

## Application Note

## 窄像素间距矩阵 LED 显示屏中的常见 LED 显示挑战、根本原因和权变措施



## 摘要

Mini/Micro-LED 显示屏在各种 EE 中越来越受欢迎，例如窄像素间距 (NPP) LED 显示屏、LED 绿幕、LED 影院屏幕、AR/VR 和动态汽车尾灯。LED 显示屏在这些 EE 中日益普及，归功于其高亮度、高对比度、出色的图像质量和长使用寿命等优势。

然而，在 LED 显示屏背后，LED 驱动器存在许多设计挑战。随着显示屏的分辨率和像素密度越来越高，您将会面临哪些关于显示性能的新挑战？这些显示挑战的根本原因是什么？驱动器内部采用了哪些电路和算法来应对这些问题？

本应用手册首先将带您全面了解显示技术、LED 驱动器拓扑、矩阵 LED 显示驱动器架构和系统。然后，本文档将基于 TI 新款共阴极矩阵 LED 显示驱动器 [TLC6983](#) 和 [TLC6984](#)，从 IC 电路和算法角度更深入地探讨几种典型 LED 显示挑战的根本原因和相关设计解决方案。

## 内容

<b>1 显示技术概述</b> .....	<b>2</b>
1.1 显示技术比较.....	2
1.2 LED 驱动器拓扑.....	2
<b>2 Mini-LED/Micro-LED 显示系统简介</b> .....	<b>4</b>
2.1 矩阵 LED 显示屏基础知识.....	4
2.2 LED 显示屏新兴 EE 和系统概述.....	5
2.3 高密度矩阵 LED 显示屏的常见问题.....	7
<b>3 根本原因分析和 TI 参考设计</b> .....	<b>10</b>
3.1 重影问题.....	10
3.2 耦合问题.....	20
3.3 低灰度不均匀问题.....	24
<b>4 总结</b> .....	<b>31</b>
<b>5 参考资料</b> .....	<b>32</b>

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

# 1 显示技术概述

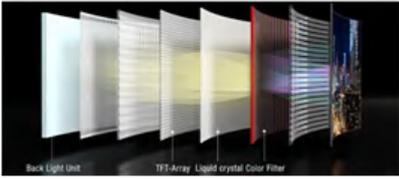
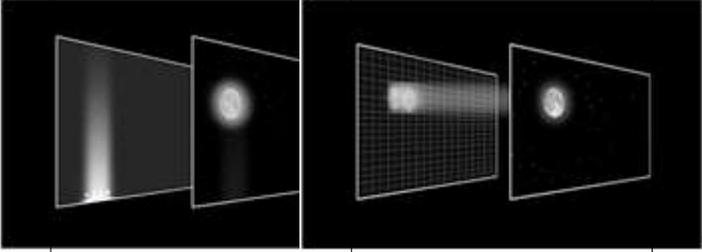
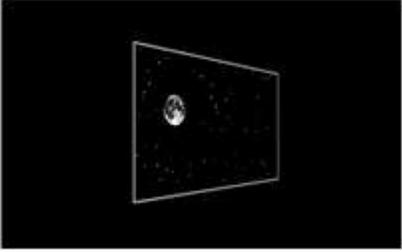
## 1.1 显示技术比较

目前有三种主流显示技术，分别是液晶显示器 (LCD)、有机发光二极管 (OLED) 和 Mini-LED/Micro-LED。表 1-1 对它们进行了比较。

这些显示技术使用了多种调光方法。LCD 传统上使用全局调光 (边缘背光)。不过，得益于对比度和峰值亮度方面的优势，局部调光 (直接背光) 在高端产品中越来越受欢迎。OLED 和 Mini-LED/Micro-LED 都使用像素调光，这意味着每个像素直接发光并显示图像，不再需要背光。

Mini-LED/Micro-LED 具有高亮度、高对比度、出色的图像质量和长寿命等优势。尽管在生产和系统复杂性方面存在缺点，Mini-LED/Micro-LED 在各类 EE 中逐渐普及，例如窄像素间距 (NPP) LED 显示屏、用于虚拟制作的 LED 绿幕、LED 影院屏幕、AR/VR 和动态汽车尾灯。

表 1-1. 显示技术比较

	LCD		OLED	Micro-LED
结构				
调光				
特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>对比度：低</li> <li>峰值亮度：中</li> <li>使用寿命：长</li> <li>生产复杂性：低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>对比度：中</li> <li>峰值亮度：高</li> <li>使用寿命：长</li> <li>生产复杂性：中</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>对比度：高</li> <li>峰值亮度：低</li> <li>使用寿命：低</li> <li>生产复杂性：中</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>对比度：高</li> <li>峰值亮度：高</li> <li>使用寿命：长</li> <li>生产复杂性：高</li> </ul>

## 1.2 LED 驱动器拓扑

表 1-2 介绍了两种常见的 LED 驱动器拓扑。在直接驱动拓扑中，每个 LED 都有自己的驱动通道。在时分多路复用拓扑中，一组 LED (同一列) 共享一个驱动通道，并通过时分多路复用方式依次点亮每个 LED。具体来说，第一行 LED 点亮后，接着点亮第二行 LED，依此类推，直到最后一行 LED 点亮，然后扫描返回到第一行并进入下一个循环。时分多路复用利用了人眼的视觉暂留效应，使得即使 LED 依次点亮，人眼也能感受到连续的图像。

在 mini-LED 或 micro-LED 显示应用中，每个像素对应一个 RGB LED，随着屏幕分辨率变得越来越高，直接驱动变得不现实。例如，4K 屏幕具有  $3840 \times 2160$  个像素，每个像素需要三个通道 (红色、绿色和蓝色)。如果使用 48 通道直接驱动 LED 驱动器，则需要  $3840 \times 2160 \times 3/48 = 518,400$  个驱动器，这从 PCB 布局和成本的角度来看几乎是不可行的。

表 1-2. LED 驱动器拓扑比较

	直接	时分多路复用
结构		
元件	N 个 LED 驱动器	1 个 LED 驱动器 + 1 个控制器 + N 个开关 MOSFET
区域电流	<p>峰值区域电流 - 平均区域电流 = <math>I_{ZONE}</math></p>	<p>峰值区域电流 = <math>N \times I_{ZONE}</math> 平均区域电流 = <math>I_{ZONE}</math></p>

时分多路复用设计使用单个驱动器 IC 同时点亮更多的 LED，从而节省 PCB 层数和成本，这在窄像素间距 (NPP) LED 显示屏中更为实际和必要。事实上，像素间距越小，设计中的时分多路复用次数就越多。

尽管时分多路复用设计节省了 PCB 层数和成本，但也对显示性能带来了很大挑战。因为时分多路复用的高效率是以牺牲显示刷新率为代价的。请注意，LED 显示屏中刷新率的定义与 LCD 或 OLED 显示屏中的刷新率不同。通常，LCD 或 OLED 显示屏的刷新率是指显示屏每秒钟能够绘制新图像的次数。其单位为赫兹 (Hz)。例如，如果显示屏的刷新率为 144Hz，则表示每秒刷新图像 144 次。不过，在 LED 显示屏中，刷新率的定义是所有 LED 依次点亮一次所需时间的倒数（同样以赫兹为单位）。通常，LED 显示屏的刷新率需要非常高，达到 2000Hz 或以上，例如 1920Hz、3840Hz，甚至 7680Hz，以确保在使用相机捕捉 LED 显示屏图像时不会出现暗扫描线或亮暗不一的问题。

刷新率取决于时分多路复用次数（或扫描线数）。从 IC 设计的角度来看，支持更多扫描线可以减少使用的驱动器，进而进一步节省 PCB 层数和成本，从而使驱动器产品在市场上更具竞争力。但是，当扫描线增加时，例如扫描线翻倍，为了在不改变显示屏平均亮度的情况下在一个周期内点亮所有 LED 所需的总时间也会翻倍，因此刷新率会减半。

同时实现高刷新率和大量扫描线并不容易。所幸，TI 的矩阵 LED 显示驱动器 [TLC6983](#) 和 [TLC6984](#) 内置了 SRAM 来支持更多多路复用，并可通过缩短灰度 (GS) 数据传输时间来提高刷新率。此外，[TLC6983](#) 和 [TLC6984](#) 还具有内部倍频器，可通过 SCLK 生成高达 160MHz 的 GCLK，从而能够支持更高的刷新率。基于 [TLC6983 的 LED 显示屏设计要求示例](#) 应用手册展示了一个显示示例，该示例实现了 7680Hz 刷新率、120Hz 帧率、18 条扫描线和 16 位灰度强度。

## 2 Mini-LED/Micro-LED 显示系统简介

### 2.1 矩阵 LED 显示屏基础知识

在讨论 LED 显示系统之前，有必要先了解 LED 和 LED 驱动器结构的基本概念。

图 2-1 和图 2-2 展示了两种 RGB LED，分别是共阳极和共阴极。共阳极 LED 意味着 LED 的阳极连接在一起，而共阴极 LED 则相反。请注意，LED 的正向电压因颜色而异。通常情况下，红色 LED 的正向电压为 1.8V 至 2.2V，而蓝色/绿色 LED 则为 2.8V 至 3.4V。

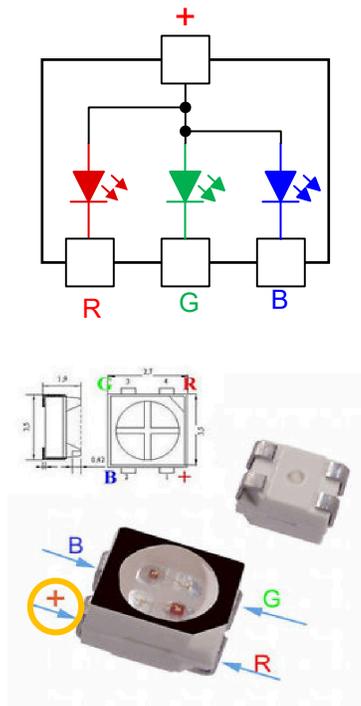


图 2-1. 共阳极 LED

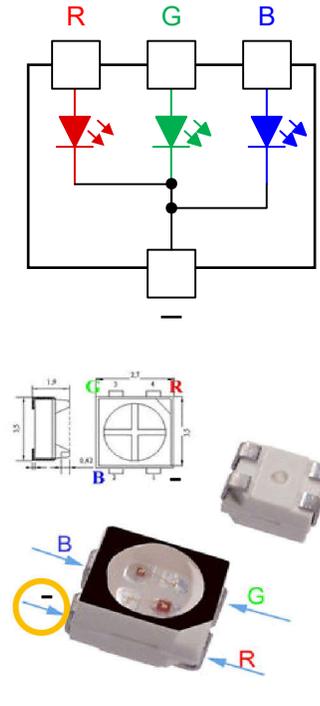


图 2-2. 共阴极 LED

因此，在讨论 LED 驱动器时，存在共阳极或共阴极 LED 驱动器，就像图 2-3 和图 2-4 中所示的驱动器架构一样。过去，由于采用 NMOS 结构的灌流驱动器与采用 PMOS 结构的源驱动器相比成本更低，因此共阳极 LED 驱动器更为常用。但如今，由于节省能耗，共阴极 LED 驱动器更受欢迎。

它们之间的最大区别在于，共阳极 LED 驱动器只有单一电源轨供所有 RGB 使用，而共阴极 LED 驱动器则具有 2 个分开的电源轨，一个用于红色 LED，另一个用于绿色和蓝色 LED。

共阴极 LED 驱动方法可以显著节省功耗，因为红色 LED 的正向电压远低于绿色和蓝色 LED 的正向电压。此外，LED 显示屏的表面温度可降低超过 10 度，色彩均匀性更好，LED 使用寿命更长。通常，总功耗可以降低 30% 至 75%。

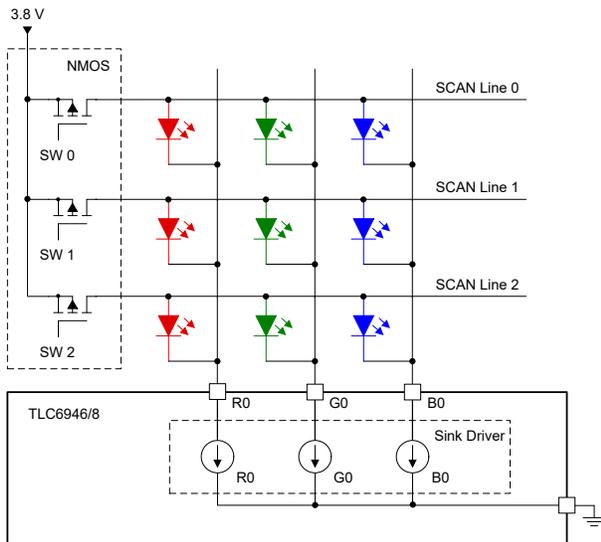


图 2-3. 采用灌流驱动器架构的共阳极 LED

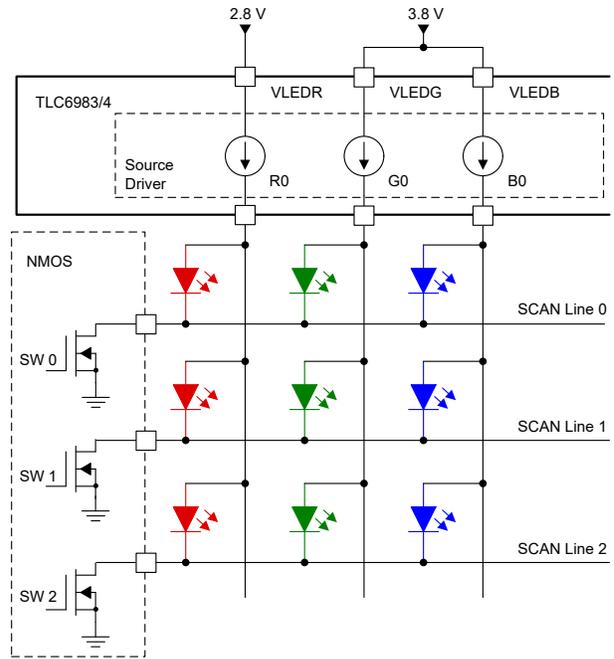


图 2-4. 采用源驱动器架构的共阴极 LED

## 2.2 LED 显示屏新兴 EE 和系统概述

由于 LED 显示屏具有出色的显示性能，因此涌现了一些新的终端设备应用，例如用于虚拟制作的 LED 绿幕、LED 影院屏幕、LED 商用显示屏和汽车动态柔性尾灯。

LED 显示系统、分解图和典型框图分别如图 2-5、图 2-6 和图 2-7 所示。在本例中，一个 4K 屏幕具有大约 30Ku 个 LED 驱动器，LED 驱动器的成本占据了超过 98% 的 BOM 成本，这还不包括 FPGA。

主要的机会在于 LED 驱动器。一个 LED 面板具有 36 个 LED 驱动器。一个 4K 屏幕具有大约 30Ku 个 LED 驱动器。

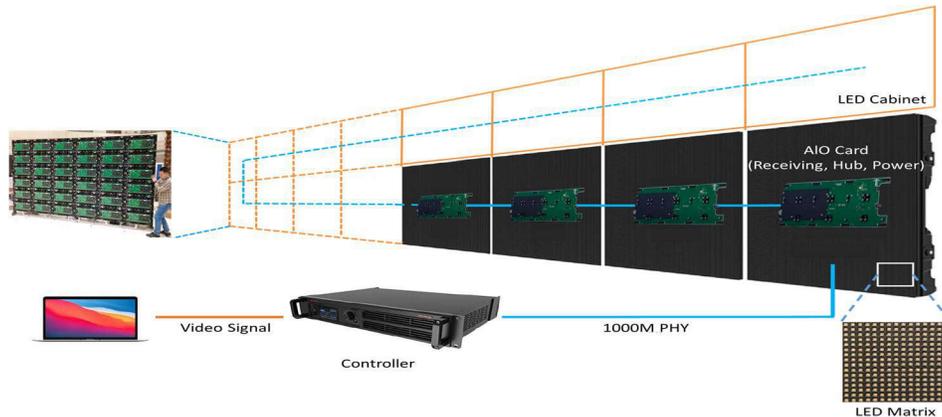


图 2-5. LED 显示系统

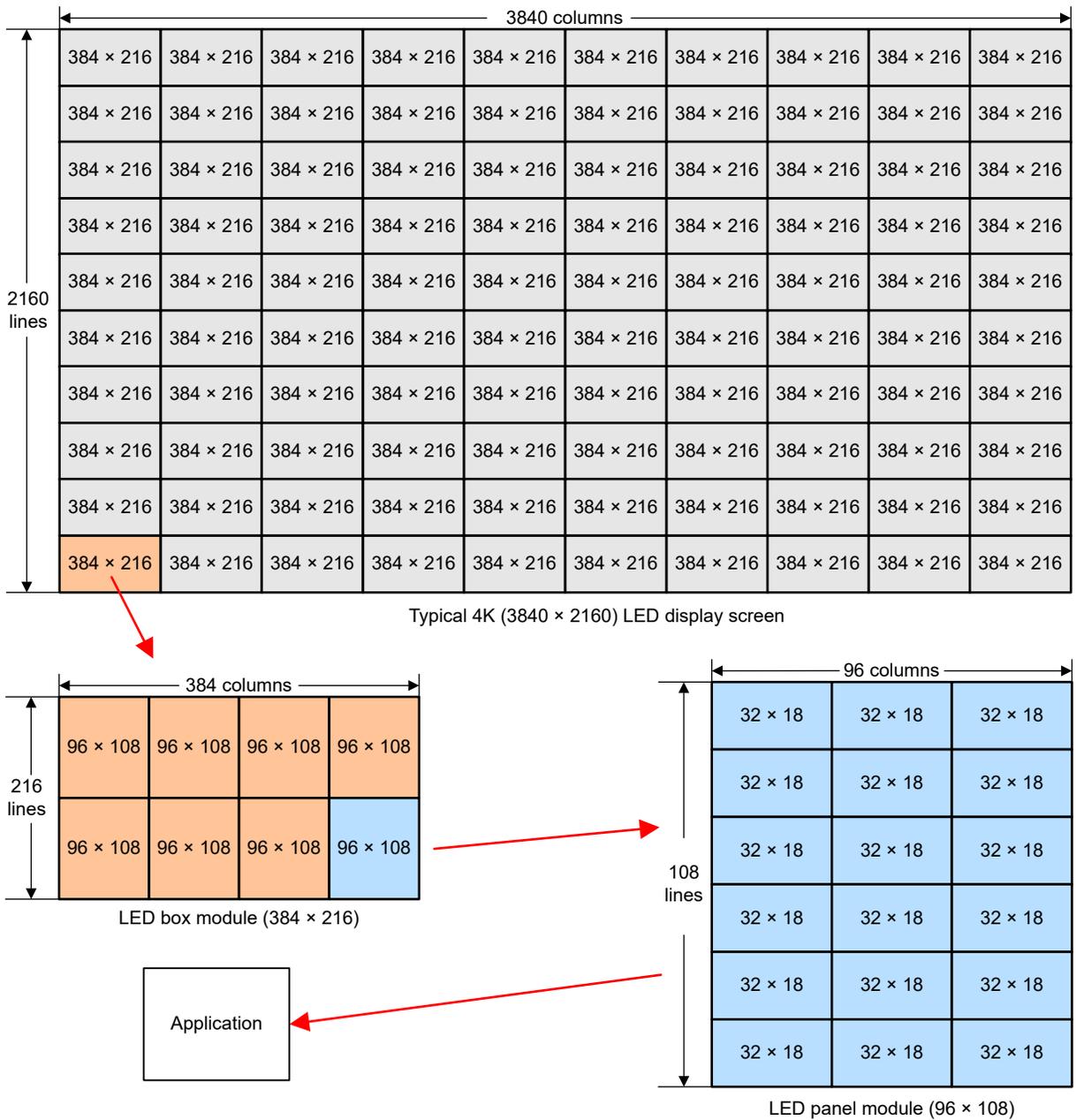


图 2-6. LED 显示系统中的应用

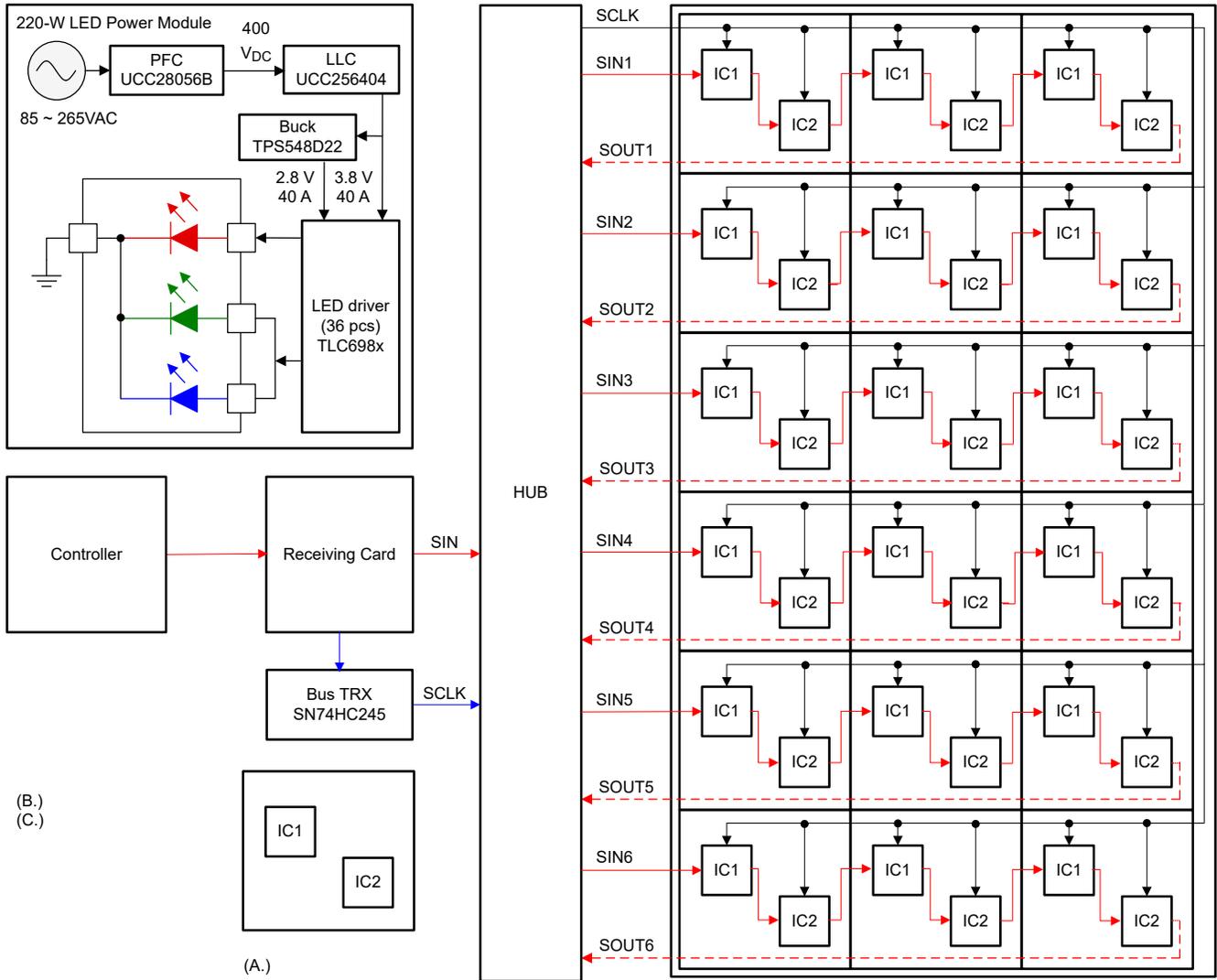


图 2-7. LED 显示面板方框图

- A. 两个驱动器控制  $32 \times 18$  RGB LED 阵列
- B. 一个 LED 面板使用 36 个 TLC698x
- C. 一个 4K 屏幕使用 28.8Ku 个驱动器。

### 2.3 高密度矩阵 LED 显示屏的常见问题

图 2-8 展示了高密度矩阵 LED 显示屏中的七个常见问题。图 2-9 和图 2-10 展示了一些示例。接下来将基于 TI 新款共阴极矩阵 LED 显示驱动器 TLC6983 和 TLC6984，从 IC 电路和算法角度更深入地分析这些典型 LED 显示挑战的根本原因并介绍 TI 的相关参考设计。同时，您也可以参阅窄像素间距矩阵 LED 显示屏中的常见 LED 显示挑战应用手册，以大致了解这些问题。

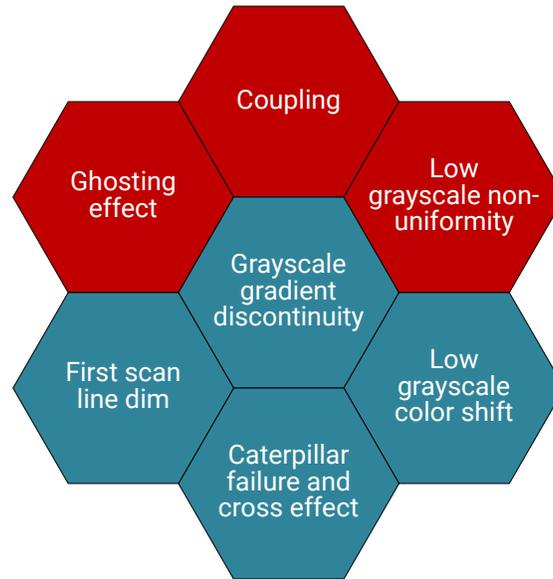


图 2-8. 高密度矩阵 LED 显示屏的常见问题

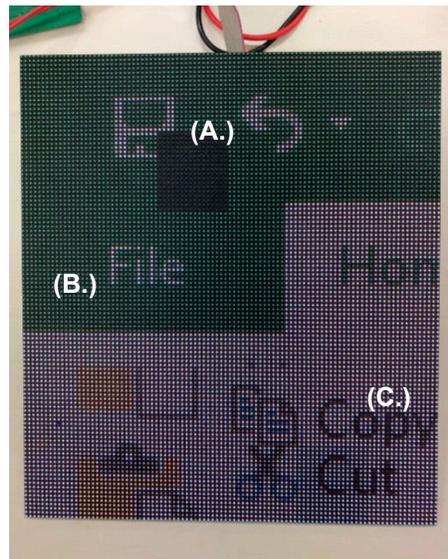


图 2-9. LED 显示问题 - 耦合、不均匀和重影

- A. 耦合
- B. 不均匀
- C. 重影
- D. 毛毛虫现象



图 2-10. LED 显示问题 - 毛毛虫现象

### 3 根本原因分析和 TI 参考设计

#### 3.1 重影问题

重影是指一些 LED 意外点亮的现象。重影主要归因于 LED 矩阵的行或列中集总寄生电容在行或列切换过程中的充放电，导致一些 LED 意外点亮。该问题在低灰度图像中更容易被注意到。

使用图 3-1 和图 3-2 所示的左/右斜线网格测试模式时，重影会更加明显。绿色斜线中的 LED 为正常显示，我们可以看到 2 条斜线之间没有任何 LED 点亮。图 3-2 展示了出现重影的异常显示。在图 3-2 中，正常斜线之间出现了不必要的 LED 点亮。如果不必要点亮的 LED 出现在正常斜线的上方，这种现象称为上重影。相反的情况则称为下重影。

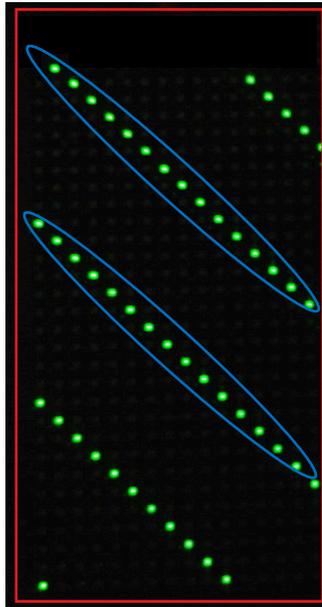


图 3-1. 无重影的正常显示

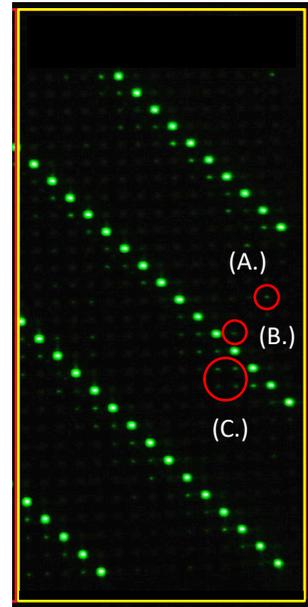


图 3-2. 带重影的异常显示

- A. 不必要的 LED 点亮 (上重影)
- B. 不必要的 LED 点亮 (下重影)

##### 3.1.1 下重影

出现下重影的主要原因是，OUTn 上的寄生电容在扫描线切换期间累积了电荷，并通过 LED 放电，导致 LED 在不应点亮时意外点亮。

图 3-3 列出了后续分析中使用的 LED 图例。

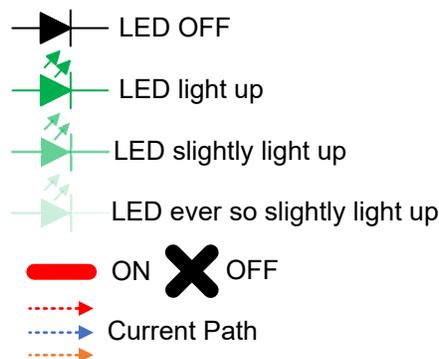


图 3-3. LED 图例

图 3-4、图 3-5 和图 3-6 通过简化的时分多路复用 LED 驱动器结构展示了下重影的根本原因分析，以便更容易理解。

在 P1 操作中，当只需要点亮 LED<sub>02</sub> 时，驱动器会接通 SW<sub>0</sub>，电流路径如红色虚线所示。此时，通道 OUT<sub>2</sub> 上的黄色寄生电容充电。

在 P1 操作期间，SW<sub>0</sub> 接通，LED<sub>02</sub> 点亮。

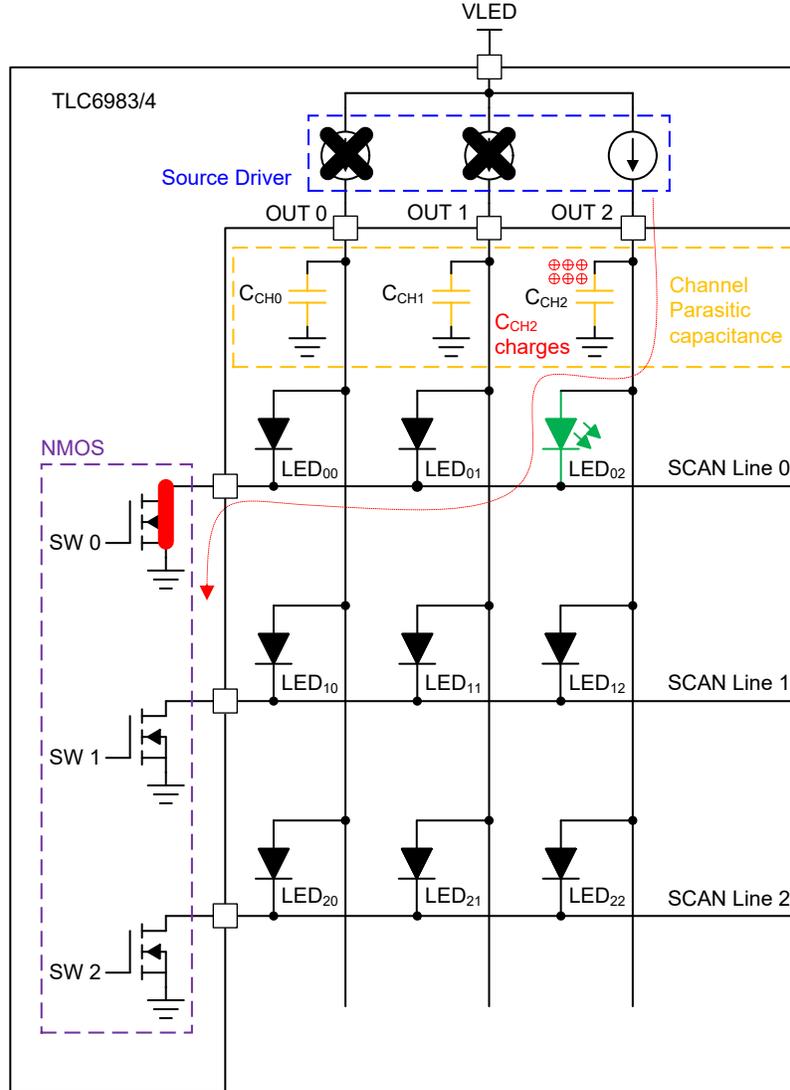


图 3-4. 下重影 - P1 操作

接下来，在 P2 操作中，当只需要点亮 LED<sub>11</sub> 时，驱动器将接通 SW<sub>1</sub>，电流路径如红色虚线所示。此时，通道 OUT<sub>1</sub> 上的黄色寄生电容充电。但是，即使通道 OUT<sub>2</sub> 已关闭，LED<sub>12</sub> 也会微弱地点亮。由于寄生电容先前已经充电，因此 LED<sub>12</sub> 通过蓝色虚线的电流路径被点亮。因此，LED<sub>12</sub> 称为下重影。

在 P2 操作期间，SW1 接通，LED11 点亮，LED12 微弱地点亮。

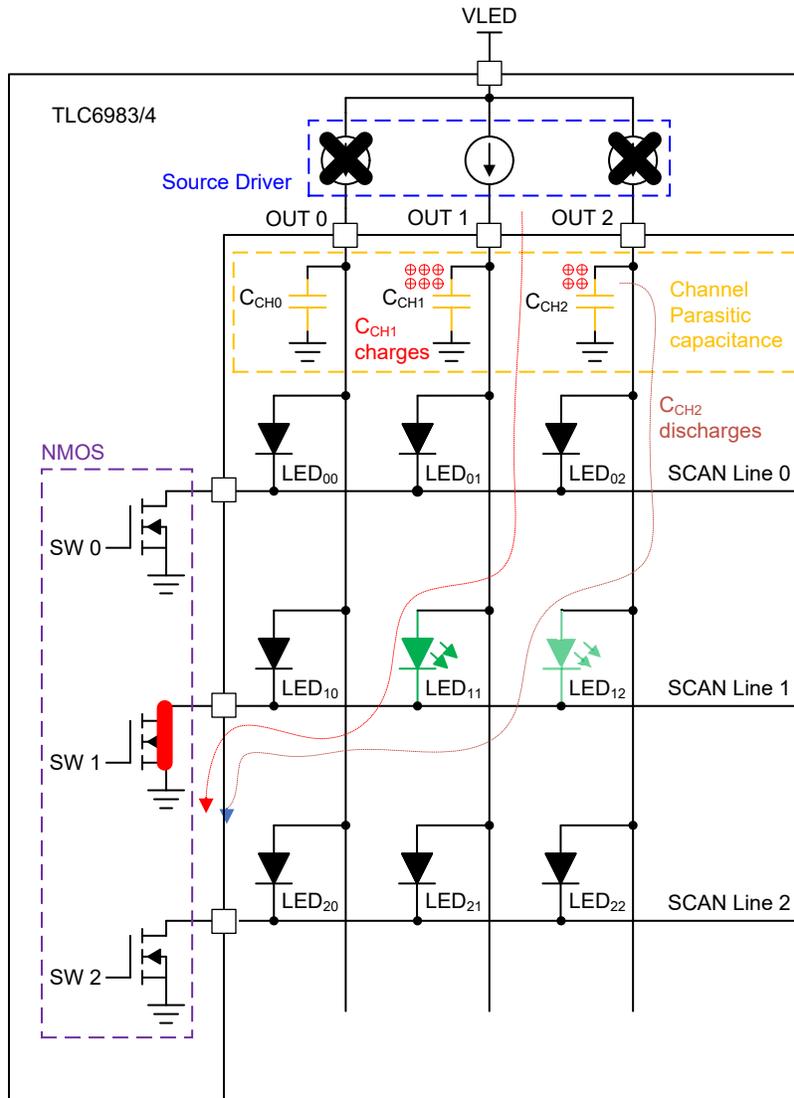


图 3-5. 下重影 - P2 操作

同样地，在 P3 操作中，当只需要点亮 LED<sub>20</sub> 时，LED<sub>21</sub> 和 LED<sub>22</sub> 也会分别通过蓝色和橙色虚线的电流路径被微弱地点亮。原因与之前相同，都是由于通道上的寄生电容。

LED<sub>21</sub> 和 LED<sub>22</sub> 亮度不同的原因是对应通道的寄生电容具有不同的电荷来点亮 LED。不同数量的电荷流经 LED 来对相应通道的寄生电容进行放电。

在 P3 操作期间，SW2 接通，LED<sub>20</sub> 点亮，LED<sub>21</sub> 微弱地点亮，LED<sub>22</sub> 则更微弱地点亮。

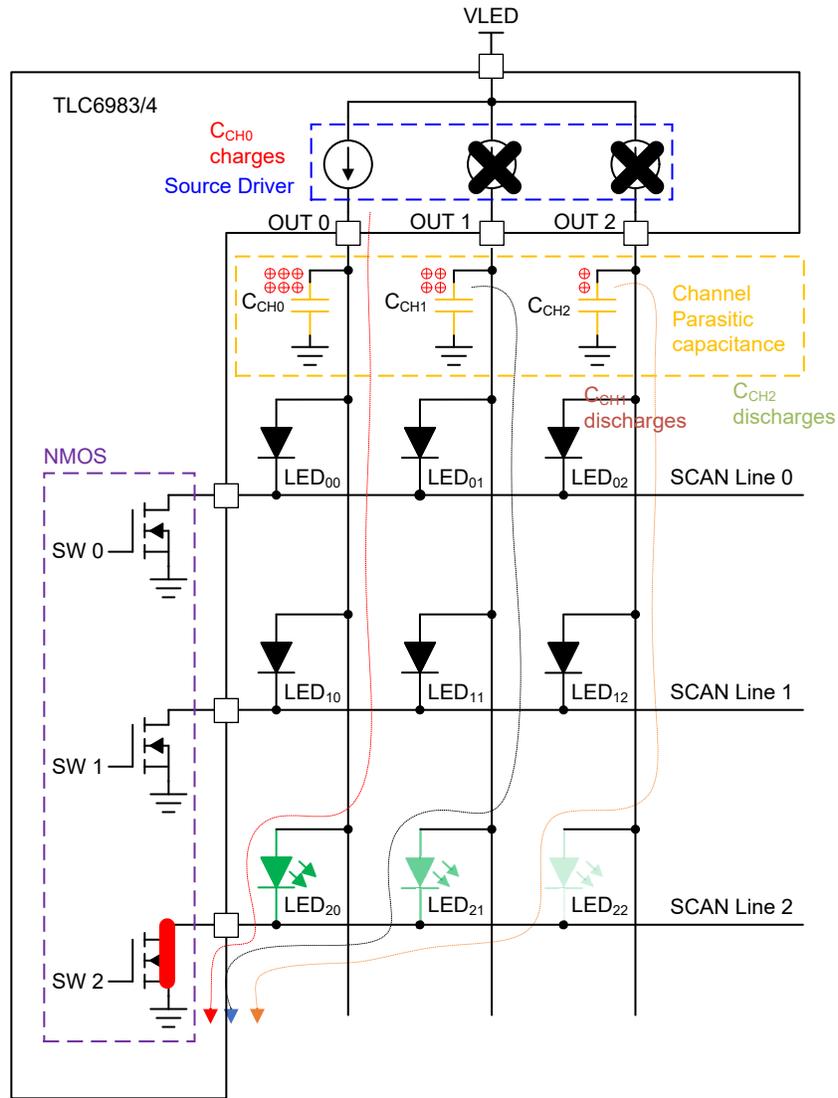


图 3-6. 下重影 - P3 操作

如何解决该问题？我们知道，下重影是由于通道寄生电容上的电荷造成的。因此，如果我们能去除这些电荷，或许就能解决这个问题。

如图 3-7 所示，TLC698x 使用预放电电路来在线路开关期间将所有通道  $OUT_n$  都拉低至设定电平 ( $V_{pd}$ )，以保持下一个扫描线中的 LED 不会点亮，从而消除了下重影问题。

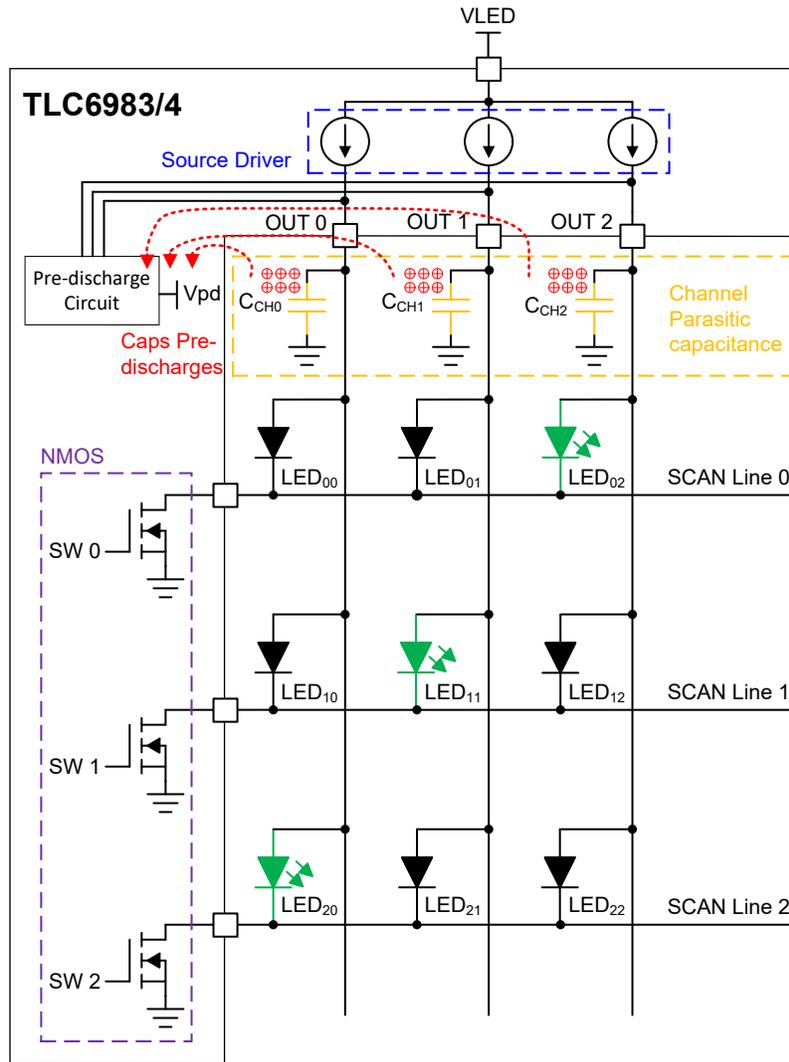


图 3-7. 通过预放电电路消除下重影

图 3-8 展示了有无下重影的比较演示。可以看到预放电电路效果良好。启用后，不再出现重影。

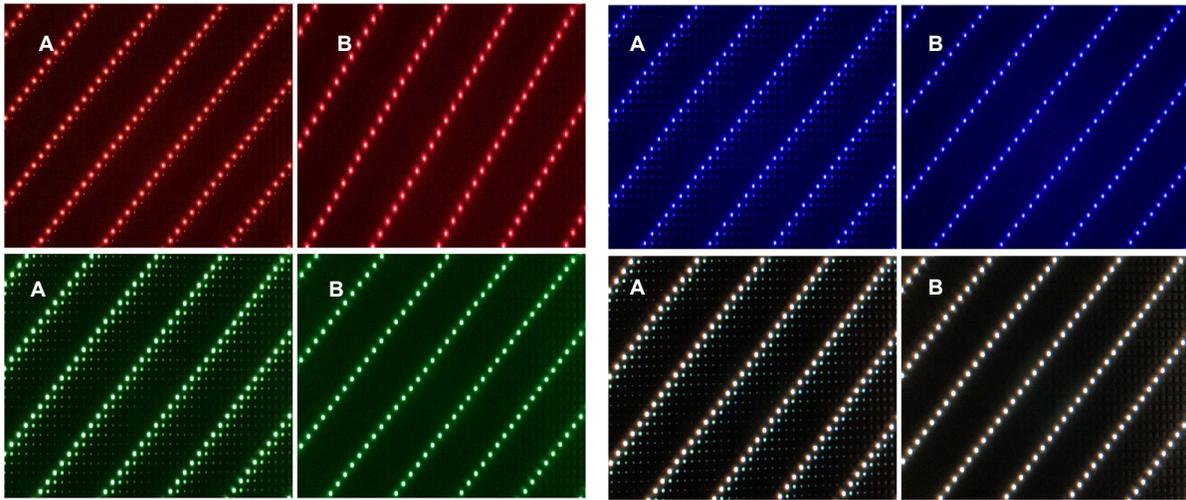


图 3-8. 下重影比较

- A. 有下重影
- B. 无下重影

### 3.1.2 上重影

实际上，上重影的根本原因分析与下重影部分讨论的分析相似。出现上重影的主要原因是， $SW_n$  上的寄生电容在扫描线切换期间累积了电荷，并通过 LED 充电，导致 LED 在不应点亮时意外点亮。图 3-9、图 3-10 和图 3-11 描述了上重影的根本原因分析。

在 P1 操作中，当只需要点亮  $LED_{02}$  时，驱动器会接通  $SW_0$ 。此时，扫描线 0 上的黄色寄生电容通过这些红色虚线的电流路径放电至 0。

在 P1 操作期间， $SW_0$  接通， $LED_{02}$  点亮。

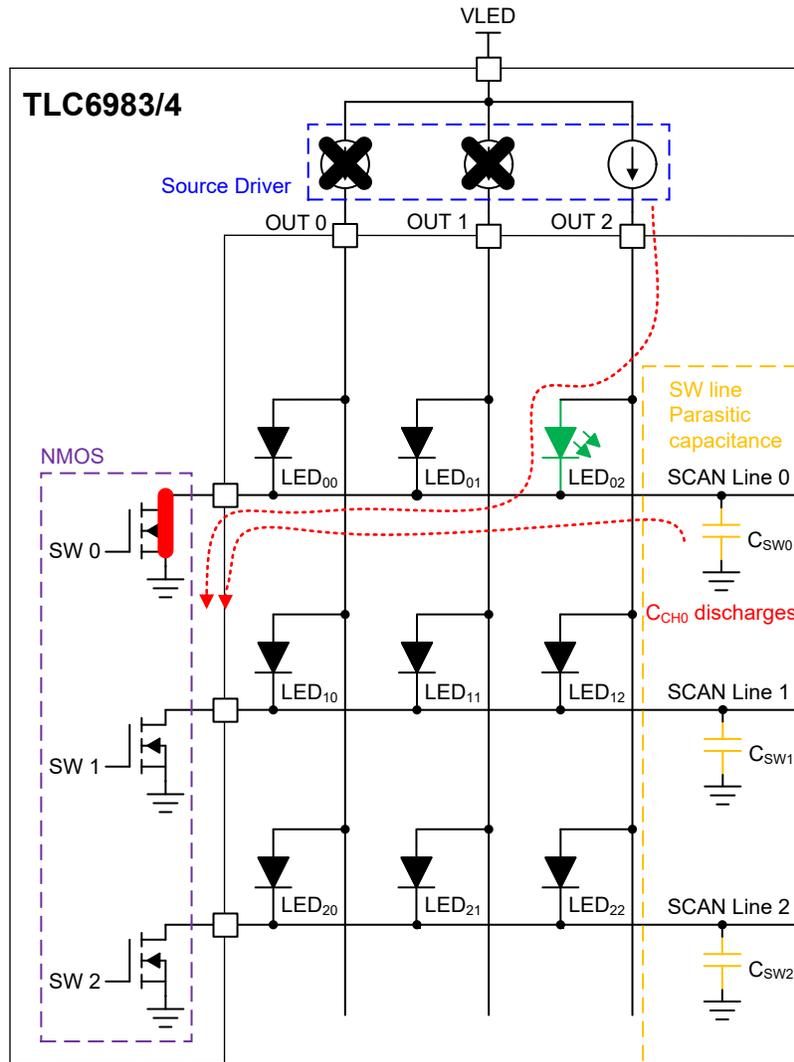


图 3-9. 上重影 - P1 操作

接下来，在 P2 操作中，当只需要点亮 LED<sub>11</sub> 时，驱动器将接通 SW<sub>1</sub>，扫描线 1 上的黄色寄生电容通过这些红色虚线的电流路径放电至 0。但是此时，扫描线 0 上的黄色寄生电容也会通过蓝色虚线的电流路径进行充电。因此，即使扫描线 0 已关闭，LED<sub>01</sub> 也会微弱地点亮。由于扫描线 0 上的寄生电容先前已放电，LED<sub>01</sub> 通过蓝色虚线的电流路径被点亮。因此，LED<sub>01</sub> 称为上重影。

在 P2 操作期间，SW<sub>1</sub> 接通，LED<sub>11</sub> 点亮，LED<sub>01</sub> 微弱地点亮。

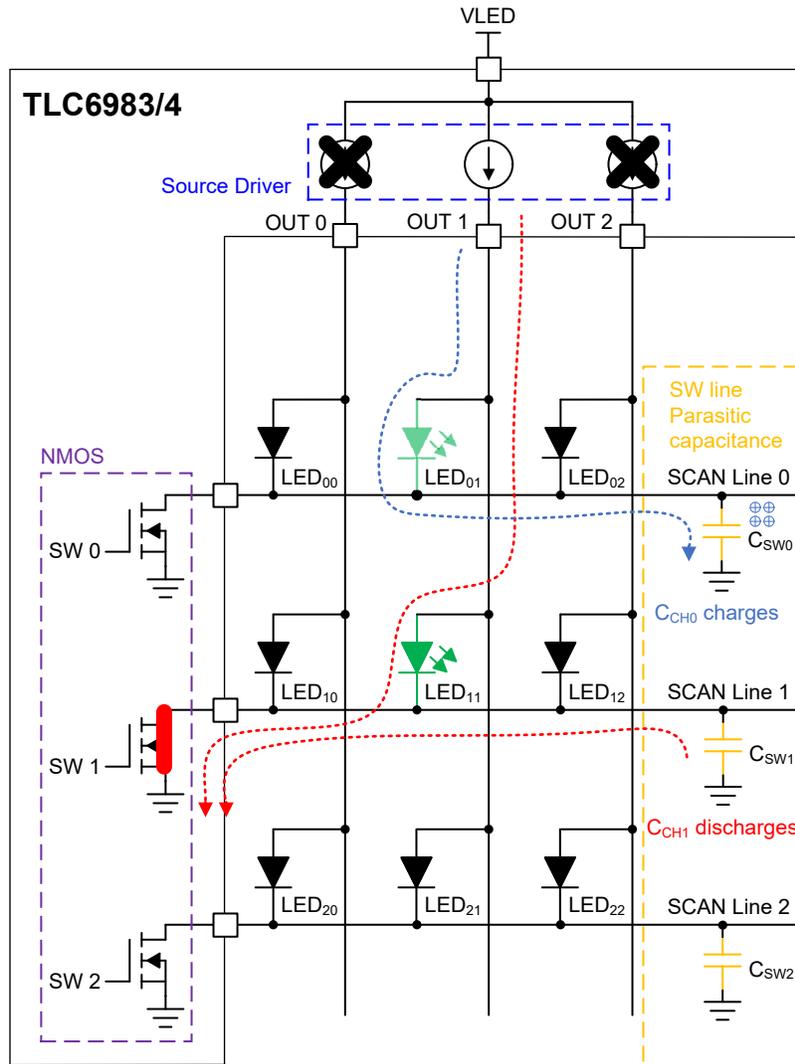


图 3-10. 上重影 - P2 操作

同样地，在 P3 操作中，当只需要点亮 LED<sub>20</sub> 时，可以看到 LED<sub>10</sub> 会微弱地点亮，而 LED<sub>00</sub> 则更微弱地点亮，分别通过蓝色和橙色虚线的电流路径。原因与之前相同，都是由于扫描线的寄生电容。

LED<sub>10</sub> 和 LED<sub>00</sub> 亮度不同的原因是对应扫描线的寄生电容在 LED 故障点亮之前积累了不同的电荷（不同数量的电荷流过 LED 来对相应扫描线的寄生电容充电）。

在 P3 操作期间，SW<sub>2</sub> 接通，LED<sub>20</sub> 点亮，LED<sub>10</sub> 微弱地点亮，LED<sub>00</sub> 则更微弱地点亮。

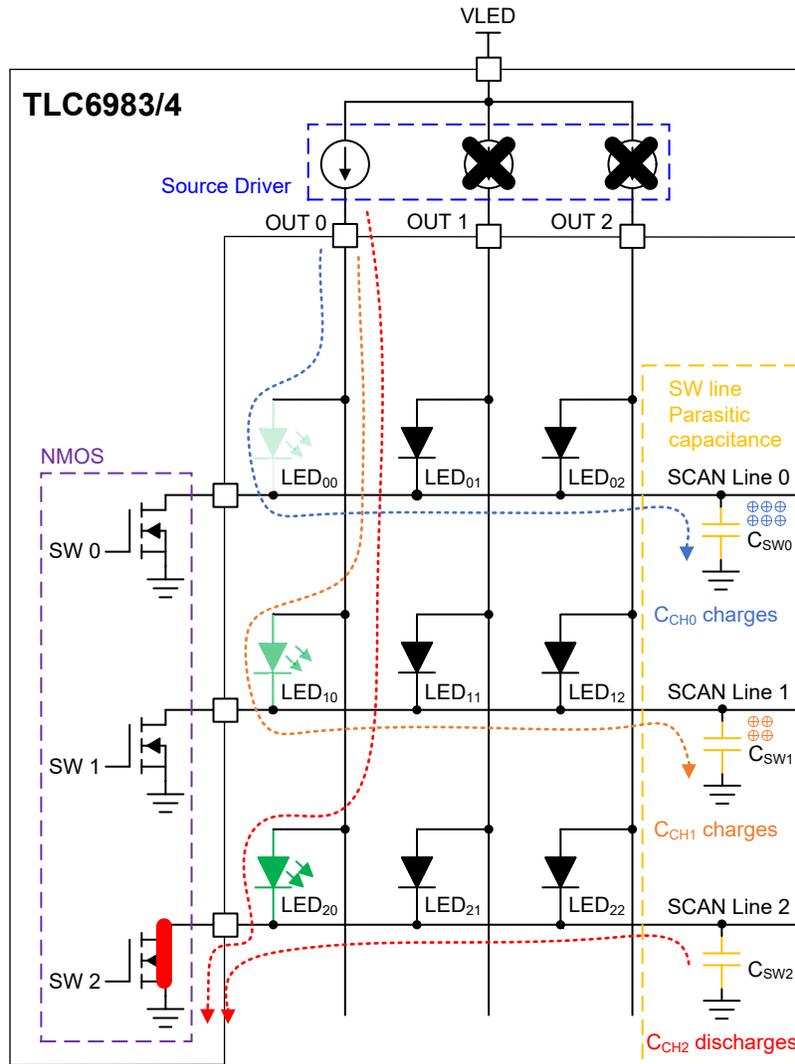


图 3-11. 上重影 - P3 操作

如何解决该问题？上重影是由于扫描线寄生电容的放电所致。因此，如果我们能停止或削弱放电过程，就能解决这个问题。

如图 3-12 所示，TLC698x 使用扫描线钳位电路在线路开关期间将线路电压上拉至高值 (Vclamp)，以确保没有电流流入前一条扫描线，从而消除上重影。

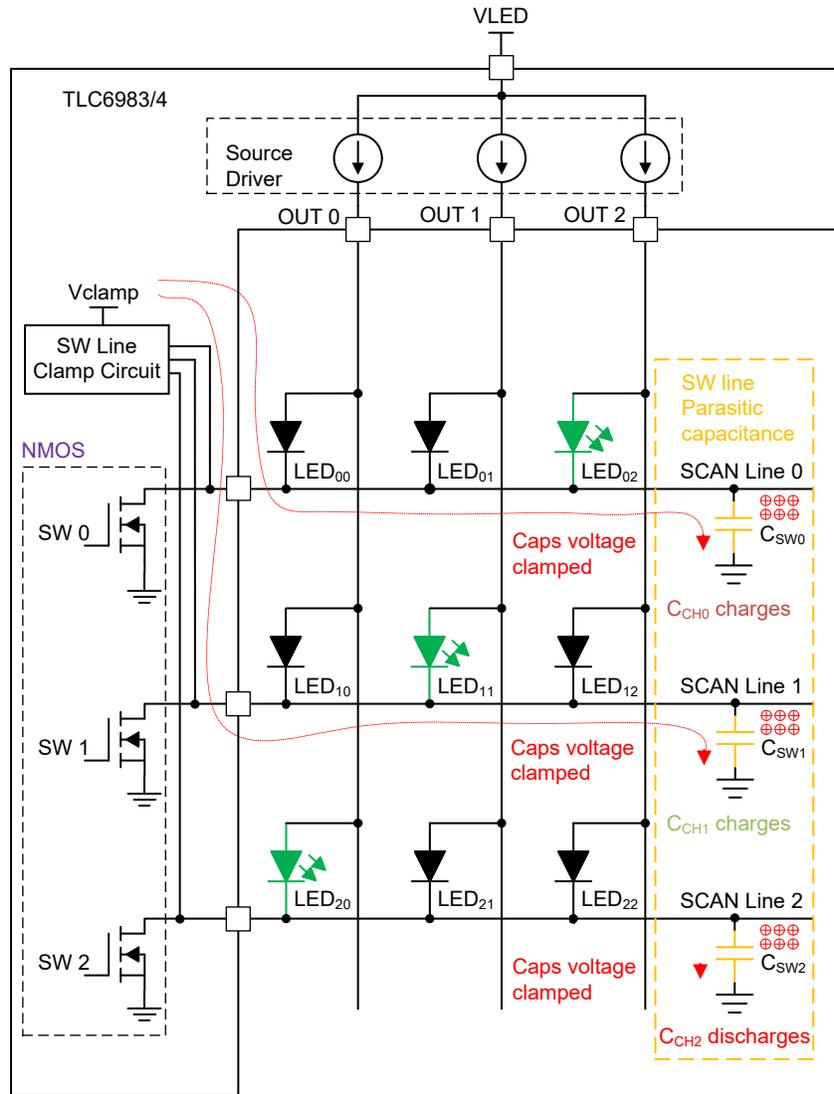


图 3-12. 通过 SW 线路钳位电路消除上重影

图 3-13 展示了有无上重影的比较演示。可以看到钳位电路效果良好。启用该功能后，不再出现重影。

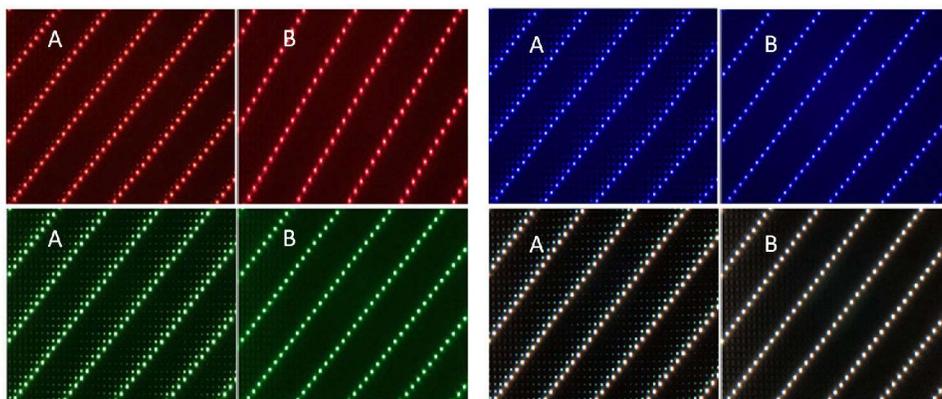


图 3-13. 有无上重影的比较演示

- A. 有上重影
- B. 无上重影

## 3.2 耦合问题

耦合是指同一线路上和同一子块内 LED 的 LED 驱动器输出通道之间的相互干扰。这主要归因于通道和扫描线上的寄生电容以及 LED 之间的寄生电容。在高对比度图像中，这一问题更加明显。换句话说，当图像的高亮度区域靠近图像的低亮度区域时，问题会更加突出。例如，黑暗背景下的明亮物体，以及明亮环境中的物体阴影。

耦合有 2 种常见类型：亮度更大的耦合和亮度更暗的耦合，它们分别在图 3-14 和图 3-15 中进行了演示。亮度更大的耦合意味着高亮度区域会使低亮度区域变得更亮，而亮度更暗的耦合则相反。可以看到，区域 A 和 B 的行为应该与区域 D 类似。但实际上，区域 A 和 B 受到了区域 C 的影响。

在图 3-14 中，高亮度区域使低亮度区域变得更亮。区域 C 中明亮的水平参考线耦合区域 A 和 B 中的相应线条，导致这些线条比其他线条（例如区域 D 中的线条）更亮。

在图 3-15 中，低亮度区域会使高亮度区域变暗。较暗区域 C 耦合区域 A 和 B 耦合，导致这些区域中的线条比其他线条（例如区域 D 中的线条）更暗。

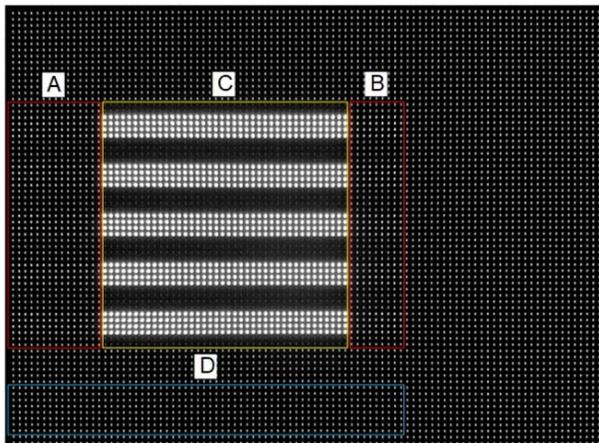


图 3-14. 亮度更大的耦合

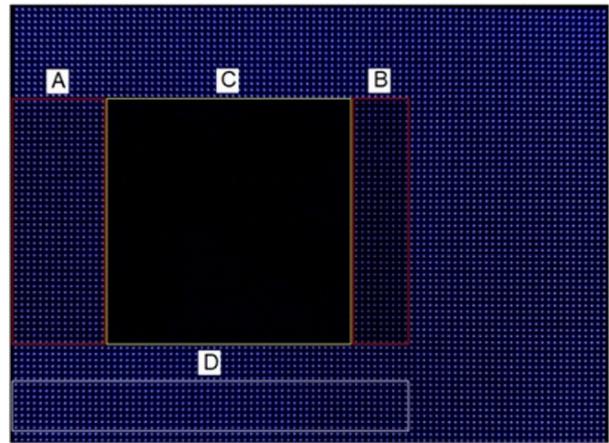


图 3-15. 亮度更暗的耦合

### 3.2.1 亮度更大的耦合

图 3-16 展示了亮度更大的耦合的根本原因分析。左侧子图展示了矩阵 LED 显示屏的完整电容建模。除了通道和扫描线上的寄生电容之外，该建模还考虑了 LED 上的寄生电容，这对于分析耦合问题至关重要。

中间子图显示了 LED<sub>01</sub> 亮起时的分析。LED<sub>01</sub> 亮起表示选择了通道 OUT<sub>1</sub> 和 SW<sub>0</sub>。绿色阴影区域表示选中的线路，而红色阴影区域则表示未选中的线路。

选中线路连接到地，而未选中线路悬空。此外，由于通道 OUT<sub>0</sub> 关闭，因此 LED<sub>00</sub> 的阳极也悬空。

为了进一步简化，这里将所有未选中线路的电容建模简化为右上方子图中所示的 3 个电容器。蓝色的 2 个电容器 C<sub>a\_N-1</sub> 和 C<sub>b\_N-1</sub> 代表 LED 的寄生电容。黄色的电容器 C<sub>sw\_N-1</sub> 表示扫描线的寄生电容。

由于扫描线的寄生电容远小于 LED 的寄生电容，这可以进一步简化建模，如右下方子图中所示。通过这种简化的建模，现在更清晰地展示了亮度更大的耦合的根本原因。当 LED<sub>01</sub> 通过红色虚线的电流路径被点亮时，LED<sub>01</sub> 阳极上的电压会增加一个增量。电容器上的电压不能突然变化。因此，阳极 LED<sub>00</sub> 上的电压耦合增加了另一个增量。这会导致 LED<sub>00</sub> 微弱地点亮，如蓝色虚线的电流路径所示。

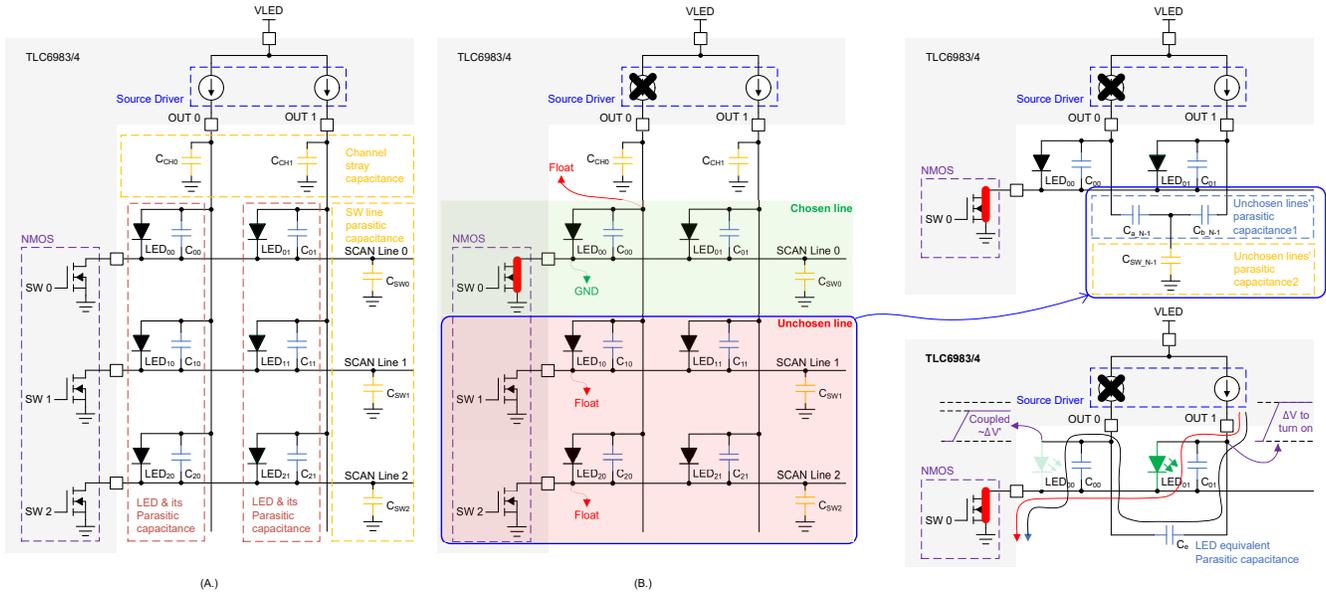


图 3-16. 偏亮重影的根本原因分析

- A. 矩阵 LED 显示屏的完整电容建模
- B. 选择了 SW<sub>0</sub> 和 OUT<sub>1</sub>

图 3-17 展示了 SPICE 中一个亮度更大的耦合仿真示例。从仿真结果可以看到，OUT<sub>0</sub> (蓝色曲线) 与 OUT<sub>1</sub> (绿色曲线) 耦合，并从 0V 斜升至大约 2.6V。该电压大于 LED 正向电压，因此可以使它点亮。LED<sub>0</sub> 的峰值电流约为 400uA。

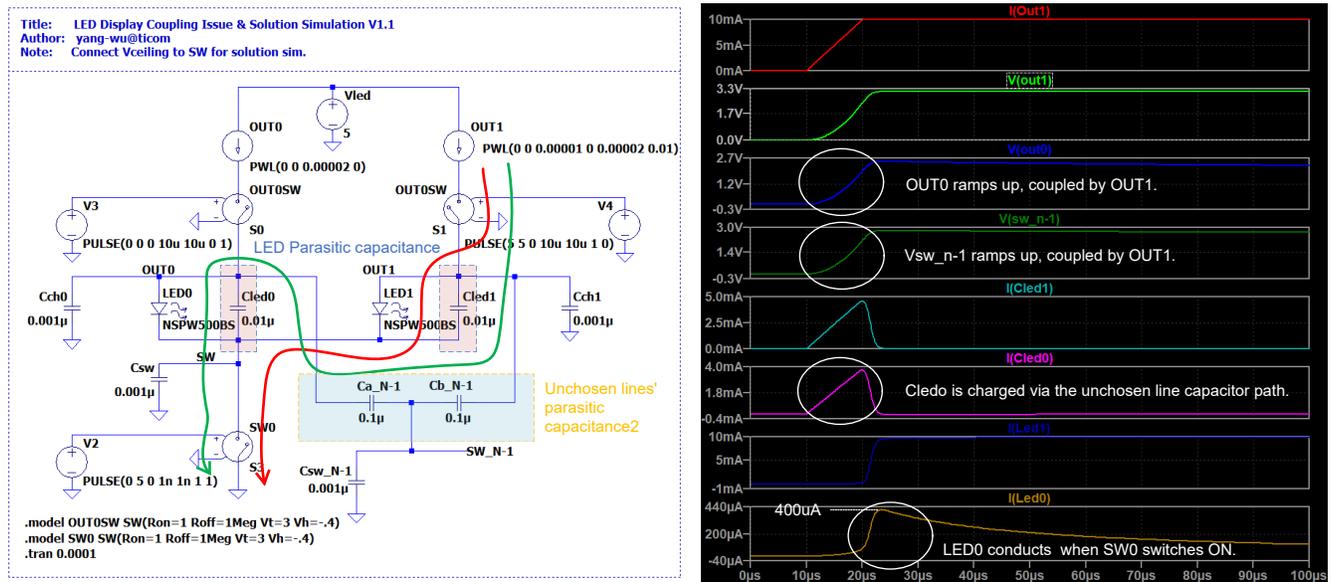


图 3-17. 亮度更大的耦合仿真

那么，如何解决亮度更大的耦合问题呢？根据之前的建模，未选中的线路是悬空的，这意味着未选中的线路容易受到可变电位的影响。假设我们可以使未选中线路上的电压保持在一定水平，会发生什么情况？实际上，这就是图 3-18 中所示的设计。这可以使未选中线路的电压被上限钳位到一个固定的电压，以隔离开关导通和关断通道，如 SW 线路上限电路块所示。现在可以看到，LED<sub>00</sub> 阳极上的电压保持恒定，不再发生耦合。

TLC698x 可以设置线路上限电压（线路钳位上限电压），以钳制扫描线上的最大电压电平，确保不应点亮的 LED 上的电压小于 LED 正向电压，从而消除亮度更大的耦合问题。

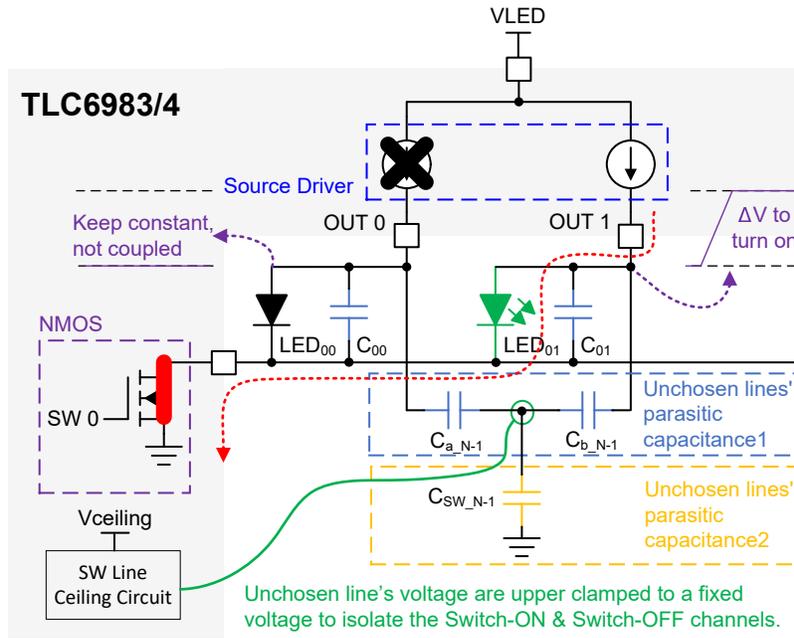


图 3-18. 通过 SW 线路上限电路消除亮度更大的耦合

线路上限不同于我们之前针对上重影问题讨论的 SW 线路钳位。为了进行区分，我们还将线路上限称为线路上限钳位，并将 SW 线路钳位称为线路下限钳位，如图 3-19 所示。

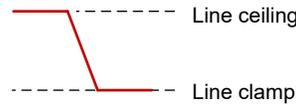


图 3-19. 线路上限和线路钳位

- A. 用于消除亮度更大的耦合问题的线路上限
- B. 用于消除上重影问题的线路下限钳位

图 3-20 展示了 SPICE 中的线路上限仿真示例。从仿真结果可以看出，钳位方法效果良好，LED<sub>0</sub> 未因耦合而点亮。

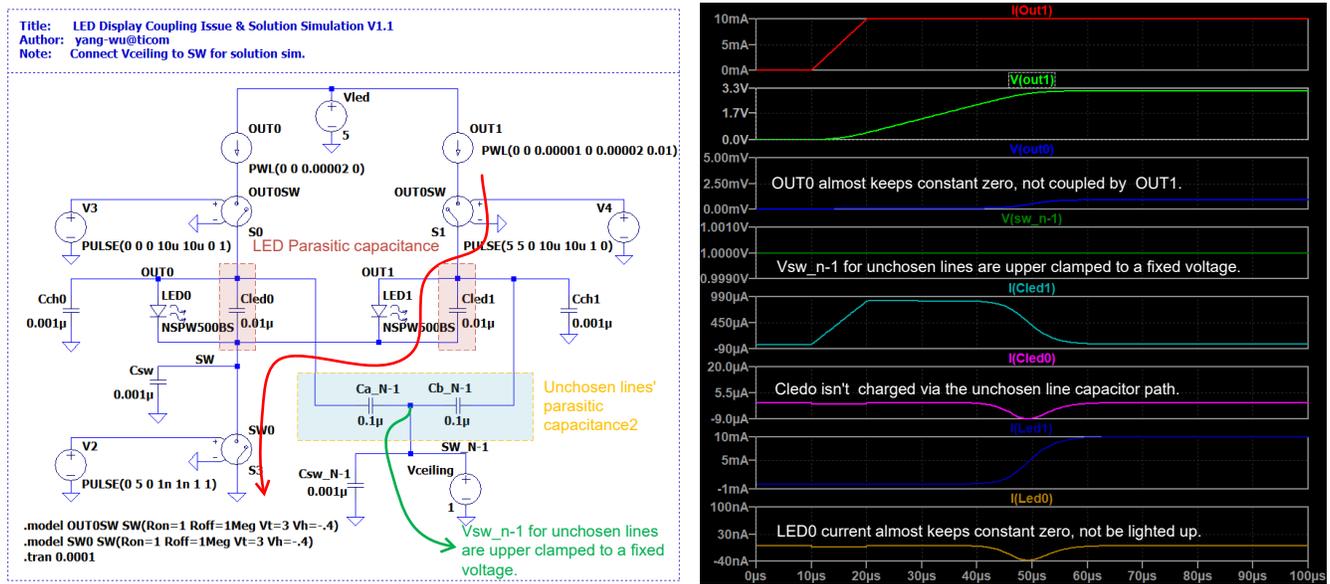


图 3-20. 线路上限仿真

图 3-21 和图 3-22 展示了存在或不存在亮度更大耦合情况下的比较演示。区域 C 中明亮的水平网格线耦合区域 A 和 B 中的相应线条，导致这些线条比其他线条（例如区域 D 中的线条）更亮。较暗区域 A 和 B 与高灰度区域 C 耦合，从而变得更亮。启用该功能后，不再看到耦合问题。

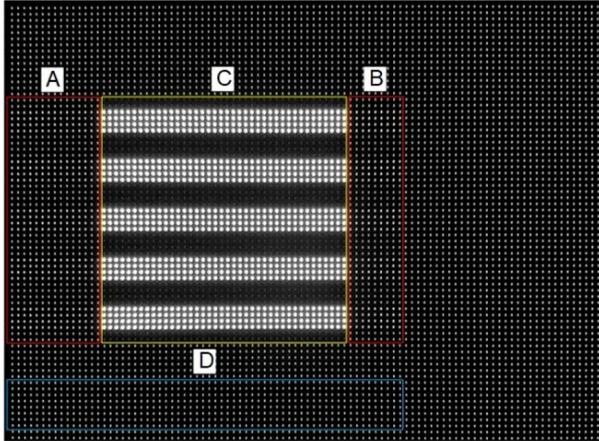


图 3-21. 存在亮度更大的耦合

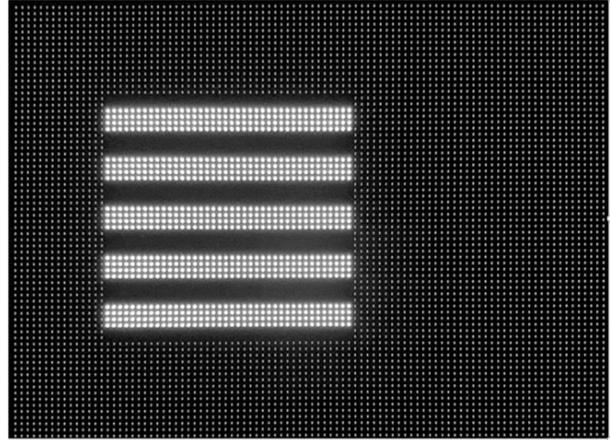


图 3-22. 不存在亮度更大的耦合

### 3.2.2 亮度更暗的耦合

前面的部分中已经讨论了亮度更大的耦合。相比之下，亮度更暗的耦合更容易解决。

本质上，亮度更暗的耦合与亮度更大的耦合是相反的。两者的根本原因实际上是相同的。图 3-23 展示了亮度更暗的耦合的根本原因分析。OUT<sub>1</sub> 的电荷应该完全流向 LED<sub>01</sub>（以及寄生电容 C<sub>01</sub>），如红色虚线的电流路径所示，但由 LED<sub>00</sub>（和寄生电容 C<sub>00</sub>）共享，如蓝色虚线的电流路径所示。因此，LED<sub>01</sub> 看起来比平常更暗。

尽管亮度更暗的耦合与亮度更大的耦合具有相同的根本原因，但解决这两种问题的设计有所不同。具体设计如图 3-24 和图 3-25 所示。

LED<sub>01</sub> 通常通过红色虚线所示的电流路径点亮。然而，LED<sub>01</sub> 还在 OUT<sub>0</sub> 上设置了一个虚拟的上升单稳态，这会产一次虚假的开关导通，用于实现亮度更暗的耦合补偿。在这个短暂的虚假开关导通期间，LED<sub>00</sub> 的寄生电容充电。但在这个充电过程中（称为虚拟上升单稳态），该 LED 并不会点亮。

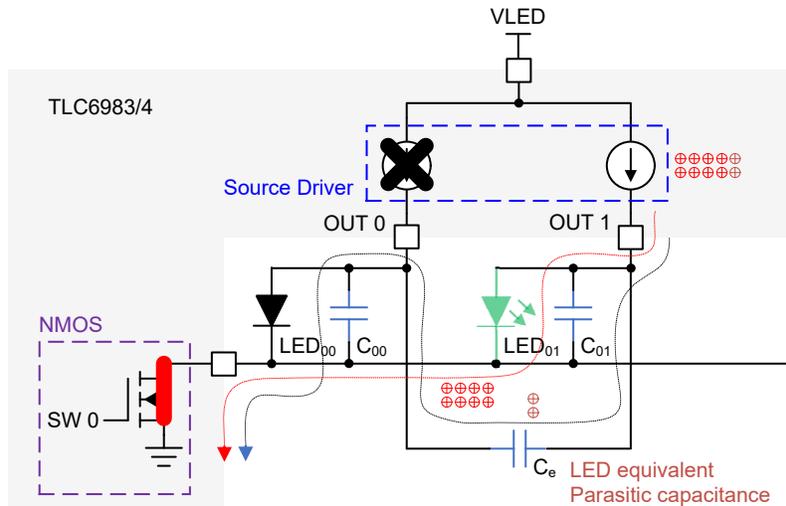


图 3-23. 亮度更暗的耦合的根本原因分析

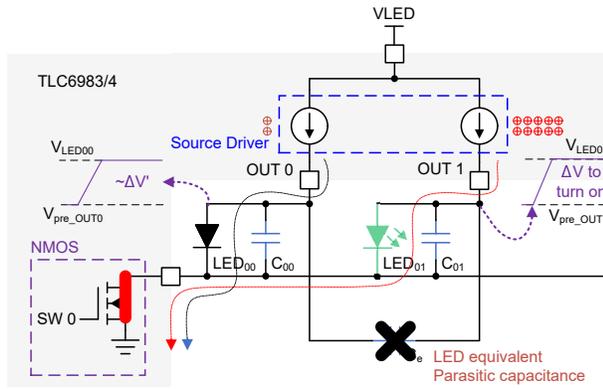


图 3-24. 亮度更暗的耦合消除分析

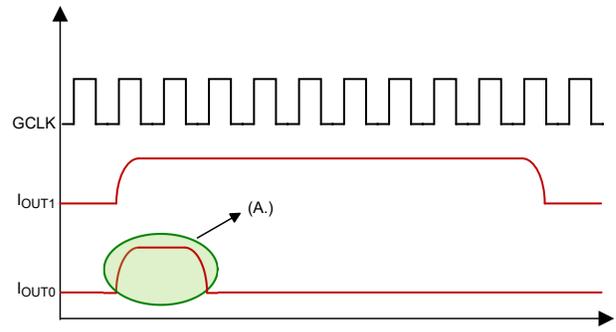


图 3-25. 通过虚拟上升单稳态消除亮度更暗的耦合

- A. 在 OUT0 上设置一个虚拟上升单稳态，以实现亮度更暗的耦合补偿。短暂的虚假开关接通时间会为 LED 的寄生电容充电，但 LED 并不会真正点亮，因此称之为虚拟触发。
- B. 存在亮度更暗的耦合
- C. 不存在亮度更暗的耦合

线路上限用于消除亮度更大的耦合，而虚拟上升单稳态用于消除亮度更暗的耦合。为什么不能只使用其中之一来解决这两个问题？实际上，由于钳位电路的强度，线路上限无法完全解决亮度更暗的耦合问题。虚拟上升单稳态无法解决更亮的问题，并且会因为未选中的线路处于悬空状态而使问题变得更严重。

图 3-26 展示了存在或不存在亮度更暗的耦合的比较演示。可以看到线路上限电路效果良好。启用后，不再出现耦合。

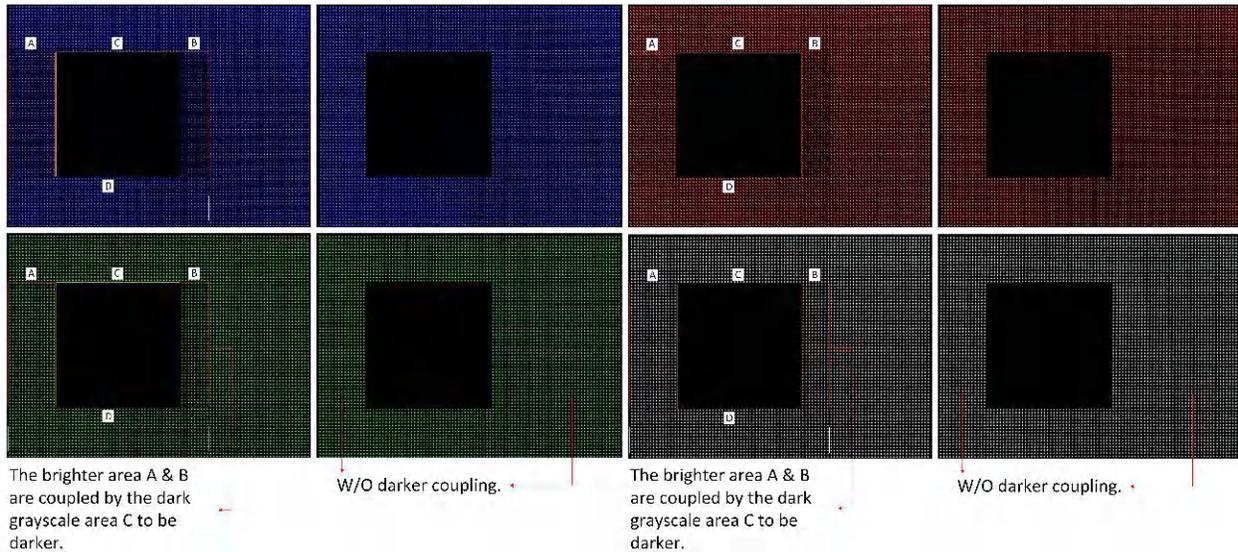


图 3-26. 存在或不存在亮度更暗的耦合的比较演示

### 3.3 低灰度不均匀问题

低灰度图像的显示性能对 NPP LED 显示屏也非常重要。显示性能是指在低亮度和低灰度条件下展示丰富色深图像的能力。为什么需要在低亮度下？这是因为人眼的特性。

根据韦伯定律，人眼对自然亮度的感知是非线性的。这意味着人眼对低亮度的变化非常敏感，而对高亮度的变化不敏感，如图 3-27 所示。

在室内 NPP LED 显示应用中，显示亮度不会很高，以保证人眼观看时的舒适性。因此，低亮度下呈现丰富色深图像的能力至关重要。不过，低灰度不均匀是一个常见问题。

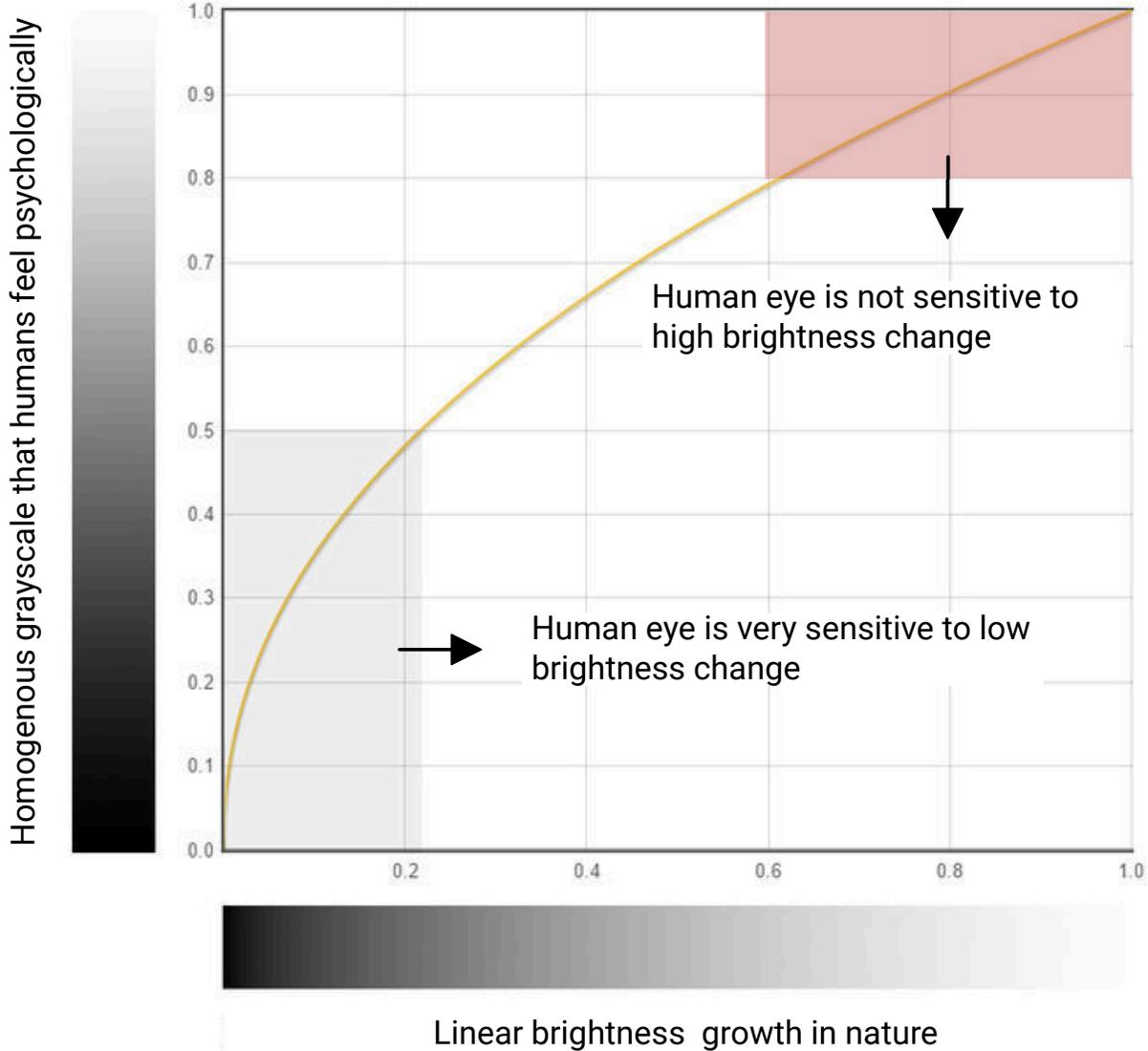


图 3-27. 人眼对自然亮度的感知

低灰度不均匀是指 LED 像素亮度彼此不同 ( 不均匀 )。当图像处于低亮度和低灰度条件下时，这种效果更容易被人眼观察到。

图 3-28 和图 3-29 中展示了 2 种低灰度不均匀效果。器件间 (D2D) 的亮度不均匀会使屏幕看起来很脏。像素间 (P2P) 的亮度不均匀会使屏幕看起来模糊。

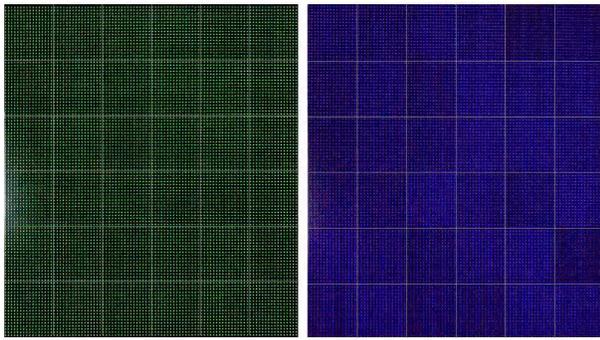


图 3-28. 器件间 (D2D) 的低灰度不均匀效果

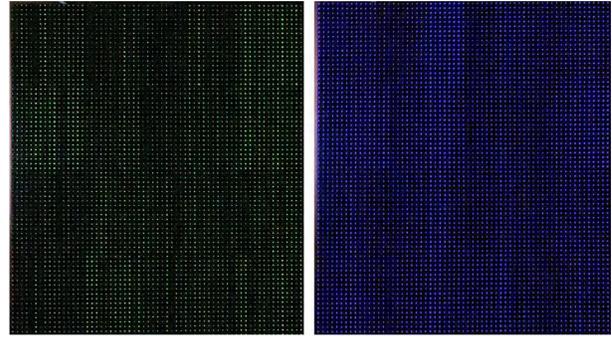


图 3-29. 像素间 (P2P) 的低灰度不均匀效果

器件间的低灰度不均匀是因为 LED 驱动器的恒流源在器件之间存在差异，导致驱动电流有所不同，如图 3-30 所示。

像素间的低灰度不均匀是由于 LED 在生产过程中存在像素间变化、性能离散性和通道间布局差异。即使在相同的驱动电流下，这种不均匀性也会导致 LED 亮度有所不同。LED 生产和性能离散性如图 3-31 所示，请参阅 [Variability in LED Production and the Impact on Performance](#) (LED 生产中的可变性及其对性能的影响)，以获得更多信息。

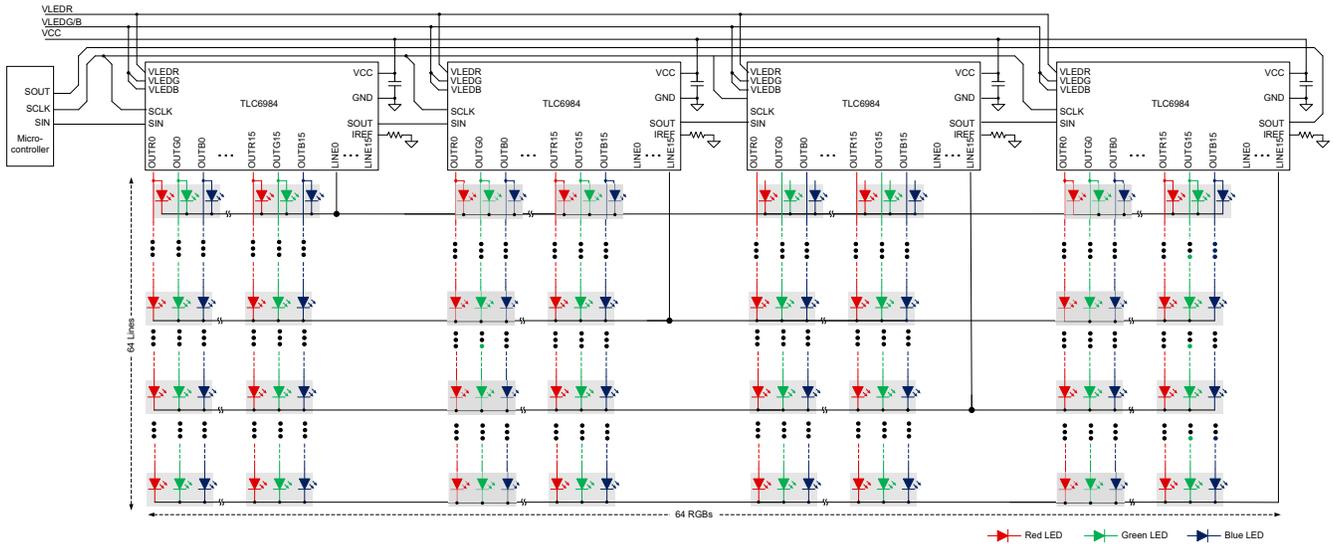
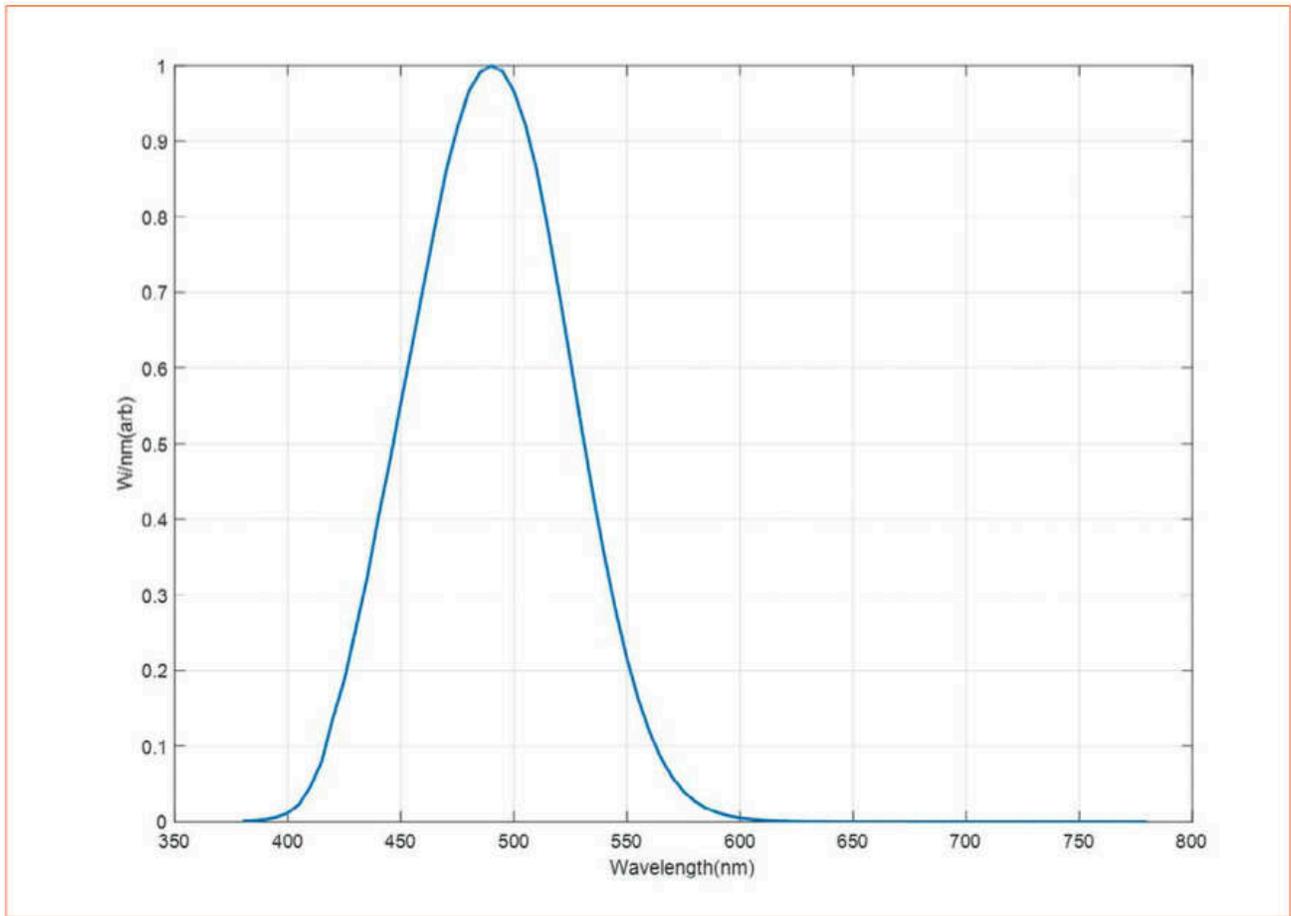


图 3-30. LED 驱动器恒流源的器件间差异

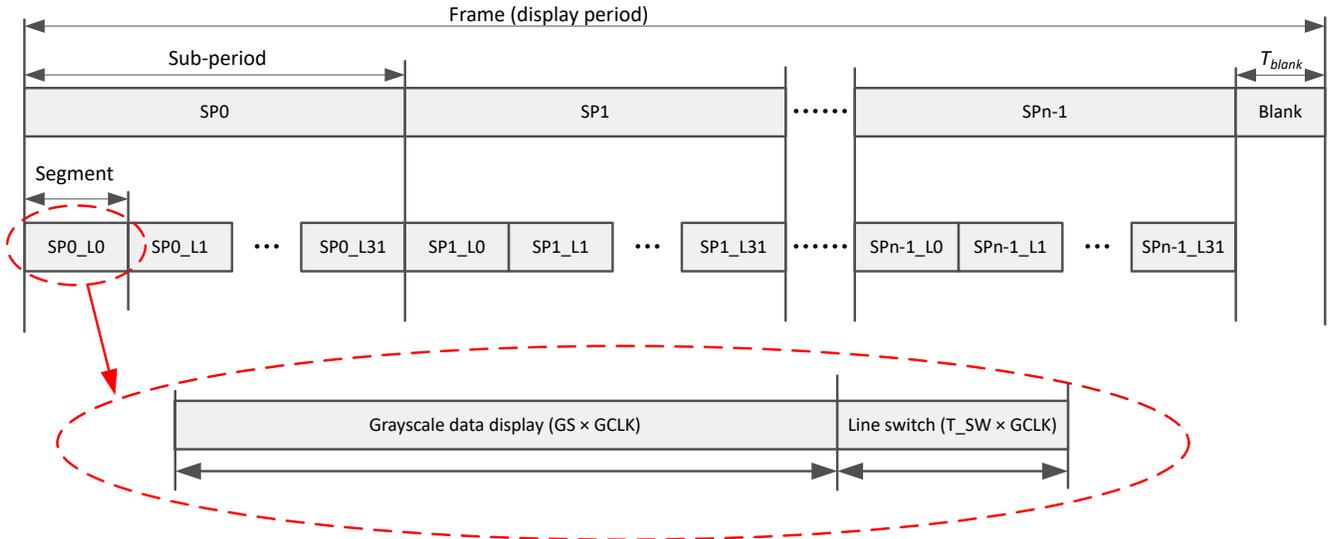


**图 3-31. LED 生产和性能离散性的可变性**

对于大多数亮度高于 600 尼特的 NPP 显示产品，低灰度不均匀不会像以前显示的那样糟糕，甚至可能观察不到。对于驱动电流非常低（约 200/300uA）的低亮度（48 尼特）应用（例如 LED 影院屏幕），低灰度不均匀可能会成为一个挑战，因为在极低电流下，电流源误差会显著增加。幸运的是，TI 的 LED 显示驱动器 TLC698x 具有非常低的 D2D 变化，典型值为  $\pm 0.5\%$ ，最大值为  $\pm 2\%$ 。

那么，如何解决低灰度不均匀问题呢？

图 3-32 展示了 TLC698x 的动态频谱脉宽调制 (DS-PWM) 算法。整个帧被拆分成多个子周期。在每个子周期中，所有扫描线依次点亮。为了实现超低亮度，LED 驱动器必须能够输出非常短的电脉冲（1 个 GCLK 时间）。然而，由于 LED 的寄生电容，这样的脉冲甚至几个脉冲可能无法将 LED 点亮。GCLK 频率越高，点亮 LED 就变得越困难。



Note that, SP0: Sub-period 0, L0: Scan line 0

图 3-32. TLC698x 的 DS-PWM 算法

如前所述，人们观察到不均匀的原因是人眼对低亮度的变化非常敏感，这意味着稍微提高一点亮度就能欺骗人眼，使图像看起来是均匀的。

因此，解决低灰度不均匀的方法如图 3-33 所示。通常，LED 电流以红色脉冲显示。TLC698x 具有低灰度增强功能，通过延长所有 GS 数据每个子周期的导通时间，来补偿 LED 寄生电容的电荷损耗并解决不均匀问题，如绿色阴影块所示。请注意，此功能不会超过灰度的上限。这是针对所有灰度的全局补偿，而不仅仅是针对低灰度的局部补偿。

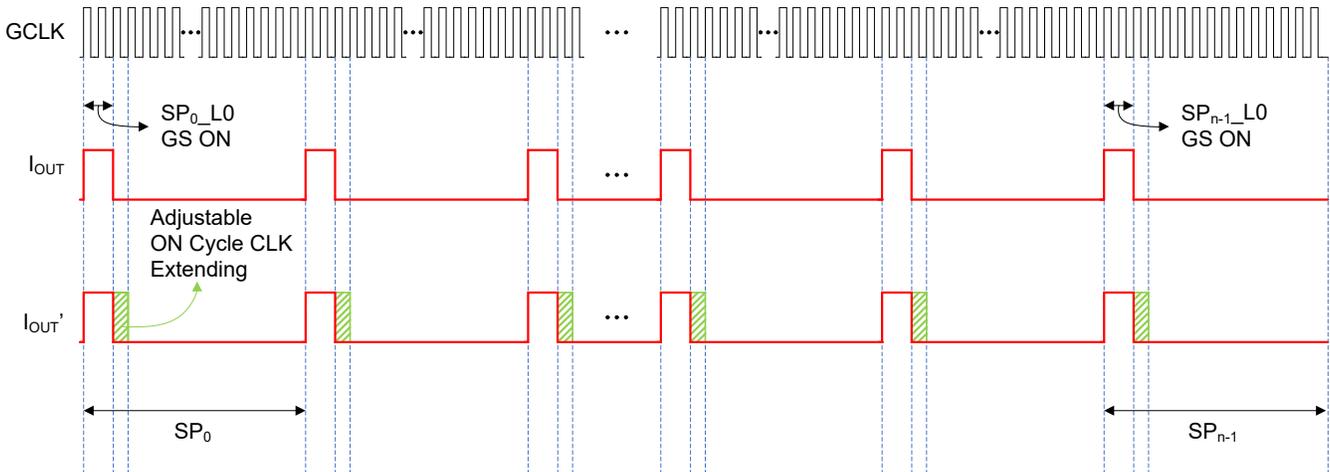


图 3-33. 通过延长导通周期时钟解决低灰度不均匀问题

图 3-34 和图 3-35 展示了具有或不具有低灰度不均匀的比较演示。导通周期时钟延长算法效果非常好。启用后，显示效果得到了改善。

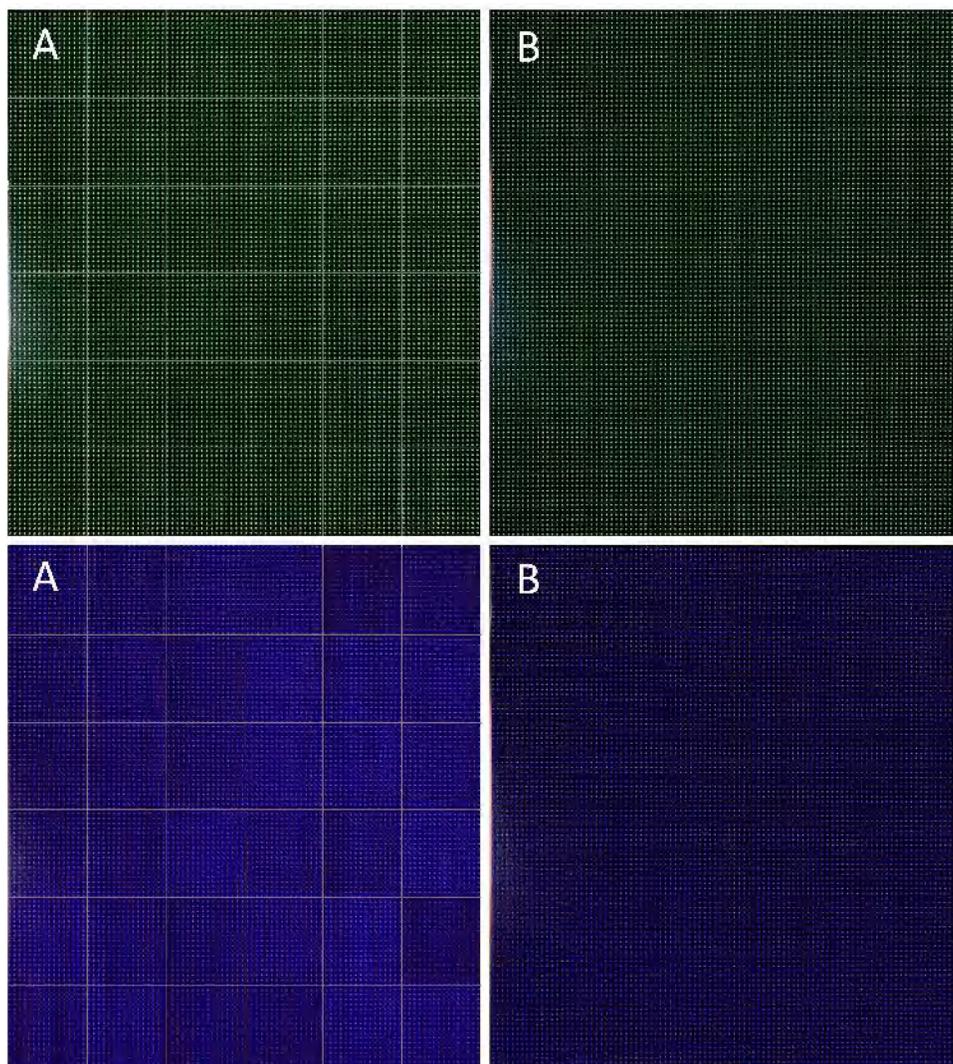


图 3-34. 存在或不存在 D2D 低灰度不均匀的比较演示

- A. 存在 D2D 低灰度不均匀
- B. 不存在 D2D 低灰度不均匀
- C. 存在 P2P 低灰度不均匀
- D. 不存在 P2P 低灰度不均匀

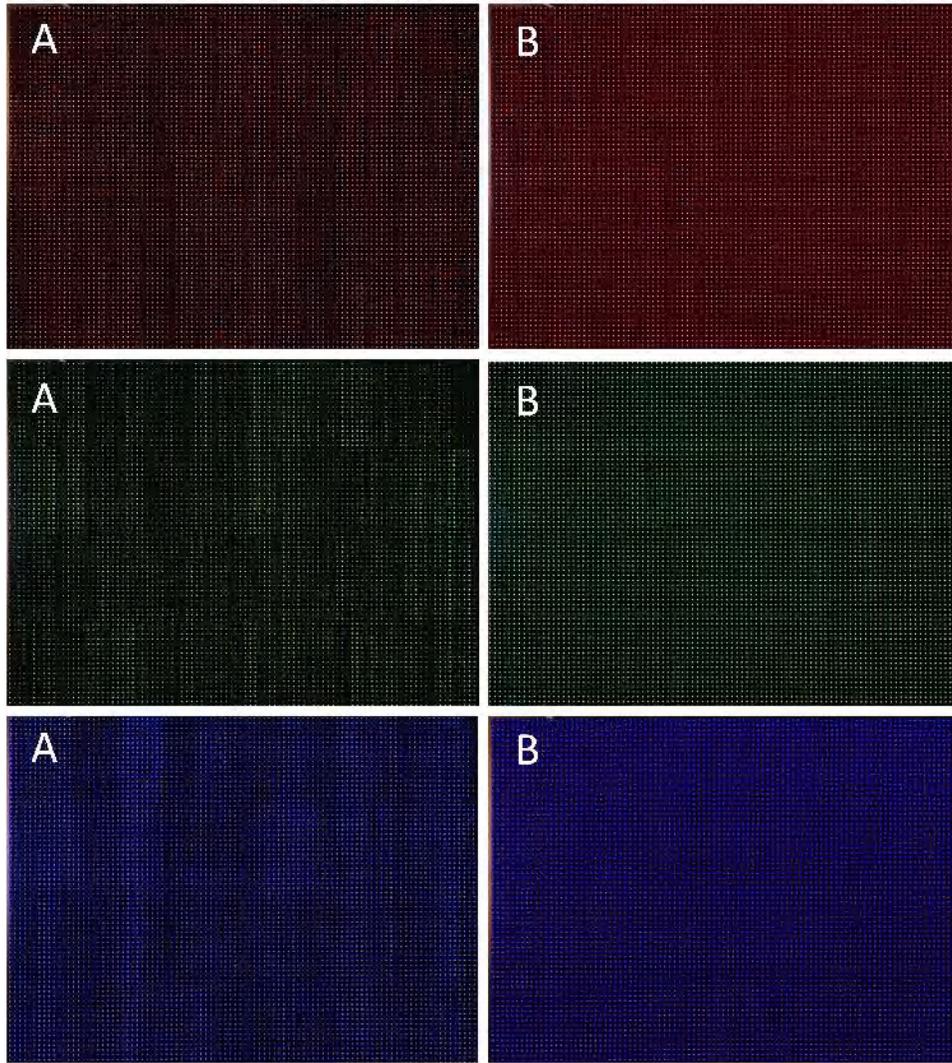


图 3-35. 存在或不存在 P2P 低灰度不均匀的比较演示

## 4 总结

本应用手册首先全面介绍了显示技术、LED 驱动器拓扑、矩阵 LED 显示驱动器架构和系统。然后，本文档基于 TI 新款共阴极矩阵 LED 显示驱动器 [TLC6983](#) 和 [TLC6984](#)，从 IC 电路和算法角度更深入地探讨了几个典型 LED 显示挑战的根本原因和相关设计解决方案，这有助于工程师正确理解和使用矩阵 LED 显示驱动器。

## 5 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [TLC6983 具有超低功耗的 48x16 共阴极矩阵 LED 显示驱动器 数据表](#)
2. 德州仪器 (TI), [窄像素间距矩阵 LED 显示屏中的常见 LED 显示挑战](#)
3. Intel, [What Is Refresh Rate and Why Is It Important](#)
4. Vox, [LED green screen for virtual production](#)
5. LG, [LED Cinema Screen](#)
6. Samsung, [LED commercial display](#)
7. 德州仪器 (TI), [汽车动态柔性尾灯](#)
8. LED Professional, [Variability in LED Production and the Impact on Performance](#)

## 重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司