

处理而无法确定该像素点的位置,本算法对图 4.6(a)分别求水平和垂直卷积投影,如图 4.6(b), (c)所示。并以投影中谷值中心所在的行或列交叉分割成矩形区域,以确定最大值点坐标位置。这样既准确又不会丢失部分较暗的有效像素。最大值坐标位置为一个  $M \times N$  的矩阵,与 LED 有效像素点一一对应。LED 像素亮度特征数据的确定是以这些坐标值为中心,在原图像中以  $f(i, j)P \times Q$  为模板进行垂直或水平方向上的模板卷积运算,得到与 LED 像素一一对应的灰度值数据表。接下来进行误差修正(下一节将详细说明),最后对整屏灰度值数据归一化到 0-255 如表 1 所示。这些新的灰度值代表了 LED 像素点的相对亮度信息。原图第 18 列第 8 行的 LED 像素是一个不亮点,因此在亮度提取过程中把该像素点亮度值置零。虽然这点在 CCD 感光区域中的灰度值并不为零,在后期数据分析中,对于亮度值过小的点我们可以视其为无效点并通过设置适当的阈值排除掉。表 4.1 表示了对图 4.3 进行 LED 像素亮度提取并归一化到 0-255 的亮度值。LED 像素亮度提取按照公式 4-1 进行,然后按照公式 4-6 进行归一化处理。

$$p'_{mn} = \frac{p_{mn}}{p_{\max}} \times 255 \quad (4-6)$$

表 4.1 LED 像素相对亮度数据

211	228	228	228	218	225	224	223	221	208	220	214	220	206	200	200	206	205	206	207	206	198	199	197	193	191	192	193	198	192	191	181
217	234	234	225	237	227	234	226	218	232	223	230	230	207	224	210	215	223	208	207	208	206	215	207	218	193	194	193	199	185	192	175
241	243	243	236	247	233	247	232	233	238	231	237	244	228	236	231	224	232	223	233	231	216	230	211	224	222	202	222	215	214	220	190
196	219	225	210	225	204	234	209	208	223	213	212	205	196	222	204	205	205	195	205	210	195	191	189	195	189	175	180	186	169	169	168
212	228	226	217	231	225	232	230	215	228	212	221	226	203	227	210	218	225	195	225	210	209	220	202	210	219	188	217	202	192	199	183
211	233	218	224	233	223	223	229	226	218	234	219	217	203	211	217	218	209	209	201	208	217	203	197	204	204	204	201	193	200	198	189
210	235	235	224	234	223	232	223	222	229	206	219	220	204	219	211	224	217	210	224	208	216	204	196	216	202	202	196	199	199	197	181
225	225	239	233	230	231	222	222	223	229	213	221	234	211	226	209	218	①	203	226	216	217	218	199	217	203	196	217	194	194	196	174
218	234	226	232	232	215	229	221	220	220	205	218	218	211	203	209	215	215	209	207	215	210	194	202	202	203	194	201	201	191	180	
211	234	225	227	231	216	230	228	213	229	219	227	227	218	227	203	224	217	218	226	202	215	210	204	217	200	201	203	193	199	189	180
227	255	242	240	245	238	235	243	237	235	226	227	225	226	224	223	223	223	223	231	214	223	217	218	224	208	217	223	199	221	204	195
213	229	214	214	225	210	219	204	203	208	195	216	201	202	208	185	213	191	191	196	183	197	199	190	196	182	196	195	187	189	179	169
219	235	226	234	233	231	213	220	219	219	227	209	226	208	214	200	207	204	199	219	205	206	205	206	220	203	203	218	187	216	194	190
218	238	220	234	232	224	228	212	243	235	219	223	215	215	208	207	215	211	212	205	197	203	204	204	195	224	203	218	194	194	200	192
235	227	220	226	225	215	229	211	236	239	211	224	216	200	209	199	222	204	205	221	197	220	197	203	228	194	210	217	203	209	195	190
226	233	216	223	221	215	202	201	228	204	224	198	205	206	206	198	198	204	204	203	196	204	203	201	227	201	210	208	207	224	178	182

#### 4.3.4 效果分析

实践证明,通过本算法提取的 LED 像素亮度特征数据与人对显示屏本身以及感光图像观察的效果是一致的。这些数据虽然与亮度计等光学测量仪器测的数据不能严格对等,但是由于光谱辐射通量和 CCD 注入电荷量呈线性关系<sup>[29]</sup>,从图像评估的角度讲,我们关心的是整屏像素点之间的亮度差异,从提取的数据可以看到,其相对亮度值和人视觉观察到结果基本一致,所以这种算法所得的数据可以用来作为评价屏幕亮度一致性的依据。虽然本算法能处理部分几何

失真图像（如梯形图像），但对于几何失真过于严重的图像（如扭曲图像）本算法也有一定的局限性。从实际情况考虑，几何失真也会伴随亮度信息失真，所以本课题对这种图像研究的意义并不大。正是由于从感光图像中得到的亮度信息量大，快速准确等特点，所以通过对 CCD 感光图像的分析对 LED 显示屏亮度一致性进行评价将成为一种非常有效的方法。

## 4.4 误差分析

在利用 CCD 相机对 LED 亮度采集的过程中，难免会出现一些误差，这些误差包括测量量具误差，如光圈调整前后拍照误差；仪器误差，如相机镜头进光量的不均匀性等；环境误差，如每次测量的暗室照度环境，温度、湿度等；人为误差，如拍照时镜头未与 LED 显示屏法向平行等；方法误差，如在亮度提取过程中的算法优劣等。通常误差分为三类：系统误差，随机误差和粗大误差。系统误差是指在同一条件下，多次测量同一量值时，绝对值和符号保持不变，或在条件改变时，按一定规律变化的误差；随机误差是指在同一测量条件下，多次测量同一量值时，绝对值和符号以不可预知方式变化着的误差；粗大误差是指超出在规定条件下预期的误差。本文针对在 LED 亮度采集和提取的过程中遇到的对结果影响比较大的误差进行分析。

### 4.4.1 图像采集方式误差

这里所说的图像采集误差主要是在用 CCD 相机进行 LED 亮度采集时可能出现的人为操作误差，如相机和 LED 显示屏的位置关系。这主要是由于 LED 显示屏发光的特殊性所决定的，LED 显示屏是由 RGB 三基色 LED 灯组成基本像素自发光型显示屏，而且具有离散性和高亮度性等特点。LED 灯的光强分布沿光轴方向最强，沿四周向边缘处逐渐减弱。下面主要对 LED 视角与亮度关系分析确定亮度采集的最佳位置。

1. 视角与亮度关系研究。LED 显示屏亮度指其在法线方向的平均亮度。它主要取决于 LED 发光强度和 LED 点密度。在同等点密度下，LED 显示屏的发光强度取决于所采用的 LED 晶片的材质、封装形式和尺寸大小。视角指在水平和垂直两个方向的亮度分别为 LED 显示屏法线方向亮度的一半时，该观察方向与 LED 显示屏法线的夹角分别称为水平视角和垂直视角，一般以 $\pm$ 表示左右和上下各多少度<sup>[30]</sup>。

在视角观看范围内能使所有观众享受到最佳的观看效果。超出此范围，观众将可看到低于正常亮度 50% 的视觉效果，这将使画面质量大大降低。LED 显示屏的视角越大，其覆盖面积越广，反之越小。LED 晶片的封装方式决定 LED 显示屏的视角的大小，本文以椭圆形  $\phi 5$ LED 单管 RGB 三基色和以其为基本像素点 P16 LED 室外屏为研究对象，在测试 LED 显示屏视角与亮度分布关系的基础上，分析了视角对亮度均匀性的影响，并对 LED 亮度测试方法提出了一些建议。

2. 单管 LED 光强角测试与分析。LED 封装时所采用的出光面形状和 LED 芯片距顶部透镜的位置决定了 LED 视角和光强分布。一般来说相同的 LED 视角越大，最大发光强度越小，但在整个立体半球面上累计的光通量不变<sup>[31]</sup>。

理论上，点光源光强在空间各方向上均匀分布，但椭圆形  $\phi 5$ LED 管发光面

形状为扁椭球形，即发光面在水平方向上较宽在垂直方向上较窄，因此，在水平和垂直方向上该管的视角是不同的。本文随机抽取椭圆形 $\phi 5$ LED管 RGB 三基色各 5 支，用光强仪对其进行光强分布测试，其光强分布基本一致。取水平方向 $\pm 55$ 度，垂直方向 $\pm 30$ 度有代表性的 RGB 三基色管子的测试结果如图 4.7、4.8 所示。在原始亮度条件下，绿管的法线方向光强最强，红管次之，蓝管最弱；在视角范围内，红绿色管子光强变化比较明显，蓝色光强变化比较缓慢；水平视角明显大于垂直视角。表 4.2、4.3 列出了测试结果中 RGB 三基色光强分布的几项关键性能指标，其中在光强降低为法向光强的 95% 时对应的水平角度约为 R: 11 度，G: 26 度，B: 23 度，垂直角度约为 R: 6 度，G: 11 度，B: 12 度；水平视角约为 R: 100 度，G: 106 度，B: 96 度，垂直视角约为 R: 50 度，G: 48 度，B: 44 度。

表 4.2 水平单管亮度角

	最大亮度值 (mcd)	95%亮度角	视角半亮度角
R	1279	-5~6	-51~49
G	2214	-11~15	-53~+53
B	607	-8~15	-46~50

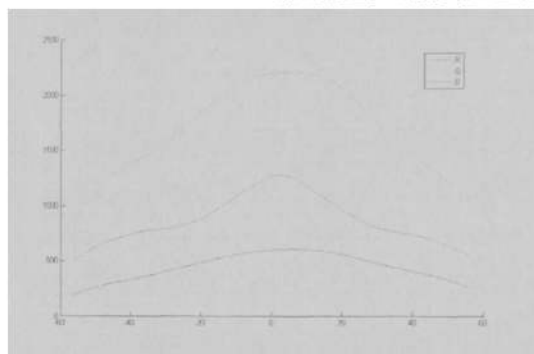


图 4.7 单管水平亮度角分布曲线

表 4.3 垂直单管亮度角

	最大亮度值 (mcd)	95%亮度角	95%亮度角	视角半亮度角
R	1293	-3~3	-3~3	-25~+25
G	2211	-6~5	-6~5	-25~+23
B	602	-7~5	-7~5	-23~+21

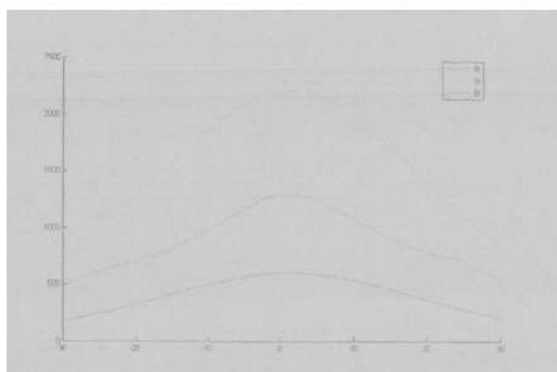


图 4.8 单管垂直亮度角分布曲线

3. LED 显示单元箱体光强角测试与分析。由于 CCD 成像的灰度值与测试对象的亮度成线性关系，所以利用 CCD 传感器获取 LED 显示屏像素的亮度信息是可靠的。本文对 P16 LED 室外屏箱体亮度信息的获取就是利用单色 CCD 传感器。在不同的电流和灰度控制下由 CCD 传感器获得的 LED 显示屏箱体模组的亮度信息是相对值。取 RGB 每种基色箱体各像素亮度均值为研究对象，通过转台在水平方向上左右各转动 55 度，保持箱体正面朝前侧转 90 度使其垂直放置于转台，在垂直方向上，由于像素点受面罩的影响，只能右转 30 度进行测试，转动间隔均为 5 度。本文共测试了 9 个箱体，并对每个箱体在各角度上的对应亮度信息求均值，所得结果如图 4.9、4.10 所示。表 4.4、4.5 列出了测试结果中 RGB 三基色亮度分布的几项关键性能指标，其中在亮度降低为法向亮度的 95% 时对应的水平角度约为 R: 8 度，G: 22 度，B: 22 度，垂直半角度约为 R: 2 度，G: 2 度，B: 3 度；水平视角约为 R: 98 度，G: 102 度，B: 100 度，垂直半视角约为 R: 23 度，G: 17 度，B: 19 度。

表 4.4 单元箱体水平亮度角

	最大亮度值	95%亮度角	视角半亮度角
R	2408	-4~4	-47~+51
G	2006	-10~12	-47~+55
B	1446	-12~10	-52~+48

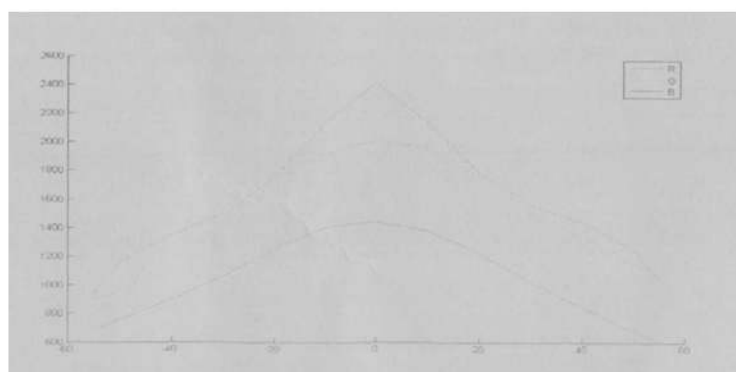


图 4.9 箱体水平亮度角分布曲线

表 4.5 单元箱体垂直亮度角

	最大亮度值	95%亮度角	视角半亮度角
R	2355	~2	~+23
G	2018	~2	~+17
B	1464	~3	~+19

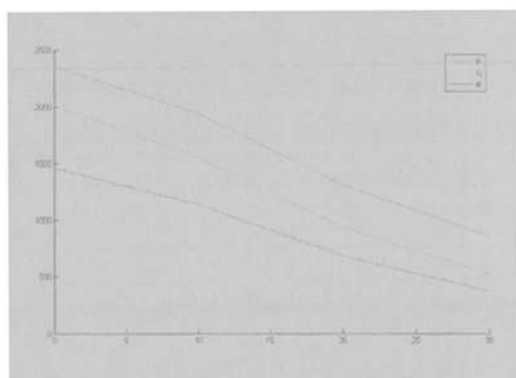


图 4.10 箱体垂直亮度角分布曲线

4. 影响 LED 显示屏视角变化及亮度不均匀性原因分析。与单管视角亮度关系相比,箱体的视角总体上有所减小。这主要是受 LED 管各项性能参数的不一致影响外,还有 LED 管的封装形式、模块组装平整度、PCB 板的设计等因素的影响。比如,LED 管的排列不能达到完全的一致,灌胶的深浅不一致,模块组装时微小的移位等。这使得 LED 显示屏的视角大小受到影响,进而影响到显示屏的均匀性。由 LED 管各项性能参数引起的亮度不一致属于 LED 管的质量问题,LED 显示屏生产者只能通过筛选一致性较好的办法提高显示屏质量。对于由封装工艺和电路设计等造成的不一致现象可通过后期矫正的方法加以改善。

通过以上分析可以发现,观察角对 LED 显示屏的亮度均匀性存在较大影响,LED 显示屏亮度信息的获取和评估中也需要注意角度的问题。《LED 显示屏测试方法》中给出的评估标准中,显示屏无可觉察的亮度差,相邻像素(模块)亮度差小于 5%,在上述测试数据中,单管光强降低 5%的水平角度约为 R: 11 度, G: 26 度, B: 23 度,垂直角度约为 R: 6 度, G: 11 度, B: 12 度。即对单管来说在水平  $R \leq \pm 5.5$  度,  $G \leq \pm 13$  度,  $B \leq \pm 11.5$  度,垂直  $R \leq \pm 3$  度,  $G \leq \pm 5.5$ ,  $\leq \pm 6$  度范围内观察和采集数据可以减小由于数据采集带来的亮度误差。同理,对于箱体来讲,水平  $R \leq \pm 4$  度,  $G \leq \pm 11$  度,  $B \leq \pm 11$  度,垂直  $R \leq \pm 2$  度,  $G \leq \pm 2$  度,  $B \leq \pm 3$  度范围内观察和采集数据才不会使亮度均匀性受到影响。因此,在用 CCD 相机对该种类型的室外 LED 显示屏进行远距离亮度数据采集时,镜头与 LED 显示屏的水平边界的夹角最好在 5 度范围内,与垂直边界的夹角最好在 2 度范围内,这样可以尽可能避免由采集方式引起的亮度误差,在对 LED 显示屏进行亮度均匀性评估时,使所采集到的亮度信息尽可能接近实际亮度分布情况。

### 4.4.2 相机系统误差

CCD 相机系统误差不仅可能由光学镜头的畸变与机械误差引起,还可能有视频信号的“模/数转换”产生,分别称为光学误差、机械误差和电学误差<sup>[32,33]</sup>。

1. 光学误差。也叫光学畸变差,是指相机物镜系统设计、制作和装配误差所引起像点偏离其正确成像位置的点位误差。光学畸变差包括径向畸变差和离心畸变差两类。径向畸变差使构像点沿径向方向偏离其准确位置;而离心畸变差是由于镜头光学中心和几何中心不一致引起的误差,它使构像点沿径向方向和垂直于径向方向都偏离其正确位置。

2. 机械误差。在光学镜头摄取的影像转化到数字化阵列影像这一步产生的误差。这项误差又是由以下两个因素引起:一是扫描阵列不平行于光学影像,致使数字化影像相对于光学影像有旋转;一是每个阵列元素尺寸不同产生不均匀变形。

3. 电学误差。主要包括行同步误差、场同步误差与采样误差。行同步误差是指视频信号转换时,影像每行开头处的同步信号产生的错位现象。场同步误差是指影像奇数行与偶数行间的错位。采样误差是指由于时钟频率不稳引起的采样间隔误差。因此光学误差、机械误差和电学误差三方面构成了数字相机的误差。

这些误差虽然不可以消除,但可以通过实验分析找出规律并加以校正。本文采用一款单色 CCD 相机。在实际测试中,对于采集到的 LED 亮度信息的分析发现,亮度的分布并不是沿一个平面上下随机的分布,而是沿一个几乎固定形状的曲面上下随机分布。图 4.11 显示了一  $48 \times 32$  的 LED 显示屏模块亮度分布情况,图中的黄绿色代表较亮的区域,蓝色代表亮度较低的区域。因此 LED 模块左边的亮度高于右边的亮度,屏幕上边的亮度也高于下边的亮度。因而这未能真正反映 LED 显示屏的实际亮度对人眼视觉效果。

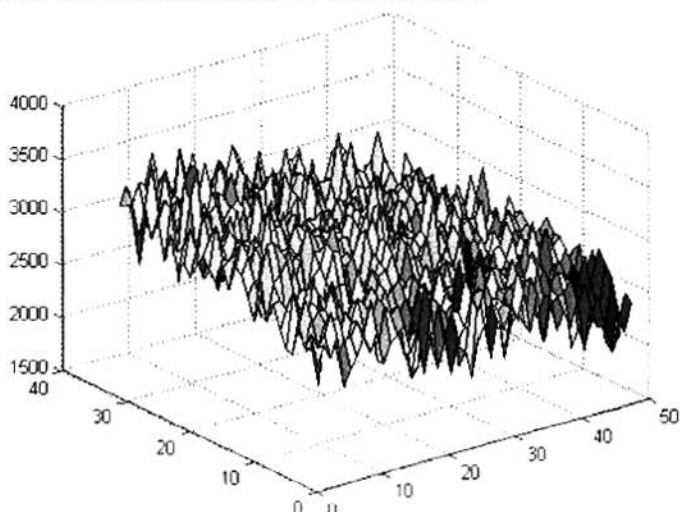


图 4.11 LED 模块亮度分布

对相机误差的判断不能只局限于单点或单行、列之间的亮度差异,而应该

从总体上的统计规律并加以分析。图 4.12(a)、(b)是对亮度值表分别求行、列均值后生成的图形。列向亮度均值从左到右逐渐下降，而且有一定的弧度，亮度均值最大为 3252（这里的亮度为由 CCD 相机获取并提取的相对亮度值，因此没有计量单位），最小为 2509，亮度对比度用式 4-7 计算可得  $Lum\_py=13.0\%$ ；行向亮度均值从上到下亮度逐渐增强，亮度均值最大为 3224，最小为 2613，亮度对比度为  $Lum\_px=10.5\%$ ，整个 LED 显示屏模块的亮度对比度为  $Lum\_p=32.5\%$ 。从图 4.11 也可以看出，坐标 (32, 0) 附近亮度最高，坐标 (0, 48) 附近亮度最低，因此所得的亮度值表呈现左下角最亮，右上角最暗，但是 LED 显示屏实际亮度情况并非如此。

$$Lum\_p = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \times 100\% \quad (4-7)$$

式(4-7)中  $Lum\_p$  代表亮度差异比， $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$  分别代表亮度最大值和最小值。

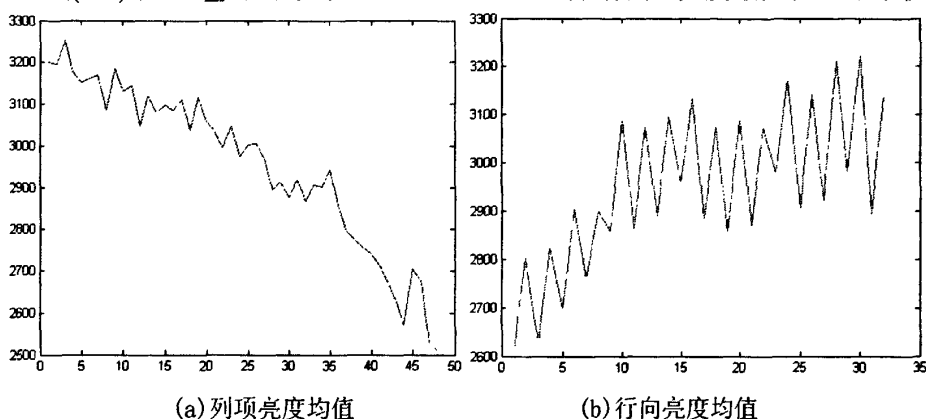


图 4.12 原始亮度均值

针对上述问题，本文采用中心亮度补偿算法对初次提取的亮度值进行误差修正。该方法认为 CCD 相机镜头中心处的成像最接近并反映屏幕的真实亮度值，因此在采集 LED 亮度图像时尽可能使其在镜头中心处成像，然后以中心值为参照，将其它区域的亮度值进行按比例修正，得到新的亮度值表。具体实施方式如下：

- 1) 分别对亮度值表求列、行向均值  $Y\_mean$ 、 $X\_mean$ ；
- 2) 取列、行向均值的中心 10%区域的亮度值的均值  $CY\_mean$ 、 $CX\_mean$  作为参照标准亮度值；

$$3) \text{ 然后按照式 } f_j(i, j) = \frac{CY\_mean}{Y\_mean(j)} \times f(i, j),$$

$$f_i(i, j) = \frac{CX\_mean}{X\_mean(i)} \times f(i, j) \text{ 进行整屏亮度误差修正。}$$

对亮度值表修正的结果如图 4.13 所示。从该图的颜色及数值分布上看，整体亮度分布比较“均匀”，不再有左亮右暗及曲面现象。也比较接近人眼对显示模块的视觉效果。

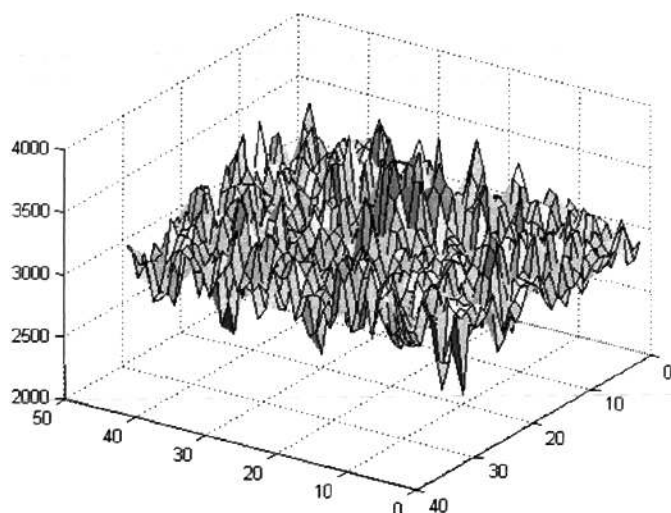


图 4.13 误差修正后的亮度值

误差修正后的亮度基本以平面为中心上下随机分布，虽然亮度数据仍然上下浮动，其整屏亮度对比度  $Lum\_pf=24.0\%$ ，这说明该模块内部亮度差异较大，这是显示屏本身的亮度不均匀性造成的。它与用亮度计测得的 LED 显示屏亮度信息比较一致。需要说明的是，对于 CCD 相机的误差的标定，目前还不能用很科学、精密仪器实施。但这种在实践中总结出的方法还是有一定的可行性，尤其是在严格规定了亮度采集的方法之后，同等条件下所采集到的亮度信息，在亮度均匀性评估过程中具有一定的可比性，因此不再追究其绝对值的准确性。

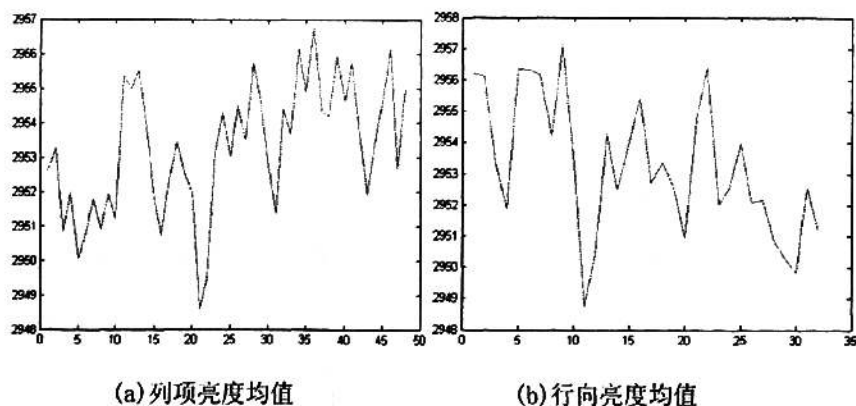


图 4.14 误差修正后亮度均值



## 第五章 亮度均匀性评估

本章首先介绍了HVS（人类视觉系统）系统特征<sup>[18]</sup>，分析了HVS系统在数字图像质量评估中需注意的问题以及LED显示屏亮度均匀性评估中的作用。基于CCD图像的LED显示屏亮度均匀性评估，实际上是对图像中对应的LED像素亮度数据的一致性的评估。本章针对LED显示屏相对亮度信息提出了亮度不均匀性的表现。误差敏感度方法在图像质量评价中虽然应用比较广泛，但也有其局限性。本文在已有的LED显示屏亮度均匀性评估方法的基础上提出了新的评估算法。基于灰度直方图的亮度均匀性评估算法，是对整屏亮度集中程度的一种评估方法，虽然比较方便有效，但是没考虑亮度分布的结构性以及人眼的适应性对亮度评估结果的影响。因此，在此基础上，本文又提出了基于结构相似性的LED显示屏亮度均匀性评估方法，该方法综合考虑了亮度集中程度、亮度分布的结构、以及亮度对比度信息，并以加权求和的方式得出最终评价结果。实践证明该方法与人眼的视觉系统观察效果比较一致性。

### 5.1 HVS 特征分析

一段时间以来，对于人眼的视觉特性，人们进行了大量的长期的研究，但是，由于人眼结构的复杂性和人的主观因素等，这项研究的进展并未达到理想的程度。到目前为止，人们结合视觉生理学、心理学等多门交叉学科的研究，发现HVS有很多特点，主要表现为各种视觉掩盖效应。这些特性直接或间接地影响着人们对LED亮度信息进行处理和质量评价。例如：如果我们在LED亮度均匀性评价过程中，考虑到HVS的特性，会使客观评价价值更符合LED显示屏的视觉质量。

#### 5.1.1 对比度的定义

对比度的基本定义有两种，一种是Weber—Fechner定义的，称为Weber—对比度，另一种是Michelson定义的，称为Michelson—对比度<sup>[31-36]</sup>，分述如下：

人眼视觉系统的响应更主要地依赖相对于背景亮度的局部变化，而不是绝对亮度值，因此对比度就是这种亮度相对变化的测量，其数学表述为：

$$L_w = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{称为 Weber-对比度} \quad (5-1)$$

其中 $\Delta L$ 为目标与背景的亮度差值， $L$ 为背景亮度值。由于视觉的适应性，在大约2-1096cd/m<sup>2</sup>，的亮度范围内，人眼刚能分辨的亮度差异(JND: Just Notice Difference)所对应的门限对比度值为一常数。也是最低的分辨阈值，当背景亮度较强或较弱时，人眼的对比灵敏度阈值都会增大，分辨亮度差异的能力下降，而Weber—对比度基本控制在该常数范围之内。

Michelson认为，实际的图像视觉效果很大程度上依赖于激励的特征，最主要的是颜色(对彩色而言)、空间频率、时间频率(对视频而言)，通常用对比

度灵敏度函数(CSF: Contrast Sensity Function)来量化这种依赖关系,在CSF的测量中,认为激励是随着频率而周期变化的,通常是正弦周期的,这种意义下的对比度定义为:

$$L_m = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \quad \text{称为 Michelson—对比度} \quad (5-2)$$

其中  $L_{\max}$ 、 $L_{\min}$  分别为目标的最大最小亮度。用这两种定义式直接计算对比度是很困难的,实际计算都用反映其属性的数学模型来代替。

### 5.1.2 对比灵敏度

对比灵敏度是指人眼分辨亮度差异的能力。我们定义人眼主观上刚刚可辨别的亮度差异时所需要的最小光的强度差值  $\Delta L$  为亮度的辨别阈值。也就是说,当激励光的强度  $L$  增大时,人眼开始感觉不出其变化,直到  $L$  增加到  $L + \Delta L$  时,人眼才会感觉到亮度的变化。因此对比灵敏度因数为  $\Delta L/L$ , 其大小与背景亮度  $L$  和环境亮度  $L_0$  有关,图 5.1 和图 5.2 分别为  $L=L_0$  和  $L \neq L_0$  情况下测出的对比灵敏度因数曲线图<sup>[37]</sup>。

使观测者处于亮度为  $L$  的均匀光场中,中部有一个具有鲜明边界的圆形靶,其亮度为  $L + \Delta L$ , 如图 5.1 左图所示。 $\Delta L$  由零值一直升到刚好被觉察到的值为止。这个刚能觉察到的亮度差值  $\Delta L$  是作为  $L$  的函数而被测量的。 $\Delta L/L$  称为韦伯比,在非常宽的亮度范围内,它近似为一常数,约为 0.02, 如图 5.1 右图所示。这一现象导致下述看法:即人眼具有比人造图像系统宽得多的动态范围。

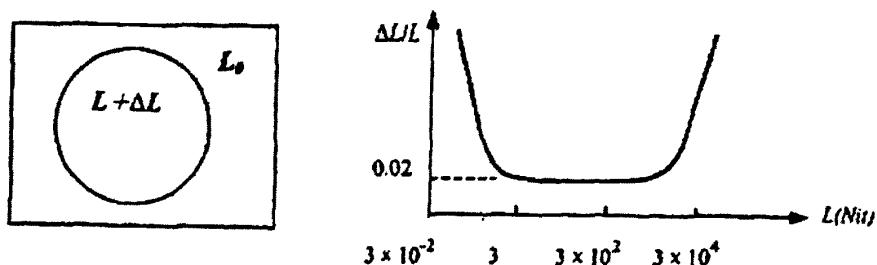
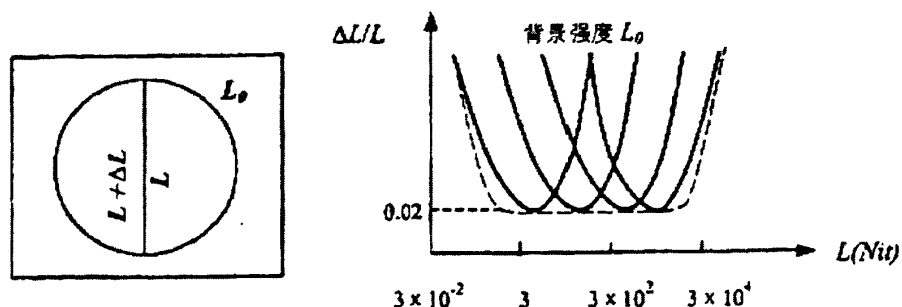


图 5.1  $L = L_0$  时对比灵敏度因数曲线图

人眼的对比灵敏度阈值  $\Delta L/L$  与周围环境亮度有很大的关系。在亮度为  $L_0$  的背景上放置一个圆形目标,其一半亮度为  $L + \Delta L$ , 另一半亮度为  $L$ , 如图 5.2 左图所示。测出的韦伯比如图 5.2 右图所示。可以看出  $\Delta L/L$  不仅是  $L$  的函数,也是  $L_0$  的函数,韦伯比保持常数的范围大大减少了,表明人眼的亮度分辨能力降低了许多。当环境亮度变化时,上述的  $\Delta L/L$  关系曲线平移。且曲线族的包络线就是图 5.2 右图中的曲线。由测得的对比灵敏度看出,  $\Delta L/L$  的动态范围大约是以  $L_0$  为中心的 2.2 个对数亮度单位,比  $\Delta L$  高或低 1.5 个对数亮度单位,将使人眼产生最白和最黑的感觉。

图 5.2  $L \neq L_0$  时对比灵敏度因数曲线图

在复杂观察对象的情况下,视觉系统不会适应单一光强度级。相反,它适应于平均光强度级。当眼睛在景物周围徘徊时,瞬时适应能力围绕其平均值上下波动。在图像中任何一点或小面积上,韦伯比一般要比在实验环境中得到的值要大得多,这是因为背景缺乏鲜明限制边界和强度变化。因为眼睛的适应能力需要变化,以便当眼睛沿着景物移动时,适应不同的光强度级。

由以上分析可知,人类视觉系统在较低灰度级和较高灰度级的韦伯比都比较大,说明在这两种情况下对亮度的对比灵敏度较高。视频信号是为满足电视机的发光特性和电特性而设计的,它可以在电视上或显示器上播放。如果对电视信号不作校正,就会产生严重的色彩失真。因此我们对输入的视频信号前端须进行非线性  $\gamma$  校正,校正后的色度空间会有明显改善。对应于 LED 大屏幕,物理亮度与灰度值成正比,如不作校正,明显不能满足色彩还原的要求,具体在显示效果上就是:低级灰度跳变很大,而高级灰度又分不清楚。人眼对光强的感受是非线性的,弱光时,光强增加一倍,人眼感觉到的增强多于一倍;强光时,光强增加一倍,人眼感觉到的增强不足一倍,因此需要把灰度做非线性变换,使低灰度时时间距小,高灰度时时间距大。所以为保证 LED 大屏幕色彩完整还原,必须进行反  $\gamma$  校正,经过校正以后,使它的特性与 CRT 相近。我们可以明显看出,经灰度校正后的显示画面会显得纹理清晰,层次感强,亮度柔和,明暗过渡平缓。

目前,全彩色 LED 显示屏一般都采用红、绿、蓝三基色每个像素点由 8 位数据控制,通过时域分割处理,形成每种基色各 256 级灰度信息。三基色 LED 显示屏能产生 16777216 种色彩,达到真彩色。使显示效果更加清晰、层次感更强,动画效果更流畅,完全达到专业级图像水平。应用先进的硬件反  $\gamma$  校正技术。根据户内、户外 LED 的亮度曲线,采用不同的函数关系式,对每个像素点每种颜色 8 位数据进行反  $\gamma$  校正,使屏上显示出来的色彩亮度更逼真、更接近自然。

### 5.1.3 客观亮度与主观亮度感觉

人们经过大量的研究表明:对于被观察物体的绝对亮度,人眼的判断能力比较弱,而对于被观察物体的相对亮度差异,人眼的判断能力却比较大。而人眼的主观亮度感觉正是与人眼对亮度差异的感觉而获得的。如果我们设  $L$  为物体的客观亮度,  $S$  为物体的主观亮度,的主观亮度感觉,  $\Delta S$  为人眼对亮度差异的

主观感觉, 则:

$$\Delta S = K \frac{\Delta L}{L} \quad (5-3)$$

上式两边分别对  $S$  和  $L$  求积分, 得:

$$S = K \ln L + K_0 \quad (5-4)$$

令  $K' = K \ln 10$ , 上式变换为:

$$S = K' \log L + K_0 \quad (5-5)$$

其中  $K$ ,  $K_0$  和  $K'$  为常数。上式告诉我们: 在正常视觉的宽阔亮度范围内, 人眼的主观亮度感觉与客观亮度的对数成线性关系<sup>[39]</sup>。

### 5.1.4 误差敏感度方法在亮度均匀性评估中的局限性

误差敏感度方法的根本原则是: 通过量化误差的可见性, 人们可以对感知对象质量进行较好的估计。可以根据生理和心理学知识, 通过模拟 HVS 的特性来达到这个目的。尽管这种对于问题自下而上的处理方法几乎被广泛地接受, 但了解它所存在的局限性也是必要的。特别地, HVS 是一个复杂的非线性系统, 但早期的大多数模型都是建立在线性或类似线性处理基础上的。因此, 误差敏感方法必须依靠许多假设前提条件, 总结起来大概有以下几点:

1. 阈值问题。引起许多误差敏感模型的精神心理实验被用来估计刚刚被觉察的阈值问题。这些阈值测量值常用来定义视觉误差敏感度量, 如 CSF。然而, 很少有精神心理研究表明这样一个邻阈值模型是否能普遍用来作为比阈值较大的感知失真。在阈值范围内, 通过可见度阈值, 不同频带间的相关视觉失真能被标准化吗? 最近一些学者力图从心理物理学阈值上来分析图像失真问题<sup>[39, 10]</sup>。

2. 认知的相互作用问题。众所周知, 认知理解和相互作用的视觉处理(如眼睛转动)会影响图像的感知质量。例如, 一个观察者根据不同的指令, 即使是对同一幅图像进行观察, 也可能出现不同的评价结果。有关观察对象内容先验知识、对某些内容的特别关注也可能影响其对亮度均匀性的评价结果<sup>[41]</sup>。但是, 对大多数观察对象质量度量并未考虑这些影响, 因为这些很难被量化和理解。

3. 其他问题。除了以上问题外, 还有一些实际的局限性: 强烈的数据相关性需通过细致的精神心理学实验得到, 对于观察条件如视觉距离, 周围亮度, 屏幕分辨率, 屏幕型号和亮度设置, 还需要 HVS 定标, 这些问题限制了该方法的实际操作。

## 5.2 LED 显示屏亮度不均匀性描述

各种显示系统的不均匀性的缺陷一般表现为: 在显示系统均匀与连续的输入信号时, 任何可见空间的不均匀性(亮度、色度不均匀或二者的结合)。如 CRT 显示屏的不均匀通常表现为中间区域较亮边角区域较暗; LCD 显示屏的不均匀通常表现为靠近背光源区域较亮, 远离背光源区域较暗; LED 显示屏的不均匀

匀则表现为屏幕上出现的“马赛克”，“麻点”或模块间的亮度差异等现象。这些不均匀现象会严重影响屏幕的显示效果。其中，亮度不均匀性对显示屏质量的影响起着决定性因素。

亮度均匀性是指在显示各像素灰度值相等的图像时，理论上各显示像素的亮度也是一致的。但在实际中很难实现这样的效果。图 5.3 为  $48 \times 32$  的蓝基色 LED 显示屏模块相对亮度的三维柱形图。该图表面的参差不齐代表了 LED 像素亮度的不均匀性。根据上一节的分析，当相邻像素的亮度差值大于某一阈值，将会使人产生视觉不一致。因此，对于 LED 显示屏，尤其是在进行亮度校正前的显示屏其亮度不一致性非常严重。

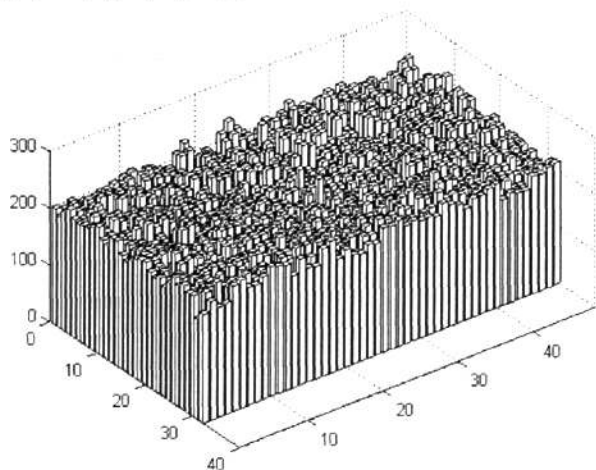


图 5.3 LED 模块亮度三维柱形图

本文通过 CCD 相机采集 LED 显示屏亮度信息，首先解决了快速获取 LED 亮度信息的问题。但对显示屏亮度均匀性的评价是接下来需要讨论的问题。

### 5.3 现有 LED 显示屏亮度均匀性评估方法

目前，在 LED 显示屏的开发和生产的各阶段，视觉检测仍然是评估显示屏亮度和色彩均匀度的标准。这种评估方法的主要问题是其主观性，即每个人观察和解释事物是不同的。而且即使是同一个人测量，也会在不同时间得到不同的结果。目前，市场上卖方与客户主要依赖于非定量的术语来定义缺陷，如“暗点”、“瑕疵”、“残点”、“坏点”等<sup>[42-44]</sup>。

而对于 LED 显示屏比较客观的评估主要是依赖于人的视觉与单点式光色测试仪器，亮度计。用于检测显示设备光学性能的时候，一般首先要抽取少数的测试样点或区域，亮度计只测试这些样点或区域及其关联像素或区域的光学性能，而且一次只能测到一个样点或区域的数据，每测量一次一般都需要移动仪器并且重新对焦。这样，用传统的测试方法不但耗时费力，而且要测量全屏像素的性能是比较随机和片面的。

### 5.3.1 九点测试法

显示领域最常用的测试评估亮度均匀性的方法是九点测试，即定义亮度均匀度为显示屏上固定位置的九个测试点的最大亮度值与最小亮度值的比值。显然，这个比值越接近“1”亮度均匀性越好，比值越大则说明亮度越不均匀。但是由于 LED 显示单点像素亮度具有很大的弥散性，显然九点测试对于 LED 显示设备亮度不均匀性的评估是不适用的。一个亮度均匀度不高的具有上百万个显示像素的显示设备只用固定位置的九点亮度来测试整个显示设备的均匀度，而不考虑其它大量像素亮度的差值是很不精确的。

目前，显示领域亮度均匀性的评估标准存在明显的缺点，比如 VESA 的 FPDM 2.0 标准就脱离了“测量标准”的目标，反而陷入“Mura”缺陷的分类；国内 2003 年制定的《LED 显示屏测试方法》中对均匀性的评估也是以 6 个像素及其关联像素的亮度来确定整屏成百万像素的均匀性。



图 5.4 中心像素及其关联像素

而目前 LED 行业对 LED 大屏显示亮度均匀性的评估也多采用《LED 显示屏测试方法》中的评估方法。《LED 显示屏测试方法》对 LED 显示屏的光强均匀性进行了分级，并严格规定了测试方法。定义像素光强均匀性 BPJ 为显示屏中某些特别亮的像素(或特别暗的像素)光强与该像素相关区域内像素光强的一致性。具体测试方法如下：

1. 在全屏中随机抽取 20 个像素；
2. 用光强仪分别测量出这 20 个像素的光强值，并选出其中 3 个最亮像素和 3 个最暗像素，编号分别为  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$  和  $P_6$ 。它们的光强值分别为  $I_0(P_1)$ 、 $I_0(P_2)$ 、 $I_0(P_3)$ 、 $I_0(P_4)$ 、 $I_0(P_5)$  和  $I_0(P_6)$ ；
3. 根据定义，用光强仪分别测出像素周围关联区域的像素光强  $I_1(P_1)$ 、 $I_2(P_1)$ 、 $I_3(P_1)$ 、 $\dots$ 、 $I_8(P_1)$ 。关联像素如图 5.4 所示，其中中间的实心五星代表中心像素，周围的 8 个空心五星为其关联像素。

则  $P_1$  关联区域的像素光强均匀性定义为：

$$E[P_1(i)] = \frac{I_0(P_1) - I_i(P_1)}{I_0(P_1) + I_i(P_1)} \times 100\% \quad (5-6)$$

式中， $i=1-8$ ，代表 8 个关联像素， $I_0(P_1)$  为中心像素  $P_1$  的光强， $I_i(P_1)$  为中心像素第  $i$  个关联像素的光强；

4. 从 8 个关联值中取最大的一个作为  $P_1$  的像素光强均匀值  $E[P_1]_{\max}$ ；
5. 用同样方法分别测出的光强  $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$  和  $P_6$  的光强均匀性，取三

个最大值进行算术平均，得出像素光强均匀性 BPJ；

6. 每一种基色分别测量计算并取最大值为该屏像素光强均匀性，按表 5.1 规定归入相应级别。

表 5.1 《LED 显示屏测试方法》中像素光强均匀性分级

A 级	B 级	C 级
$25\% < B_{PJ} \leq 50\%$	$5\% < B_{PJ} \leq 25\%$	$B_{PJ} \leq 5\%$

目前市场上的 LED 大屏幕通常都具有严重的像素不均匀性，即使比较均匀，由于评估方法的不稳定性，也使得我们不敢确定用这一方法评估的结果是否准确。显然，这一评估方法对目前 LED 像素亮度均匀性的评估具有以下局限与不足之处：

1. 测试不稳定，对均匀性较低的 LED 平板显示屏评估，即使是同一屏同一基色，每次评估结果相差较大，甚至将同一块屏划分为不同的等级，不具有重复性。

2. 算法复杂，测试比较费时费力。这种评估方法的测试手段基于传统光色测量设备，每次只能测量一个值，每找一个点都要重新对焦。

3. 带有随机性，以 54 个像素（本身加关联像素）的测量结果代替整屏百万像素的均匀性是很不科学的。

### 5.3.2 均方根误差评估

在图像质量评价的客观方法中，均方根误差是比较常用的方法。该方法可描述为：

$$L_{mse} = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (L_i - \bar{L})^2} \quad (5-7)$$

其中，N 代表图像中像素数， $L_i$  代表图像中任意像素点的亮度。 $\bar{L}$  代表整幅图像亮度平均值，它可以表示为：

$$\bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^N L_i}{N} \quad (5-8)$$

对图像的客观度量，最重要的是能反映出被人言觉察到的图像质量，而这种基于图像均方根误差的图像质量评价方法仅仅适合度量图像产生的随机误差。虽然这种方法度量形式简单，易于计算，但是它们和人的视觉系统毫无关系，因为它们不加区别地对待图像的所有空间频率和亮度水平，所以经常导致和主观测试相背离的结果。

## 5.4 基于灰度直方图的亮度均匀性评估方法

基于 CCD 图像的 LED 显示屏亮度均匀性评价方法，实际上是对由 CCD 图片

得到的 LED 像素相对亮度矩阵（表）的均匀性评价。本文根据实际情况进行了大量实验建模，首先总结出了基于灰度直方图的亮度均匀性评估方法。

### 5.4.1 图像的灰度直方图

图像的灰度直方图是图像处理中一种十分重要且实用的工具，它概括了一幅图像的灰度级内容。从数学上来说灰度直方图是图像各灰度值统计特性与图像灰度值的函数，它统计一幅图像中各个灰度级出现的次数或概率。灰度图像  $f(x, y)$  的直方图可定义为离散函数：

$$h(r_k) = n_k, k \in [0, L] \quad (5-9)$$

其中  $r_k$  为图像  $f(x, y)$  的第  $k$  级灰度， $n_k$  是图像  $f(x, y)$  中具有灰度值  $r_k$  的像素个数， $n$  是图像像素总数， $L$  是图像的灰度级数。因为  $h(r_k)$  给出了对各个  $r_k$  出现概率的一个统计，所以直方图提供了图像的灰度值分布情况。灰度直方图还可以归一化表示为：

$$P(r_k) = \frac{h(r_k)}{n} = \frac{n_k}{n}, k \in [0, L] \quad (5-10)$$

$P(r_k)$  是灰度级  $r_k$  出现的频数，其所有灰度级频数之和等于一。在灰度直方图坐标系中，横坐标表示图像中各个像素点的灰度级，纵坐标为各个灰度级上图像各个像素点出现的次数或概率。图 5.5 为  $128 \times 64$  像素点 LED 显示屏模块单基色灰度直方图。其横轴代表灰度值，纵轴代表某灰度值像素频数占总像素数的百分比，即  $P(r_k) \times 100\%$ 。最高处为亮度均值的频数（峰值）。

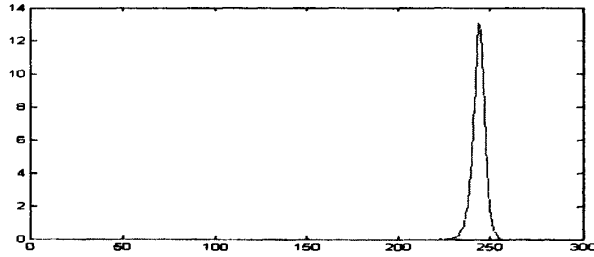


图 5.5 LED 显示模块灰度直方图

### 5.4.2 正态分布函数特征分析

正态分布指变量的频数或频率呈中间最多，两端逐渐对称地减少，表现为钟形的一种概率分布。从理论上说，若随机变量  $x$  的概率密度函数为：

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (5-11)$$

称为  $x$  服从均值为  $\mu$ ，标准差为  $\sigma$  的正态分布。标准差代表变量与均值之



间的差异情况，反映数据集的离散程度。正态分布的特征表现为：以均值为中心两边对称分布，均值处变量的频数最高； $\mu$ 一定时，曲线的形状由 $\sigma$ 决定， $\sigma$ 越大，曲线越“矮胖”，总体分布越分散， $\sigma$ 越小，曲线越“瘦高”，总体分布越集中<sup>[15]</sup>。

通过对 LED 显示屏亮度信息分析发现，其灰度直方图在某一数值区间上呈正态分布趋势，如图 5.5 所示。

### 5.4.3 评估结果分析

图 5.6(a-d)所示为用 CCD 图像传感器采集并经过亮度特征数据提取所得到的 LED 显示屏样品模块亮度分布情况，是通过人眼视觉感知亮度均匀性不同的四种单基色 LED 显示屏模块，其大小均为  $128 \times 64$  像素点。从总体上看，这几幅图像的亮度均匀性各有差异。图 5.6(a' -d')是与图 5.6(a-d)对应的灰度直方图及正态分布拟合曲线。图中横轴代表了灰度直方图中像素频数不为零的灰度范围(M)并进行了  $(-M/2, M/2)/10$  的坐标变换，这样，横轴变为较小的数值并且关于零点对称。纵轴代表了某灰度级像素频数所占整屏像素数的百分比。由图 5.6(a' -d')可以看出，灰度范围分布越宽，其亮度均值所占的比例也越小，拟合后的正态分布曲线也越“矮胖”。反之，其正态分布曲线越“瘦高”。因此，灰度范围分布越宽，亮度均值在整体亮度分布所占的比例也越小，单色的亮度越分散。从视觉感知上讲，这说明屏幕的整体亮度分布越杂乱。在评估一个显示屏亮度均匀性时我们采用正态分布标准差来衡量整屏像素亮度是否集中，即标准差越小，亮度分布越集中，人的视觉亮度差异越小，说明屏幕单基色显示的亮度均匀性越好。反之，屏幕单基色显示亮度均匀性越差。

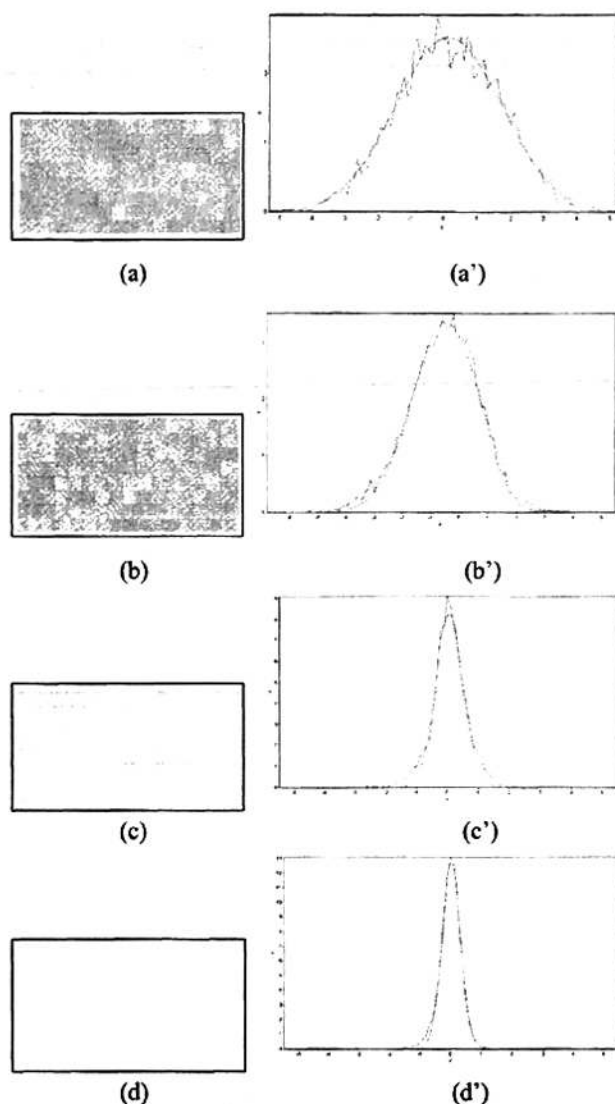


图 5.6 不同显示模块的亮度均匀性比较

表 5.2 列出了这 4 个模块的相关评估数据。图 a 有效灰度分布的约有 106 个灰度级，其峰值为 2.8%，正态分布拟合后的均标准差为 0.158。该图中有大片颜色较深的块，说明这些部分亮度偏低。也有亮度较高的块，所以整体亮度分布很不均匀。图 b 中灰度分布约 100 级，峰值为 3.5%，正态分布拟合后的均标准差为 0.119，灰度差异相对较小，视觉亮度差异较 (a) 好。图 c 和 d 是视觉亮度均匀性较好的模块，从其亮度分布数据分析结果可以看出，它们的灰度分布范围明显变窄，而且峰值明显增大，正态分布曲线拟合后的标准差与前两幅图相比也小了一个数量级。

表 5.2 灰度直方图评估数据比较

	a	b	c	d
$\sigma$	0.158	0.119	0.048	0.031
峰值(%)	2.8	3.5	9.1	13.1
灰度值范围	106	100	48	34

通过对样本模块的分析，用此方法来评估 LED 显示屏亮度均匀性与人眼视觉感觉相一致。因此，利用图像灰度直方图，并通过正态分布曲线拟合求出标准差来评估 LED 显示屏的亮度均匀性是比较有效的一种方法。

5.4.4 该评估方法评价

以上分析可知，基于灰度直方图的 LED 显示屏亮度均匀性评估方法，是依据亮度分布范围直方图与正态分布曲线拟合，用标准差的大小从宏观上来判断亮度分布的均匀性。与现有的 LED 显示屏亮度均匀性评估方法相比有以下优点：

- 1) 利用 CCD 图像传感器采集数据，实时性好；
- 2) 由 CCD 图像获取亮度信息，信息量大；
- 3) 图像灰度直方图代表了各像素亮度分布的统计量信息，可以有效确定显示屏的亮度范围；
- 4) 正态分布标准差能简单而有效的表示亮度分布的均匀性。

用灰度直方图评估屏幕亮度均匀性是从宏观上进行的评估方法，无法对灰度分布的局部特征做出判断，所以，如果不同灰度模块分布的位置不同（比如某些较亮或较暗模块的集中分布）会产生较大的视觉差异，而用此方法评估，结果可能会相差不大。不过在实际生产和实验中，对于以上情况，可以结合主观评估做出相应的处理。

5.5 基于结构相似性的亮度均匀性综合评估方法

把 LED 显示屏模块亮度信息作为图像信号进行亮度均匀性评估，它不但包含亮度特征，也具有高度的结构化，它们的像素点之间具有强烈的相关性，特别当这些像素点之间在空间位置近似时，这些相关性携带了重要的视觉物体的结构性信息。前面介绍的基于误差敏感的图像质量评价方法仅仅考虑图像逐像素点间的不同，并未考虑到图像像素间的这种强烈相关性和结构对视觉物体的重要性。虽然大多数基于误差敏感的图像质量评价方法运用线性变换来分解图像信号，但并不能去除这种强烈的相关性。

为此，本文给出了一种基于结构相似性的 LED 显示屏亮度均匀性综合评价方法。该方法的基本理论是：人眼的主要功能是从视觉区域提取图像的结构化信息，同时，HVS 具有高度地适应此目的的功能。因此，一个结构相似性度量方法应该对图像的感知具有很好的近似性。

5.5.1 系统组成

针对图像结构信息在人眼对图像进行评价过程中的重要性，本文在前人对

图像相关性研究的基础上提出了基于结构相似性的 LED 显示屏亮度均匀性综合评价方法<sup>[46]</sup>，图 5.7 为该方法的系统框图。

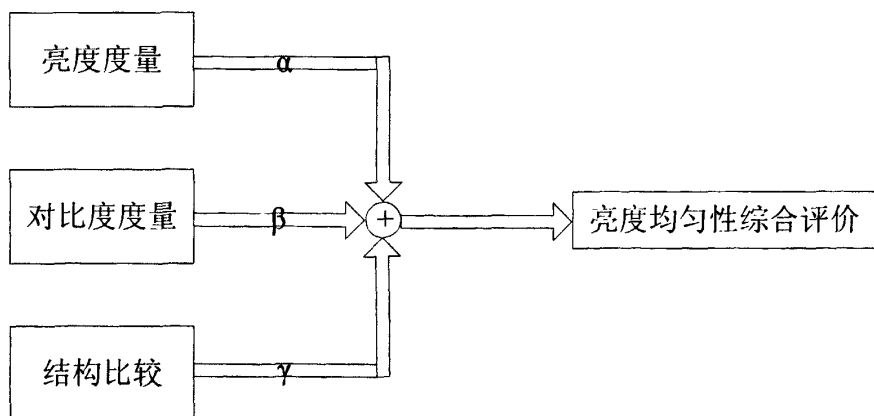


图 5.7 结构相似性亮度均匀性综合评估系统

首先，分别提取 LED 像素的亮度变化信息，然后提取 LED 像素的对比度变化信息，在此基础上再提取图像的结构变化信息，并对以上提取的三种变化进行比较，最后对其比较结果进行综合，从而得到一种亮度均匀性度量指标，并以此指标作为 LED 显示屏亮度均匀性好坏的评价尺度，具体如下：

1. LED 显示屏亮度度量。根据 5.4 节的分析，LED 显示屏的像素亮度分布在一定的范围内，而且其分布的范围越小意味着显示屏的亮度越集中，其亮度均匀性也就越好，因此亮度范围可作为评价 LED 显示屏亮度均匀性的一个必要条件。本文对亮度的度量采用亮度范围分布的集中程度作为评价标准。记采集到的 LED 显示屏相对亮度分布范围为  $L_w$ ，即该亮度样本在灰度直方图所占的灰度宽度。作为亮度均匀性评价标准的度量可由下式表示：

$$L_{cen} = \frac{L_w}{256} - k \quad (5-12)$$

在公式 5-10 中， $L_w$  的取值可从 1 到 256，当取值为 1 时，说明 LED 显示屏只有一种亮度取值，这也是最理想的状态。为了使度量值  $L_{cen}$  最小值为零故增加修正系数  $k=1/256$ 。

2. 对比度度量。通过 5.1 节的分析，对空间频率中的亮度依赖关系，通常用 Michelson 对比度来表示，如公式 5-2 所示。对比度反映了相邻像素间亮度的差异。在此可表示为：

$$L_{con} = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad (5-13)$$

由公式可以看出，像素亮度差异越小  $L_{con}$  越小，在整屏亮度均匀性最理想的状态时，该值为零。

3. 结构比较。对于 LED 显示屏亮度均匀性的评估，可将整屏分为若干模块，然后对其亮度从结构相似度的情况进行度量，把任意两个模块作为向量进行角度比较。每个模块的亮度信息可看作一个实矩阵，实矩阵  $A_{m \times n}$  ( $m \geq n$ ) 的奇异值分解表示为  $A = USV^T$ ，其中， $U_{m \times m}$ ， $V_{n \times n}$  为标准正交矩阵，即  $U^T U = I$ ， $V^T V = I$ ，

$S_{n \times n}$  为对角矩阵, 即  $S = \text{diag}(S_1, S_2, \dots, S_k, 0, 0, \dots, 0)$ ,  $k = \text{rank}(A)$ ,  $S_1 \geq S_2 \geq \dots \geq S_k$ ,  $S$  特征向量中的前面几个分量包含了亮度模块代数属性的重要信息。 $S$  的前  $k$  个对角元素称为  $A$  的奇异值, 其构成了  $A$  的奇异值向量。

向量的夹角表明了两向量线性相关的程度, 夹角越小说明越接近线性关系, 也是对 2 个向量所张成的空间的线性关系的度量。用奇异值向量的夹角表示不同 LED 亮度模块的质量评价可表示为:

$$Q_{SVD} = \arccos \frac{\sum_{i=1}^k S_i \times S'_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^k S_i \times S_i} \sqrt{\sum_{i=1}^k S'_i \times S'_i}} \quad (5-14)$$

$S_i$  与  $S'_i$  分别代表两个亮度模块的奇异值向量元素,  $k$  取二者秩的最小值。此方法主要从结构出发确定各亮度模块的相似性。其夹角越小越好, 当夹角越接近零说明模块间的相似性越强。

对于以上量度值的综合分析, 并进行加权求和可得 LED 显示屏亮度均匀性的综合评价标准 SSLE (Structural Similarity Luminance Evaluation)。可由以下公式表示:

$$SSLM = [L_{cen}]^\alpha + [L_{con}]^\beta + [Q_{SVD}]^\gamma \quad (5-15)$$

这里, 参数  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$ ,  $\gamma > 0$  用来调整三部分的相关性权重。本文中取  $\alpha = \beta = \gamma = 1$ 。按照 SSLE 评估方法对 LED 显示屏量度均匀性进行评估, 其评估的结果是一个大于等于零的实数, 其值越趋近于零, 说明亮度均匀性越好。

另外, 结合《LED 显示屏测试标准》, 本文在进行 LED 亮度数据模块划分时也采用九点测试的思想。其划分模式如图 5.8 所示。

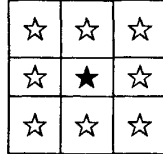


图 5.8 亮度模块划分

在具体实施过程中, 亮度度量采用灰度直方图亮度评估方法, 该方法主要反映了整屏亮度的集中程度; 对比度度量采用 Michelson 对比度算法首先按照图 5.8 划分为九个模块, 在模块内部先求相邻像素的亮度对比度, 然后再对整屏亮度对比度求均值; 在结构比较度量中, 求出各模块亮度矩阵的奇异值向量, 以中心模块为参照求出其他各奇异值向量与中心模块奇异值向量的夹角, 并求出夹角均值; 在对比度度量中, 分别求出各模块的亮度对比度, 然后再求对比度均值。

## 5.5.2 实验结果及评价

本文采集了  $64 \times 48$  的 LED 显示屏 R、G、B 三基色在亮度校正前后的亮度数

据。按照以上基于结构相似性评估方法所得亮度评估结果见表 5.3，亮度图如下所示。

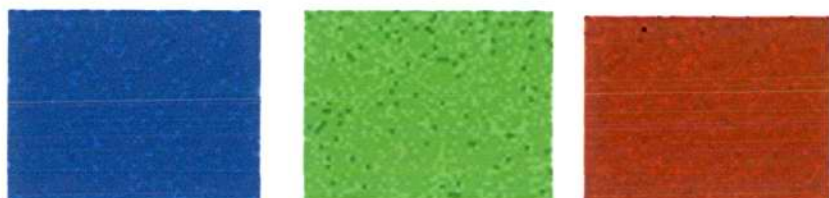


图 5.9 校正前 B、G、R 三基色亮度



图 5.10 校正后 B、G、R 三基色亮度

为便于观察，将三基色 LED 显示屏模块亮度矩阵生成为三基色的 BMP 图。从图中可以看出，亮度校正后的均匀性明显好于亮度校正前。校正后的亮度图像从整体上看是比较均匀的，图 5.10 所示的三幅图片中都有不同程度的暗点，这是因为，在亮度校正的过程中，为了减少整屏亮度的损失，因此舍弃了部分较暗的点，对它们不予校正，或者即使校正也无法将其亮度提到较理想水平。这样，在校正后的 LED 显示屏中就难免出现一些暗点，然而这种暗点所占比例是非常有限的，而且比较分散地分布在整屏中，对于观察者几乎不会造成影响。但是，如果这些暗点如果相对比较集中分布在 LED 显示屏中的话，其所造成的视觉影响就不可忽视了。本文利用 SSLE 方法对以上亮度分布进行评估，其结果中亮度均匀性由好到差的顺序为：B 校后、R 校后、G 校后、B 校前、G 校前、R 校前。但是，对于结构相似性评估的三个基本因素所得结果的排序并非如此。比如 R 校后的亮度对比度远大于 G 校后的亮度对比度，但是综合评定的结果 R 校后的亮度均匀性却比 G 校后的亮度均匀性好，那是因为 R 校后的亮度结构相似性更好。因此，采用此种方法进行 LED 显示屏亮度均匀性评估各个评估度量标准之间相互牵制，不再是用一种因素决定最终结果，而且这更符合了 HVS 系统。从三基色的亮度图中结合人眼主观感受也可以验证该评估结果的准确性。

表 5.3 亮度均匀性评估结果

	Lcen	Lcon	Qsvd	SSLE
B 校前	0.3203	0.1845	0.0053	0.5101
G 校前	0.3203	0.1934	0.0077	0.5214
R 校前	0.3242	0.2831	0.0105	0.6178
B 校后	0.0703	0.0654	0.008	0.1437
G 校后	0.0898	0.0927	0.0115	0.194
R 校后	0.0938	0.1766	0.0087	0.1791

事实上，由从 CCD 图像中提取出各像素点的亮度信息重新组合而成的亮度图，与实际 LED 显示屏显示效果给人的视觉印象是有一定差别的。LED 显示屏作为点间距响度较大，显示面积比较大的显示设备，其显示效果与人的观察距离和观察角度都有关系，本文的评估是假设观察者所看到的显示屏是 LED 像素点不可察觉时的情况。而且，由于色度问题引起的不一致现象也会加强亮度不一致对人眼视觉的影响，这也是一个值得研究的问题。

## 第六章 总结展望

### 6.1 本文工作总结

LED 显示屏亮度均匀性是 LED 显示屏行业亟待解决的问题。而均匀性的好坏也需要有定量评估。针对目前具备的条件,本文提出了基于 CCD 图像的 LED 显示屏亮度均匀性评估方法。该方法首先以数字图像处理为基础,分析了 LED 像素亮度特征数据与 CCD 像元灰度值的关系,然后对由 CCD 相机采集到的 LED 像素的相对亮度值进行提取,并对这些数据进行分析和评估。对本文所完成的工作总结如下:

1. 完成了对 LED 显示屏亮度信息的采集。以面阵单色 CCD 相机为主要工具,结合计算机系统,实现了对 LED 显示屏亮度的实时采集。在采集的过程中由于采集的对象面积较大,结合 LED 管的发光特性和 CCD 相机的成像特点,提出了亮度采集过程中需注意的问题。

2. 实现了对 LED 像素亮度的提取。结合 LED 像素亮度的成像特点,建立了相应的软件平台,并设置了相应的算法对 LED 像素相关的特征亮度进行了提取。亮度的准确提取是下一步进行评估的关键,因此本文采用了基于区域最大值的 LED 像素亮度提取算法。本算法在 LED 像素点在 CCD 像元有效区域的定位是非常有效的,它可以有效克服因屏幕组装等机械误差造成的采集到的 LED 像素行列不均匀现象。

3. LED 显示屏亮度均匀性的评估。《LED 显示屏测试标准》中所提出的 LED 显示屏亮度均匀性评估方法是现在行业内通用的方法,但是这种方法不仅测试速度慢,关键是它只是采集了整个屏幕的九个小区域的像素点作为评估对象,用它来反映整屏数以百万计的像素亮度均匀性显然是不精确的。而且它只是简单采用了对比度的计算来量化亮度均匀性的好坏显然也不符合人类视觉系统的主观感受效果。近年来,有关研究者也提出了一些相关评估方法,虽然较以前的方法有所改进,但是在实践中得到的效果并不理想。本文在总结了前人算法思想的基础上提出了几种 LED 显示屏亮度均匀性评估方法,通过比较觉得基于结构相似性的亮度均匀性综合评估算法最为理想。

### 6.2 本文创新点

本文的创新点总结如下:

1. LED 像素亮度信息的提取。通过 CCD 相机采集到的 LED 显示屏的亮度图像既包含了 LED 像素亮度,也包含了屏幕背景。理想状态下背景是黑色的,但是由于 LED 发光的影响,采集到的图像背景区域亮度值并不为零,因此需要首先设置阈值对背景去噪,然后再将 LED 有效亮度区域的灰度值提取出来,作为 LED 像素的相对亮度值。在此,主要利用数字图像处理知识,结合成像特点提出了基于区域最大值的 LED 亮度提取算法。本算法提取出的亮度能比较真实地反映 LED 像素的亮度特征。



2. LED 显示屏亮度均匀性评估。对整屏或较大模块像素亮度均匀性的评估不仅要考虑亮度本身的差异,而且作为显示屏,还要考虑其结构特性,由于人眼对观察对象具有适应性,因此作为多媒体显示的终端,人的主观感觉是非常重要的,传统的评价方法主要是主观评价,但是科学研究需要客观建模,并进行量化评估。本文结合 HVS 系统,提出了基于结构相似性的 LED 显示屏亮度均匀性评估方法。这种方法综合考虑了亮度,对比度以及结构关系,并对这三方面的信息进行了综合评定。实践证明,在对几种 LED 亮度均匀性评估算法比较之后,发现这种算法是比较理想的。

### 6.3 研究工作展望

本文提出的基于 CCD 图像的 LED 显示屏亮度均匀性评估方法包含两个方面的重点内容,一是 CCD 图像的亮度提取,二是 LED 显示屏亮度均匀性的评估算法。前者对后者有决定性的作用。在进行 LED 亮度数据采集时首先要考虑采集的准确性,通过第四章误差分析可以发现,相机系统误差是目前还无法精确去除的一个难题。所以,要想提高评估的准确性,这一问题还有待解决。亮度均匀性的评估也是一个有待探索的问题,本文所用的基于结构相似性的评估方法 SSLE (Structural Similarity Luminance Evaluation) 是在人类视觉系统 HVS 理论的基础上推演出来的。在本算法中亮度度量反映的是整屏亮度的集中程度;对比度度量反映了相邻像素点的亮度差异;结构比较反映了模块间的亮度结构的相似程度。其中在进行对比度度量和结构比较的过程中都涉及到了比较区域的划分,本文所采用的九区域比较法相对比较容易实现,但是区域的选取方法有待探索。另外对于该评估方法中三种基本因素所占的权重也有待进一步验证和规范化。

毕竟 LED 显示屏所显示的信息既包含亮度信息也包含色度信息,也就是说既有亮度不均匀性的影响也有色度不均匀性的影响。对于全彩色 LED 显示屏来讲,每个像素点是由 R、G、B 三基色构成的,而且在显示时,其不均匀性是由三者共同决定的,情况更加复杂。因此单纯的亮度均匀性的评估并不能真实反映其均匀性的好坏,而且评估的视觉建模也是一个非常复杂的问题。因此,短时间内很难达成共识,这有待以后更进一步的研究。