}{y_{r2}} Y_{r2} K_{r2} R T_2^{rr} + \frac{x_{g2}}{y_{g2}} Y_{g2} K_{g2} G T_2^{rg} + \frac{x_{b2}}{y_{b2}} Y_{b2} K_{b2} B T_2^{rb} \\ Y_{m_{m2_n2} - d_{i2_j2}}'' = \frac{y_{r2}}{y_{r2}} Y_{r2} K_{r2} R T_2^{gr} + \frac{y_{g2}}{y_{g2}} Y_{g2} K_{g2} G T_2^{gg} + \frac{y_{b2}}{y_{b2}} Y_{b2} K_{b2} B T_2^{gb} \\ Z_{m_{m2_n2} - d_{i2_j2}}'' = \frac{z_{r2}}{y_{r2}} Y_{r2} K_{r2} R T_2^{br} + \frac{z_{g2}}{y_{g2}} Y_{g2} K_{g2} G T_2^{bg} + \frac{z_{b2}}{y_{b2}} Y_{b2} K_{b2} B T_2^{bb} \end{cases} \quad (5.59)$$

在亮度校正基础上直接以显示模块为单位完成颜色均匀性校正是根据亮度校正后的实际亮度色度情况, 保证不改变已有的亮度一致性的前提下, 分配三种颜色在红绿蓝三基色中的比例关系, 最终实现整屏的亮度色度一致。

亮度方面, 在色度修正之前, 有 $Y_{m_{m1_n1} - d_{i1_j1}}' = Y_{m_{m2_n2} - d_{i2_j2}}'$; 在色度修正后, 要实现预定的颜色均匀性校正, 必须要保证 $Y_{m_{m1_n1} - d_{i1_j1}}'' = Y_{m_{m2_n2} - d_{i2_j2}}''$, 不同的是, 红

绿蓝三基色中各个显示颜色的亮度比例发生了变化,形成一种新的亮度色度平衡关系。而实际上,根据式(5-54)和(5-55),由于对于存在色度差异的显示模块,其颜色转换参数并不相等,即 $T_1^{gr} \neq T_2^{gr}$ 、 $T_1^{gg} \neq T_2^{gg}$ 、 $T_1^{gb} \neq T_2^{gb}$,这便造成色度修正后屏上显示像素之间显示同一颜色时的亮度并不一致。

色度方面,方便起见,仍以完成色度修正后显示红基色时的情况为例,此时,为了达到各个显示模块之间的色度平衡,红基色中掺杂了一定数量的绿、蓝两种辅基色。根据式(5-55),显示模块 m_{m2_n2} 内的显示像素 d_{i2_j2} 显示红基色时掺杂

的绿、蓝两种辅基色的亮度分别为: $\frac{y_{r2}}{y_{r2}}Y_{r2}K_{r2}RT_2^{gr}$ 、 $\frac{z_{r2}}{y_{r2}}Y_{r2}K_{r2}RT_2^{br}$ 。由于色度

修正过程所掺杂的另外两张辅基色数量应该为其对应颜色亮度分量与相应颜色转换参数的乘积,而实际上红基色中掺杂的绿、蓝辅基色数量都是主基色红的亮度分量与相应颜色转换参数的乘积,其校正结果也就难以消除显示模块之间存在的色度差异了。

因此,在亮度校正基础上直接以显示模块为单位完成颜色均匀性校正并不能实现预定的消除各个显示模块之间色度差异的目的,反而会导致各个显示像素之间亮度色度显示不一致。

5.2.4 亮度校正基础上按模块颜色校正的可行性

为解决该颜色均匀性校正实现算法的问题,首先分析显示模块 m_{m1_n1} 内的显示像素 d_{i1_j1} 和显示模块 m_{m2_n2} 内的显示像素 d_{i2_j2} 完成色度修正后的显示数据情况,分别记这两个显示像素校正后红绿蓝三基色显示情况为 $R_{m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}''$ 、 $G_{m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}''$ 、 $B_{m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}''$ 、 $R_{m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}''$ 、 $G_{m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}''$ 、 $B_{m_{m2_n2}-d_{i2_j2}}''$,方便起见,令:

$$\begin{cases} R_1'' = R_{m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}'' \\ G_1'' = G_{m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}'' \\ B_1'' = B_{m_{m1_n1}-d_{i1_j1}}'' \end{cases} \quad (5.60)$$

$$\begin{cases} R_2'' = R_{m_{2_n2} - d_{i2_j2}}'' \\ G_2'' = G_{m_{2_n2} - d_{i2_j2}}'' \\ B_2'' = B_{m_{2_n2} - d_{i2_j2}}'' \end{cases} \quad (5.61)$$

根据第四章提出的校正算法，它们的结果应该满足：

$$\begin{cases} R_1'' = \begin{pmatrix} T_1^{rr} & T_1^{rg} & T_1^{rb} \end{pmatrix} K_{r1} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \\ G_1'' = \begin{pmatrix} T_1^{gr} & T_1^{gg} & T_1^{gb} \end{pmatrix} K_{g1} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \\ B_1'' = \begin{pmatrix} T_1^{br} & T_1^{bg} & T_1^{bb} \end{pmatrix} K_{b1} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \end{cases} \quad (5.62)$$

$$\begin{cases} R_2'' = \begin{pmatrix} T_2^{rr} & T_2^{rg} & T_2^{rb} \end{pmatrix} K_{r2} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \\ G_2'' = \begin{pmatrix} T_2^{gr} & T_2^{gg} & T_2^{gb} \end{pmatrix} K_{g2} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \\ B_2'' = \begin{pmatrix} T_2^{br} & T_2^{bg} & T_2^{bb} \end{pmatrix} K_{b2} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \end{cases} \quad (5.63)$$

根据亮度校正的实现过程，可令：

$$K_1 = \begin{pmatrix} K_{r1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{g1} & 0 \\ 0 & 0 & K_{b1} \end{pmatrix} \quad (5.64)$$

$$K_2 = \begin{pmatrix} K_{r2} & 0 & 0 \\ 0 & K_{g2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{b2} \end{pmatrix} \quad (5.65)$$

同时，简化起见，可将颜色转换参数矩阵分别记为：

$$T_1 = \begin{pmatrix} T_1^{rr} & T_1^{rg} & T_1^{rb} \\ T_1^{gr} & T_1^{gg} & T_1^{gb} \\ T_1^{br} & T_1^{bg} & T_1^{bb} \end{pmatrix} \quad (5.66)$$

$$T_2 = \begin{pmatrix} T_2^{rr} & T_2^{rg} & T_2^{rb} \\ T_2^{gr} & T_2^{gg} & T_2^{gb} \\ T_2^{br} & T_2^{bg} & T_2^{bb} \end{pmatrix} \quad (5.67)$$

那么按照在亮度校正基础上直接以显示模块为单位完成颜色均匀性校正的直观描述，如果系数的分离也按照先逐点亮度后模块色度的方式，则有：

$$\begin{pmatrix} R_1'' \\ G_1'' \\ B_1'' \end{pmatrix} = T_1 K_1 \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (5.68)$$

$$\begin{pmatrix} R_2'' \\ G_2'' \\ B_2'' \end{pmatrix} = T_2 K_2 \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (5.69)$$

但是，这种运算结果并不等于式（5-58）和（5-59）所描述的正确显示结果。相反，根据式（5.62）和（5.63）可以得到：

$$\begin{pmatrix} R_1'' \\ G_1'' \\ B_1'' \end{pmatrix} = K_1 T_1 \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (5.70)$$

$$\begin{pmatrix} R_2'' \\ G_2'' \\ B_2'' \end{pmatrix} = K_2 T_2 \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (5.71)$$

也就是说,在系数分离过程中,如果按照先模块色度后逐点亮度的处理方案,即可保证在完成色度修正后屏上各个显示像素的亮度色度达到一致,预定的在亮度校正基础上以显示模块为单位完成颜色均匀性校正的方案具备可行性。

5.3 亮度色度系数分离校正的算法实现

根据 5.2 章节的分析,要解决第 4 章颜色均匀性校正结果存在的问题,可采取亮度色度分离校正的方法,将校正过程分解为亮度校正和色度校正两部分,其中亮度校正系数与屏上显示像素一一对应,色度校正系数与屏上显示模块一一对应。

首先根据 4.3.1 章节中的内容,获取得到显示屏上任意显示模块 m_{m_n} 中任意显示像素 d_{i_j} 红绿蓝三基色的绝对亮度 $Y_{r_m_{m_n}-d_{i_j}}$ 、 $Y_{g_m_{m_n}-d_{i_j}}$ 、 $Y_{b_m_{m_n}-d_{i_j}}$, 任意显示模块 m_{m_n} 红绿蓝三基色的绝对亮度和色度坐标 $x_{r_m_{m_n}}$ 、 $y_{r_m_{m_n}}$ 、 $Y_{r_m_{m_n}}$ 、 $x_{g_m_{m_n}}$ 、 $y_{g_m_{m_n}}$ 、 $Y_{g_m_{m_n}}$ 、 $x_{b_m_{m_n}}$ 、 $y_{b_m_{m_n}}$ 、 $Y_{b_m_{m_n}}$, 以及以此确定的基准颜色空间的色度参数 $(x_{r_std} \quad y_{r_std} \quad Y_{r_std})$ 、 $(x_{g_std} \quad y_{g_std} \quad Y_{g_std})$ 、 $(x_{b_std} \quad y_{b_std} \quad Y_{b_std})$ 。

5.3.1 亮度校正部分的算法模型

亮度校正部分的算法实现比较简单,根据 4.2.1 章节中描述的算法流程,亮度校正系数矩阵可表示为:

$$K = \begin{pmatrix} \frac{Y_{r_std}}{Y_{r_m_{m_n}-d_{i_j}}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Y_{g_std}}{Y_{g_m_{m_n}-d_{i_j}}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Y_{b_std}}{Y_{b_m_{m_n}-d_{i_j}}} \end{pmatrix} \quad (5.72)$$

根据式 (4.11) 和 (4.13)，该矩阵又可表示为：

$$K = \begin{pmatrix} \frac{Y_{r_std}}{Y_{r_m_{m_n}}} \frac{\bar{S}_{r_m_{m_n}}}{B_{r_m_{m_n}-d_{i_j}}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Y_{g_std}}{Y_{g_m_{m_n}}} \frac{\bar{S}_{g_m_{m_n}}}{B_{g_m_{m_n}-d_{i_j}}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Y_{b_std}}{Y_{b_m_{m_n}}} \frac{\bar{S}_{b_m_{m_n}}}{B_{b_m_{m_n}-d_{i_j}}} \end{pmatrix} \quad (5.73)$$

这便完成了亮色分离校正算法的亮度校正部分。

5.3.2 色度校正部分的算法模型

色度校正部分，其实现过程也比较简单，所不同的是此时需要将每个显示模块视作一个显示像素来进行“逐点”的颜色均匀性校正过程，且该过程不受亮度因素影响。根据 3.4 章节中的内容，色度校正系数矩阵可表示为：

$$T = \begin{pmatrix} T^{rr} & T^{rg} & T^{rb} \\ T^{gr} & T^{gg} & T^{gb} \\ T^{br} & T^{bg} & T^{bb} \end{pmatrix} \quad (5.74)$$

其中，各元素 T^{rr} 、 T^{rg} 、 T^{rb} 、 T^{gr} 、 T^{gg} 、 T^{gb} 、 T^{br} 、 T^{bg} 、 T^{bb} 分别为：

$$T^{rr} = \frac{\frac{1}{y_{r_std}}}{\frac{1}{y_{r_m_{m_n}}}} \left| \begin{array}{ccc} x_{r_std} & x_{g_m_{m_n}} & x_{b_m_{m_n}} \\ y_{r_std} & y_{g_m_{m_n}} & y_{b_m_{m_n}} \\ z_{r_std} & z_{g_m_{m_n}} & z_{b_m_{m_n}} \end{array} \right| \quad (5.75)$$

$$T^{rg} = \frac{\frac{1}{y_{r_std}}}{\frac{1}{y_{g_m_{m_n}}}} \left| \begin{array}{ccc} x_{r_m_{m_n}} & x_{r_std} & x_{b_m_{m_n}} \\ y_{r_m_{m_n}} & y_{r_std} & y_{b_m_{m_n}} \\ z_{r_m_{m_n}} & z_{r_std} & z_{b_m_{m_n}} \end{array} \right| \quad (5.76)$$

$$T^{rb} = \frac{\frac{1}{y_{r_std}}}{\frac{1}{y_{b_m_{m_n}}}} \left| \begin{array}{ccc} x_{r_m_{m_n}} & x_{g_m_{m_n}} & x_{r_std} \\ y_{r_m_{m_n}} & y_{g_m_{m_n}} & y_{r_std} \\ z_{r_m_{m_n}} & z_{g_m_{m_n}} & z_{r_std} \end{array} \right| \quad (5.77)$$

$$T^{gr} = \frac{\frac{1}{y_{g_std}}}{\frac{1}{y_{r_m_{m_n}}}} \left| \begin{array}{ccc} x_{g_std} & x_{g_m_{m_n}} & x_{b_m_{m_n}} \\ y_{g_std} & y_{g_m_{m_n}} & y_{b_m_{m_n}} \\ z_{g_std} & z_{g_m_{m_n}} & z_{b_m_{m_n}} \end{array} \right| \quad (5.78)$$

$$T^{gg} = \frac{\frac{1}{y_{g_std}}}{\frac{1}{y_{g_m_{m_n}}}} \left| \begin{array}{ccc} x_{r_m_{m_n}} & x_{g_std} & x_{b_m_{m_n}} \\ y_{r_m_{m_n}} & y_{g_std} & y_{b_m_{m_n}} \\ z_{r_m_{m_n}} & z_{g_std} & z_{b_m_{m_n}} \end{array} \right| \quad (5.79)$$

$$T^{gb} = \frac{\frac{1}{y_{g_std}}}{\frac{1}{y_{b_m_{m_n}}}} \left| \begin{array}{ccc} x_{r_m_{m_n}} & x_{g_m_{m_n}} & x_{g_std} \\ y_{r_m_{m_n}} & y_{g_m_{m_n}} & y_{g_std} \\ z_{r_m_{m_n}} & z_{g_m_{m_n}} & z_{g_std} \end{array} \right| \quad (5.80)$$

$$T^{br} = \frac{\frac{1}{y_{b_std}}}{\frac{1}{y_{r_m_{m_n}}}} \left| \begin{array}{ccc} x_{b_std} & x_{g_m_{m_n}} & x_{b_m_{m_n}} \\ y_{b_std} & y_{g_m_{m_n}} & y_{b_m_{m_n}} \\ z_{b_std} & z_{g_m_{m_n}} & z_{b_m_{m_n}} \end{array} \right| \quad (5.81)$$

$$T^{bg} = \frac{\frac{1}{y_{b_std}}}{\frac{1}{y_{g_m_{m_n}}}} \left| \begin{array}{ccc} x_{r_m_{m_n}} & x_{b_std} & x_{b_m_{m_n}} \\ y_{r_m_{m_n}} & y_{b_std} & y_{b_m_{m_n}} \\ z_{r_m_{m_n}} & z_{b_std} & z_{b_m_{m_n}} \end{array} \right| \quad (5.82)$$

$$T^{bb} = \frac{\frac{1}{y_{b_std}}}{\frac{1}{y_{b_m_n}}} \begin{vmatrix} x_{r_m_n} & x_{g_m_n} & x_{b_std} \\ y_{r_m_n} & y_{g_m_n} & y_{b_std} \\ z_{r_m_n} & z_{g_m_n} & z_{b_std} \end{vmatrix} \quad (5.83)$$

这便完成了亮色分离校正算法的色度校正部分。根据式 (5.70) 和 (5.71)，将亮度校正系数矩阵和色度校正系数矩阵代入，即可完成亮度色度系数分离的颜色均匀性校正过程。

5.3.3 亮度色度系数分离校正的校验

根据 5.2 章节的可行性分析，亮度色度系数分离校正的结果应与第 4 章混合校正的结果一致。下面以校正后显示红基色时为例，对亮度色度系数分离的算法进行校验。

首先，对色度校正过程，有：

$$R' = T^{rr}R + T^{rg}G + T^{rb}B \quad (5.84)$$

其次，对亮度校正过程，则有：

$$R'' = K_r (T^{rr}R + T^{rg}G + T^{rb}B) \quad (5.85)$$

将式 (5.73)、式 (5.75)、式 (5.76)、式 (5.77) 代入，可以得到：

$$\begin{aligned}
R'' = & \frac{\bar{S}_{r-m_{m-n}}}{B_{r-m_{m-n}-d_{i-j}}} \frac{C_{r-std}}{C_{r-m_{m-n}}} \begin{vmatrix} x_{r-std} & x_{g-m_{m-n}} & x_{b-m_{m-n}} \\ y_{r-std} & y_{g-m_{m-n}} & y_{b-m_{m-n}} \\ z_{r-std} & z_{g-m_{m-n}} & z_{b-m_{m-n}} \end{vmatrix} R \\
& + \frac{\bar{S}_{r-m_{m-n}}}{B_{r-m_{m-n}-d_{i-j}}} \frac{C_{g-std}}{C_{r-m_{m-n}}} \begin{vmatrix} x_{g-std} & x_{g-m_{m-n}} & x_{b-m_{m-n}} \\ y_{g-std} & y_{g-m_{m-n}} & y_{b-m_{m-n}} \\ z_{g-std} & z_{g-m_{m-n}} & z_{b-m_{m-n}} \end{vmatrix} G \\
& + \frac{\bar{S}_{r-m_{m-n}}}{B_{r-m_{m-n}-d_{i-j}}} \frac{C_{b-std}}{C_{r-m_{m-n}}} \begin{vmatrix} x_{b-std} & x_{g-m_{m-n}} & x_{b-m_{m-n}} \\ y_{b-std} & y_{g-m_{m-n}} & y_{b-m_{m-n}} \\ z_{b-std} & z_{g-m_{m-n}} & z_{b-m_{m-n}} \end{vmatrix} B
\end{aligned} \quad (5.86)$$

这与 4.3 章节中混合校正的结果一致，同时也证明了亮度色度系数分离校正算法的正确性。

5.4 亮度色度系数分离校正的工程实现

将分离后的亮度色度系数存储到 EEPROM 器件，并反馈到显示控制系统，完成该全彩 LED 模块显示屏样屏的颜色均匀性校正过程。结果表明，亮度色度系数分离校正的算法可以很好地解决第 4 章中混合校正存在的问题，彻底消除屏上的“麻点”和“马赛克”现象，达到理想的显示效果。

图 5.2 是采用亮度色度系数分离的颜色均匀性校正方法得到的蓝基色校正的

照片。

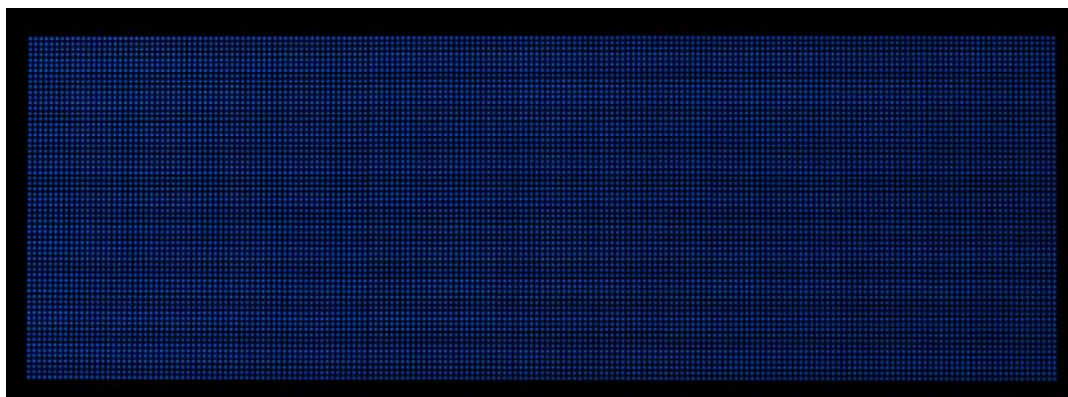


图 5.2 全彩 LED 模块显示屏蓝基色校正后照片

可以看到，第 4 章混合校正算法导致蓝基色图像缺失的部分可以正常显示，且整个屏幕的亮度色度一致。为进一步验证亮度色度系数分离算法的正确性，任取原来不能正常显示部分的两个显示模块，对其校正后的成像显示特性进行定性分析。其结果分别如图 5.3 和图 5.4 所示，图 5.3 为两显示模块各个显示像素校正后的亮度差异，图 5.4 为两显示模块各个显示像素校正后的色度差异。

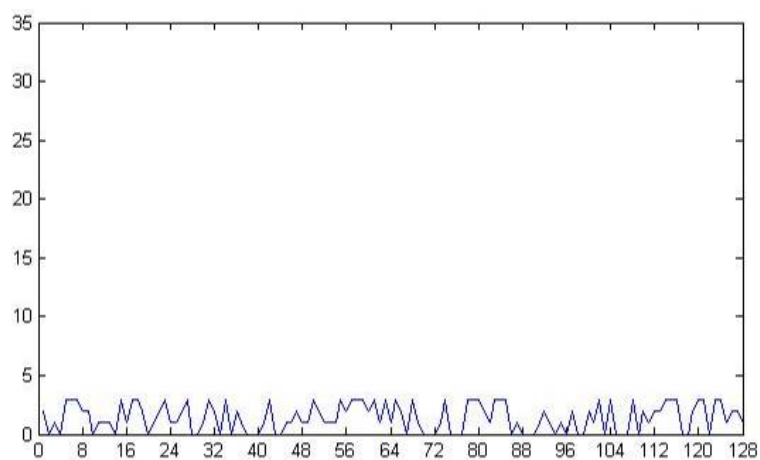


图 5.3 两显示模块各个显示像素蓝基色校正后的亮度差异

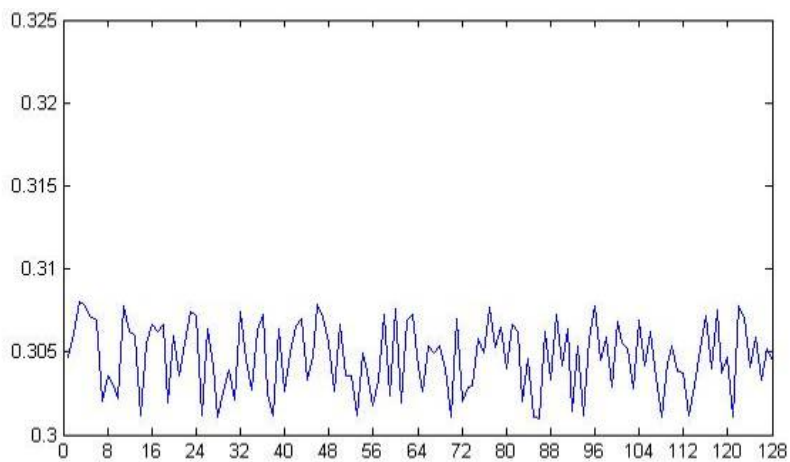


图 5.4 两显示模块各个显示像素蓝基色校正后的色度差异

可以看到，这两个显示模块各个显示像素的亮度色度差异和 4.4 章节中的两个显示模块的亮度色度差异情况一致。同时，我们可以得到白场在颜色均匀性校正前后的对比照片，分别如图 5.5 和图 5.6 所示。

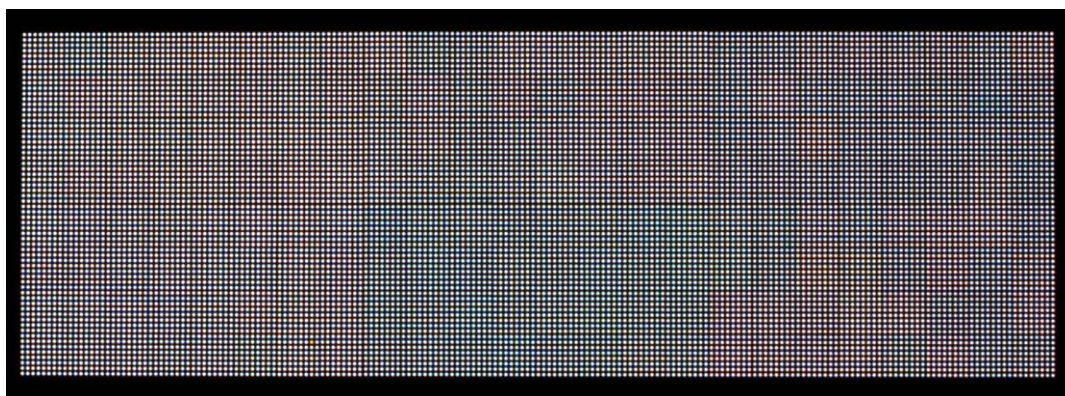


图 5.5 全彩 LED 模块显示屏样屏的白场校正前照片



图 5.6 全彩 LED 模块显示屏样的屏白场校正后照片

5.5 小结

本章节是上一章节研究内容的深化。首先对全彩 LED 显示屏控制系统的特点做了介绍，然后针对上一章节中颜色均匀性校正方法存在的问题，在不增加硬件成本的前提下，重点分析了颜色均匀性校正的亮度色度系数分离的必要性和可行性，并提出一种亮度逐点色度分块的全彩 LED 模块显示屏颜色均匀性校正方法，建立了相应的数学模型，并在工程中进行了有效验证，使 LED 显示屏的颜色均匀性校正第一次在工程中得到完美体现。

第 6 章 总结与展望

6.1 论文工作总结

本论文针对全彩 LED 显示屏成像显示的离散性造成的“麻点”和“马赛克”现象，对市场上较为普遍的全彩 LED 模块显示屏的颜色均匀性校正方法进行了研究。通过不断的分析、优化、验证，最终使论文提出的颜色均匀性校正方法在工程中得以实现，改善了显示屏的“麻点”和“马赛克”缺陷，达到了进行校正的预期目的。

本论文的主要工作有：

- 1、针对 LED 显示屏上的“麻点”和“马赛克”缺陷，通过相关色度学原理的学习，将色域转换原理应用于全彩 LED 显示屏的颜色均匀性校正。
- 2、通过 LED 显示屏颜色空间中亮度色度的基本关系分析，对 LED 显示屏基准颜色空间的定位定标方法展开了研究。
- 3、针对点检测设备在 LED 显示屏逐点采集过程中存在的效率低的问题，结合全彩 LED 模块显示屏的成像显示特点，开展了亮度色度分离采集混合校正的研究。
- 4、针对混合校正过高的资源消耗和工程缺陷，结合显示控制系统的特点，开展了全彩 LED 模块显示屏亮度逐点色度分块为基本思路的亮度色度系数分离的颜色均匀性校正方法研究。
- 5、将论文提出的校正方法应用于工程实践，并通过数据分析，验证了方法的有效性，在工程上解决了 LED 显示屏的“麻点”和“马赛克”缺陷。

6.2 论文的创新点

- 1、将色域转换原理应用于 LED 显示屏的颜色均匀性校正，并提出一种基准颜色空间的定位定标方法，保证显示屏上每一显示像素能够得到有效校正的同时，最大化地保持了 LED 显示屏色域广的优点。

2、提出一种亮度色度分离的采集方式，大大提高了采集效率，使点检测设备对 LED 显示屏的亮度色度检测在工程上具备了可行性。

3、提出一种亮度色度系数分离的颜色均匀性校正方法，在不增加硬件成本的基础上，使颜色均匀性校正第一次在 LED 显示屏上得以实现。

6.3 展望

论文仅在 LED 显示屏的颜色均匀性校正方面开展了一定的研究，虽然通过不断的分析、优化、验证，使颜色均匀性校正第一次在 LED 显示屏上得以工程实现。但颜色均匀性技术作为行业内的一个热点和难点问题，在本论文研究成果的基础上，还可进一步开展以下方面的研究：

1、采集。随着 LED 显示应用行业的飞速发展，显示屏的面积越来越大，人们对显示质量的要求也越来越高。用点检测设备对大面积的 LED 显示屏进行逐模块的亮度色度信息采集也将变得不可实现，更不用说有些需要进行逐像素采集的情况了。另外，对于已经安装好的显示屏，随着 LED 发光器件的衰减，一段时间以后，也需要对显示屏进行现场校正，这更加给采集工作增加了难度。因此，需要深入研究快速的高精度 LED 显示屏亮度色度参数数字采集技术。

2、评估。本论文的校正结果，虽然从定性和定量两个方面都取得了较好的颜色均匀性，但在 LED 显示应用行业的角度，由于现行行业标准^[83]中规定的方法往往带有极大的偶然性，因此行业缺少一个客观、科学的标准来评价显示屏颜色均匀性水平的高低。另外，论文提出的颜色均匀性校正方法，也可以通过对校正结果的评估进行进一步优化和完善。因此，需要对 LED 显示屏的颜色均匀性评估方法展开深入研究。

参考文献

- [1] 刘达、余姚明. 21 世纪的主流显示技术发展综述[J]. 电子世界, 2003, 6:4-7.
- [2] J. A. Castellano. Trends in the global CRT market[J]. SID Intl. Symp. Digest of Tech, 33:356-359.
- [3] K. I. Werner. The flat panel' s future[J]. IEEE Spectrum 30, 1993, 18-26.
- [4] 黄锡珉. 平板显示技术的发展[J]. 液晶与显示, 2002, 17(5):317-322.
- [5] J. W. Roberts, E. F. Kelley. Measurements of Static Noise in Display Images[J]. SPIE: Electronic Imaging Symposium, 2001, 4295B-27.
- [6] 李熹霖. LED 显示屏的色度均匀性和色保真度[J]. 现代显示, 2006, 6:9-15.
- [7] 李熹霖. 全彩色显示屏的白平衡和色均匀问题[J]. 2004, 2:15-18.
- [8] Barco. Uniform Luminance Technology[Z]. www.barcomedical.com.
- [9] 郭志友, 范广涵, 孙慧卿. LED 显示屏亮度和颜色的调整方法[J]. 液晶与显示, 2003, 18(4):299- 301.
- [10] 朴燕, 金福寿, 陈宇, 丁铁夫. LED 视频显示屏亮度校正的一种方法[J]. 发光学报, 1997, 18(1):68-70.
- [11] 荆其诚, 焦书兰. 色度学[M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 1983.
- [12] Maureen C. Stone. Color balancing experimental projection displays[J]. 9th IS&T/SID Color Imaging Conference, 2001.
- [13] S. Süssstrunk, R. Buckley, S. Swen. Standard RGB Color Spaces[J]. Proc. The 7th color imaging conference, Scottsdale, USA, 1999.
- [14] GB/T 3977-1977 颜色的表示方法[S].
- [15] 胡成发. 印刷色彩与色度学[M]. 北京: 印刷工业出版社, 1993.
- [16] Commission Internationale de l'Eclairage. Colorimetry, Publication CIE15[S]. 2-1986.
- [17] G. WYSZECKI, W.S. STILES. Color Science: Concepts and Methods, Qualitative Data and Formulae[M]. Second Edition. New York:John Wiley & Sons, 1982.
- [18] P.G. Herzog, B. Hill. A new approach to representation of color gamuts[J]. Proceedings of IS&T and SID' s Third Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, 1995, 78-81.
- [19] Jennifer Gille, Larry Arend and James Larimer. Display Characterization By Eye: Contrast Ratio and Discrimination Throughout the Grayscale, [J]Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging. 5292, pp.218-233, 2004.

- [20] 陈宇,丁铁夫,显示量化误差对色域转化的影响 [J]发光学报,2004,25(1):98-102.
- [21] Wyszecki.G and Stiles. W S Color Science. Wiley.New York, 1982.
- [22] Maureen C. Stone. Color balancing experimental projection displays[J]. 9th IS&T/SID Color Imaging Conference, 2001.
- [23] S. Süssstrunk, R. Buckley, S. Swen. Standard RGB Color Spaces[J]. Proc. The 7th color imaging conference, Scottsdale, USA, 1999.
- [24] C Commission Internationale de l'Eclairage. Colorimetry, Publication CIE15 [S].2-1986.
- [25] G. WYSZECKI, W.S. STILES. Color Science: Concepts and Methods, Qualitative Data and Formulae[M]. Second Edition. New York:John Wiley & Sons, 1982.
- [26] P.G. Herzog, B. Hill. A new approach to representation of color gamuts[J]. Proceedings of IS&T and SID' s Third Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, 1995, 78-81.
- [27] CIE. Industrial color difference evaluation[S].CIE Publication No. 116-1995, Central Bureau of the CIE, Vienna, 1995.
- [28] McDonald R, Smith KJ. CIE94-a new colour difference formula[J]. J. Soc. Dyers Col., 1995, 111:376-379.
- [29] Wen Senfar. Primary design of wide-color-gamut displays for matching the color gamut of objects[J]. Digest of Technical Papers - SID International Symposium, v 38, n 2, p 1057-1060, 2007.
- [30] Hsu Yu-Ju, Chien Ko-Wei, Chen Hsin-Ming. Smart portable display system with adjustable color gamut control using dual LED light sources[J]. Digest of Technical Papers - SID International Symposium, v 37, n 4, p 1492-1494, 2006.
- [31] Kim Moon-Cheol. Optically adjustable display color gamut in time-sequential displays using LED/Laser light sources[J]. Displays, v 27, n 4-5, p 137-144, November 2006.
- [32] Liu Ying, Song Gang, Li Hua. A hue-preserving Gamut expansion algorithm in CIELUV color space for wide Gamut displays[J]. Proceedings - 2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing, CISP 2010, v 5, p 2401-2404, 2010.
- [33] Chen Hung-Shing, Chen Shih-Han. Spatial gamut mapping algorithms for cross-display color reproduction[J]. Journal of the Society for Information Display, v 19, n 2, p 178-188, February 2011.
- [34] Wen Senfar. Display gamut comparison with number of discernible colors[J]. Journal of Electronic Imaging, v 15, n 4, October/December 2006.
- [35] Masaoka Kenichiro, Nishida Yukihiro, Sugawara Masayuki, Nakasu Eisuke. Design of primaries for a wide-gamut television colorimetry[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, v 56, n 4, p 452-457, December 2010.
- [36] Masaoka Kenichiro, Nishida Yukihiro, Sugawara Masayuki. Designing a

- wide-gamut system colorimetry for UHDTV[J]. IDW '09 – Proceedings of the 16th International Display Workshops, v 2, p 1237-1238, 2009.
- [37] Chen C.-C., Wu C.-Y., Lu P.-C., Chen Y.-M., Wu, T.-F.. Sequential color LED back-light driving system for LCD panels[J]. Conference Proceedings – IPEMC 2006: CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, v 1, p 117-121, 2007.
- [38] Lee C.-H., Lee E.-J., Ahn S.-C., Ha Y.-H.. Color space conversion via gamut-based color samples of printer[J]. Journal of Imaging Science and Technology, v 45, n 5, p 427-435, September/October 2001.
- [39] Chen Hung-Shing, Chang Ting-Ting. Color conversion Technology of four-primary color images developed on wide color gamut red, green, blue monitor[J]. Journal of Imaging Science and Technology, v 53, n 6, November-December 2009.
- [40] Moriya H., Murai K., Fukasawa K., Kurumisawa T., Chino, E.. A color conversion circuit of wide gamut color spaces for multi-primary color LCDs[J]. IDW '06 – Proceedings of the 13th International Display Workshops, v 3, p 1997-2000, 2006.
- [41] 刘伟奇, 冯睿, 周丰昆. 孟赛尔颜色系统与人眼主观亮度的关系[J]. 光学 精密工程, 1998, 6 (3) :31-35.
- [42] Mang, Ou-Yang, Huang, Shih-Wei. Design considerations between color gamut and brightness for multi-primary color displays[J]. IEEE/OSA Journal of Display Technology, v 3, n 1, p 71-82, March 2007.
- [43] Bert T. The gamut versus brightness trade-off in reflective displays[J]. IDW '07 – Proceedings of the 14th International Display Workshops, v 1, p 299-302, 2007.
- [44] Mang, Ou-Yang, Huang, Shih-Wei. Determination of gamut boundary description for multi-primary color displays[J]. Optics Express, v 15, n 20, p 13388-13403, October 1, 2007.
- [45] 刘娟. 颜色测量方法[J]. 印刷质量与标准化, 2008, (06).
- [46] 杨睿. 光源色度快速测量方法探讨[J]. 光机电信息, 2011, (02) .
- [47] 潘建根, 岳红轩, 沈海平, 王万良. 分光法测量 LED 颜色的不确定度分析[J]. 光电子 激光, 2008, (02).
- [48] 李宏光, 吴宝宁, 施浣芳, 袁良, 杨峰, 俞兵, 曹锋. 几种颜色测量方法的比较[J]. 应用光学, 2005, 26(3): 60~63.
- [49] 滕秀金. 颜色测量技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 2007 年 6 月.
- [50] Liang, K. Li, W., Ren H.R., Liu X.L., Wang W.J., Yang R., Han D.J.. Color measurement for RGB white LEDs in solid-state lighting using a BDJ photodetector[J]. Displays, v 30, n 3, p 107-113, July 2009.
- [51] Nussbaum Peter, Sole Aditya, Hardeberg Jon Y.. Consequences of using a

number of different color measurement instruments in a color managed printing workflow[J]. Proceedings of the Technical Association of the Graphic Arts, TAGA, p 324-346, 2009.

[52] Tominaga Shoji, Horiuchi Takahiko, Yoshimura Akihiko. Real-time color measurement using active illuminant[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, v 7528, 2010.

[53] Kosztyán Zsolt T., Eppeldauer George P., Schanda János D.. Matrix-based color measurement corrections of tristimulus colorimeters[J]. Applied Optics, v 49, n 12, p 2288-2301, April 20, 2010.

[54] Haraguchi M., Abe T., Tanase S., Inoue M., Kanayama, H.. Adaptive color conversion algorithm to achieve both high brightness and wide color gamut[J]. Digest of Technical Papers - IEEE International Conference on Consumer Electronics, 2009.

[55] Wen Senfar. Representations of relative display gamut size[J]. IEEE/OSA Journal of Display Technology, v 4, n 1, p 18-23, March 2008.

[56] Zhao Hongxia, Wang Tao. Study on conversion method of color space under a big color gamut[J]. Proceedings - 2007 International Conference on Computational Intelligence and Security, CIS 2007, p 386-390, 2007.

[57] Maeda Makoto, Arai Kazuhiro, Haraguchi Masahiro, Abe Taka-Aki, Tanase Susumu, Mashitani Ken, Inoue Masutaka, Kanayama Hideyuki. Color-Tuning projection system for adaptive combination of high brightness and wide color gamut[J]. Journal of the Society for Information Display, v 18, n 1, p 81-90, January 2010.

[58] Chen Hung-Shing, Sun Pei-Li. The design of spatial gamut mapping algorithms applying on display color correction[J]. 2009 International Display Manufacturing Conference, 3D Systems and Applications, and Asia Display, IDMC/3DSA/Asia Display 2009, 2009.

[59] Morovic Ján, Arnabat Jordi, Vilar Jordi. Visually closest cross-gamut matches between surface colors[J]. Final Program and Proceedings - IS and T/SID Color Imaging Conference, p 273-277, 2007.

[60] Zhang Xiandou, Xu Haisong. An adaptively spatial color gamut mapping algorithm[J]. Chinese Optics Letters, v 7, n 9, p 873-877, September 2009.

[61] 赵星梅. LED 显示屏亮度非均匀性逐点校正技术的研究[D]. 中国优秀硕士学位论文全文数据库, 2009.

[62] 杨城. 基于彩色相机的 LED 色度测量方法的研究[D]. 西安电子科技大学, 2010 .

[63] 李熹霖. 备受关注的 LED 显示新技术[J]. 激光与红外, 2006 年 12 月.

[64] 袁胜春, 杨城, 杨成沛. LED 显示屏逐点校正应用中几个重要问题的探讨[J]. 2010 全国 LED 显示应用技术交流暨产业发展研讨会文集, 2010.

[65] 朱超, 堵国樑. 全彩 LED 显示屏灰度校正方法研究[J]. 电子工程师, 2008 年 05 期.

- [66] 周晶晶. 基于色彩校正的 LED 显示屏逐点校正系统的设计与实现[D]. 中国优秀硕士学位论文全文数据库, 2008.
- [67] 李晓华, 童林凤, 杨晓伟, 王琦龙. 平板显示器件的参数测量及标准. 液晶与显示, 2003, 18(6):432-435.
- [68] 潘建根. LED 光色电综合性能分析测试原理与仪器. 液晶与显示, 2003, 18(2):138-140.
- [69] Feng Yongmao, Ding Tiefu. A method for OLED test. Acta Optica Sinica, 2003, 23:805-806.
- [70] 鲍超. 超高亮度 LED 测量问题. 液晶与显示, 2003, 18(4):244-250.
- [71] Commission Internationale de l'Eclairage. Measurement of LEDs. Publication CIE127-1997.
- [72] 陆荣庆. 显示屏亮度测量方法及测量仪器. 现代显示, 2004, 2:27-29.
- [73] 时大鑫, 郝喜, 段万通, 李超, 熊斌. 显示器色度测量仪器及测量方法. 现代显示, 2006, 6:16-22.
- [74] 李志东. LED 显示屏控制系统及驱动程序的研究与设计[D]. 吉林大学, 2005.
- [75] 诸昌铃. LED 显示屏系统原理及工程技术[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2000.
- [76] 应根裕, 胡文波, 丘勇等. 平板显示技术[M]. 人民邮电出版社, 2003.
- [77] 梁伟. 嵌入式 LED 全彩屏控制系统设计[D]. 中国优秀硕士学位论文全文数据库, 2009.
- [78] 徐永福, 王小超. 嵌入式技术在异步 LED 显示屏控制系统中的应用[J]. 现代显示, 2010, (05).
- [79] 郑喜凤, 丁铁夫, 邓意成, 王瑞光. 高清晰 LED 显示控制模型的探讨[J]. 现代显示, 2010, (05).
- [80] 郭宝增, 邓淳苗. 基于 FPGA 的 LED 显示屏控制系统设计[J]. 液晶与显示, 2010, (03).
- [81] 刘增环, 范慧贤. LED 显示屏系统的设计[J]. 微计算机信息, 2009, (02).
- [82] 范征宇. 基于FPGA的LED视频显示控制系统的设计[D]. 中国优秀硕士学位论文全文数据库, 2009.
- [83] 发光二极管 LED 测量方法[S]. 2008.

在学期间学术成果情况

发表文章:

1. 张鑫, 王瑞光, 陈宇, 汪洋. LED 显示屏相机采集影像渐晕的修正[J]. 光学 精密工程, 2010 年 11 月, 第 18 卷, 第 11 期, 2332-2338 页. EI 源刊.
(EI: 20105113512306)
2. Zhang Xin, Wang Rui-guang, Zheng Xi-feng. Application of image smoothing algorithm [J]. Proceedings - 2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing, CISP 2010, v 5, p 2505-2509, 2010.
(EI: 20105213529623)
3. Hao Yaru, Wang Yang, Zhang Xin, Wang Ruiguang, Chen Yu etc.. The deviation of color matching algorithm in the field of full-color LED display [J]. Proceedings of the 2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing, CISP'09, 2009.
(EI: 20100212631181)
4. 郝亚茹, 王瑞光, 陈宇, 汪洋, 张鑫等. 基于均匀颜色空间色度匹配系数量化精度分析[J]. 半导体光电, 2009 年 10 月, 第 30 卷, 第 5 期, 778-784 页.
5. 郑喜凤, 宋新丽, 刘贵华, 张鑫, 郝亚茹. 一种基于区域最大值的 LED 显示屏亮度特征数据提取方法[J]. 液晶与显示, 2008 年 8 月, 第 23 卷, 第 4 期, 453-457 页.
6. 王瑞光, 张鑫, 宋新丽. LED 显示屏色度漂移特性的研究[J]. 2008 全国 LED 显示应用技术交流暨产业发展研讨会文集, 2008 年 4 月.
7. 陈宇, 张鑫, 郑喜凤, 郝亚茹. 量化误差对显示函数精度的影响[J]. 2008 全国 LED 显示应用技术交流暨产业发展研讨会文集, 2008 年 4 月.
8. 宋新丽, 张鑫. LED 显示屏色品随电流变化关系研究[J]. 2008 全国 LED 显示应用技术交流暨产业发展研讨会文集, 2008 年 4 月.

指导教师及作者简介

指导教师简介

王瑞光(1957-): 男, 吉林松原人, 研究员, 博士生导师, 目前为中国科学院长春光机所控股的长春希达信息技术有限公司总经理, 主持民用和军用工程项目多项, 其中有 9 项成果获科技进步奖, 3 项成果产品化后获国际性展会大奖, 共发表学术论文近 50 篇, 培养博士硕士研究生 18 名, 获得过 24 项国家专利, 其中两项获中国优秀专利奖。主要研究方向: 大屏幕平板显示技术、计算机应用和数据通信。

作者简介

张 鑫(1984-): 男, 山东潍坊人, 汉族, 中国共产党党员, 2002~2006年就读于吉林大学生物医学工程专业, 获工学学士学位; 2006年9月进入长春光机所, 并于2008年通过硕博连读考核, 攻读电路与系统专业博士研究生。主要研究方向: 大屏幕平板显示技术。

致 谢

首先，衷心感谢我的导师王瑞光研究员，王老师对科学技术具有深刻的理解及深邃的洞察力，他治学科研有法有章、思维敏捷而清晰，对问题的创见和解决富有直觉性而又极具指导性。导师孜孜不倦的工作精神，严谨求实的工作作风，不断创新探索精神都使我终身难忘。

衷心感谢我的指导老师陈宇研究员！陈老师广博的知识以及缜密的思维都给我留下深刻印象。

衷心感谢希达公司总工程师丁铁夫研究员和副总经理郑喜凤研究员！感谢他们在科研与生活各方面的帮助以及对学生热情而无私地鼓励与指导。

衷心感谢所在研究室希达公司提供的科研环境！感谢希达公司各位领导与老师细致而又耐心的关怀与帮助。

衷心感谢研究生部的各位老师在学习和生活上的关心与指导！

衷心感谢各位师兄、师姐、师弟、师妹给我的生活增添了快乐。

衷心感谢所有关心、帮助和支持我的人们！

张鑫
2011-3-26