

用于驾乘监控应用的 25 W 峰值功率脉冲近红外 LED 驱动器

TND6416/D

引言

驾驶员监控系统 (DMS) 是通过检测驾驶员分心、疲劳或反应迟钝来帮助提高驾驶员和乘客安全的关键系统之一。近年来, 由于新立法的实施, 包括欧盟通用安全条例和欧洲新车评估计划 (Euro NCAP) 发布的安全技术路线图, 为实现五星级安全评级, 对 DMS 的需求显著增加。在现实世界中, 要使驾驶员监控系统可靠, 需要考虑许多因素。常见的要求是 DMS 能在诸如下列条件中正常发挥功能:

- 照明: 夜间 1 Lux 至白天 100k Lux
- 带眼镜: 透光率 >70% 的透明眼镜和太阳镜
- 面部遮挡: 口罩、帽子、长长的刘海遮住了眼睛

为确保在不同驾驶场景下的稳健运行, DMS 系统采用了近红外 (NIR) 照明。在大约 940 nm 的窄光谱带下工作是当今最常见的设计选择。与 850 nm 等其他波长相比, 在 940 nm 下工作有几个优点。940 nm 提供更少的环境阳光干扰, 并有助于显著减少在 850 nm 处明显的“红光效应”。在 940 nm 下工作时的主要挑战是图像传感器的量子效率随着波长的增加 (即从 850 nm 增加到 940 nm) 而下降。与垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 等其他新兴技术相比, 功率 LED 由于具有良好的性价比, 仍然是近红外照明最常见的设计选择。需要注意的重要一点是, 人眼虽然看不见 940 nm 的光, 但在更高功率下可能对人眼有害。符合 IEC 62471 眼睛安全标准对于 DMS 的运作至关重要。具有嵌入式眼睛安全和诊断功能的 LED 驱动器 (如 [NCV7694](#)) 与没有专门的眼睛安全防护功能的其他集

成度较低的近红外 LED 驱动器相比, 可以显著简化设计, 并在解决方案成本和 PCB 空间方面带来优势。

有多种驱动器拓扑结构用于为 DMS 应用中的近红外 LED 供电。为选出最合适的拓扑结构, 需要考虑特定的原始设备制造商 (OEM) 系统要求。一种常见的方法是从预调节电压源 (例如降压、降压-升压或单端初级电感转换器 (SEPIC) 调节器) 为 LED 供电, 并使用低压降电流调节器作为第二级, 以保持 LED 电流在不断变化的环境条件和 LED 制造公差范围内保持不变。本参考设计中考虑了此类拓扑结构。就系统中近红外照明的位置而言, 位置取决于特定的 OEM 要求, 但通常将其嵌入 DMS 摄像头单元或作为与摄像头单元分开的独立单元实施。

在 DMS 系统中驱动近红外 LED 的一种常见方法是产生近红外光能含量高的短时、高电流脉冲。这种方法有助于克服与外部照明环境、眼镜使用等相关的挑战。

图 1 中的时序图展示了 DMS 系统中近红外照明和全局快门图像传感器之间的典型时序关系。为了获得理想性能, 近红外 LED 与图像传感器帧曝光时间同步。这是在来自图像传感器 SoC 的专用 FLASH 频闪控制信号的帮助下完成的。LED 仅在整个帧时间的一小部分被激活以节省用电。在图 1 所示的例子中, LED 开启占空比为 3%。这种系统中的近红外照明需要能够提供具有大光功率的短脉冲, 但平均输出功率相对较低。本文中描述的参考设计示例基于 2 个 SFH 4725AS 功率 LED, 每个 LED 在 60 fps 下以 4 A、500 μ s 的突发驱动。因此, 该设计能以 0.74 W 的平均功率提供 25 W 的功率突发。

TND6416/D

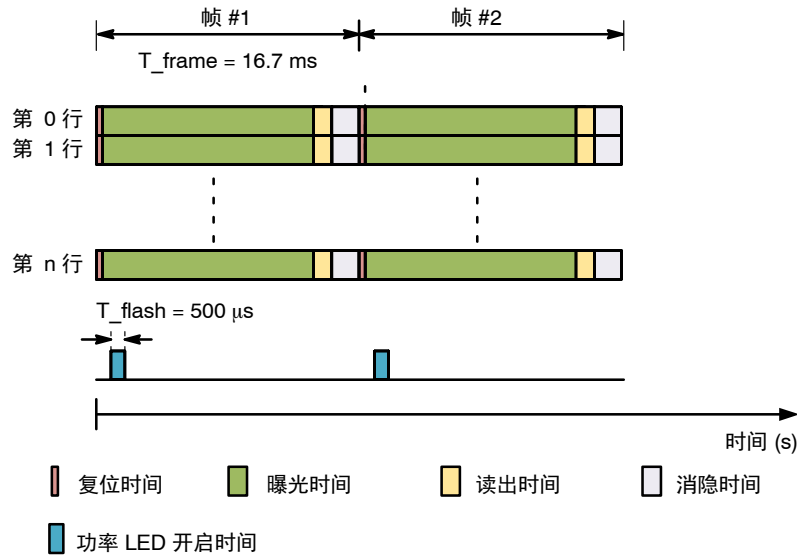


图 1. DMS 中近红外照明和图像传感器之间的时序关系

图 2 显示了 DMS 应用的框图，该应用将近红外照明和 DMS 摄像头集成到一个单元中，并通过同轴电缆供电 (POC)。通过 POC，图像传感器捕获的图像数据、I²C 数据、诊断数据和电力都使用一根同轴电缆一起传输。这种方法有助于降低布线成本和重量。ECU 和摄像头端的电源和数据分离由电源路径中使用的无源滤波器网络和数据路径中使用的去耦电容器网

络完成。使用 POC 方法，可以限制从 ECU 传送到摄像头的最大电流。通常，POC 中使用的同轴电缆具有每米约 2.3Ω 的环路电阻，这就是为什么较大的电流会在电缆中产生较大损耗的原因。此外，POC 电感器的额定电流通常限制在 1 A 以下，即较大的电流会导致其磁饱和。

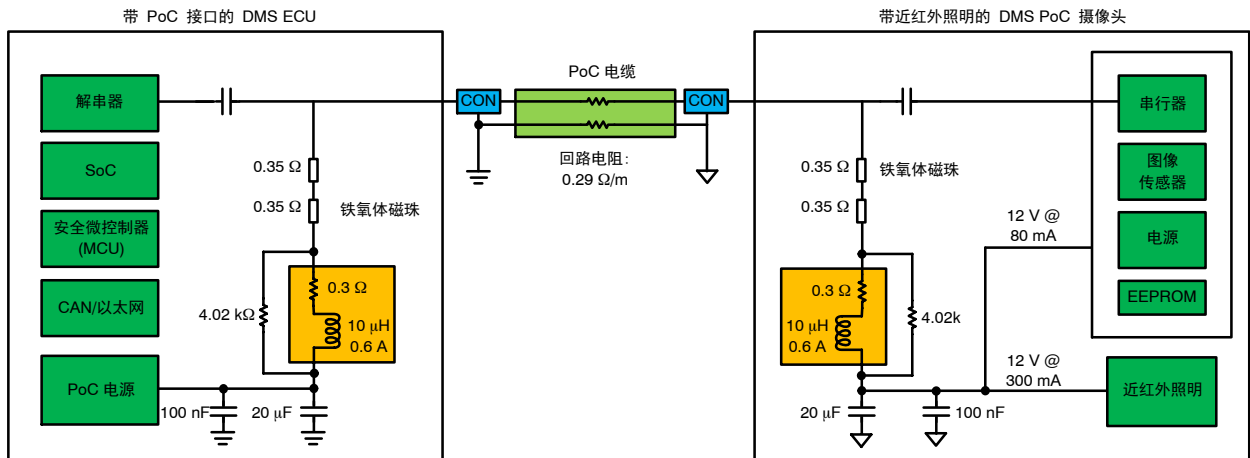


图 2. 带有集成近红外 LED 驱动器的 PoC DMS 摄像头

为了保护同轴电缆和 POC 滤波器组件免受过大电流的影响，在近红外 LED 电流脉冲期间，POC 供电的近红外照明应包含一个限流电路，将 POC 电流限制在

安全水平，并包含一个本地能量缓冲器来支持大的 LED 电流脉冲。该参考设计将更详细地演示如何设计此类系统。

TND6416/D

NCV7694 参考设计概述

图 3 显示了参考设计 PCB 的 3D 渲染图。它还突出显示了设计中使用的主要组件并描述了外部连接。

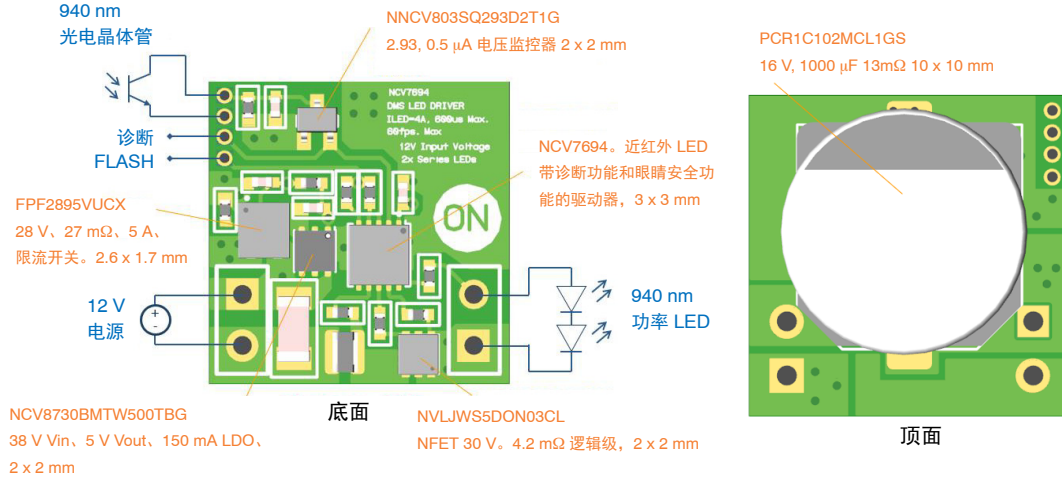


图 3. NCV7694 参考设计 PCB 概述

表 1 总结了参考设计的规范:

表 1. NCV7694 参考设计的规范

POC 电压规范	12 V ±5%
成像帧率	30–60 fps
脉冲输出 (LED) 电流	4 A
输入电流限制	500 mA 典型值
串联 LED 数量	2
LED 电流脉冲持续时间	最多 500 μs
LED 波长	940 nm
驾驶员接近感应	30 cm 典型值
环境温度	-40°C 至 +85°C
诊断和保护功能	LED 灯串开路 LED 灯串短路 最大 LED 电流脉冲宽度限制为 572 μs 最大 LED 电流脉冲频率限制为 74 fps
FLASH 信号电平	1.8 V 逻辑兼容输入
诊断输出	5 V 逻辑输出
初始启动时间	28 ms 典型值
兼容的功率 LED	使用 Osram SFH 4725AS 进行的评估
PCB 尺寸	15 x 15 mm

所选近红外 LED 驱动器拓扑结构的说明

该参考设计假定使用两个 SFH 4725AS 近红外功率 LED，每个 LED 由 4 A、500 μ s、频率为 60 Hz (60 fps) 的电流脉冲驱动。假设这样的配置可以提供足够的近红外光照明水平，以确保图像处理算法的正确运作。

此外，假设系统中提供 12 V \pm 5% 电源，最大标称载流能力为 500 mA。

图 4 显示了参考设计中使用的 LED 驱动器拓扑结构的框图。V_S 是一个 12 V \pm 5% 恒压电源。I_{LIM} 是一个

保持在 500 mA，因为假设通过 POC 提供 12 V 电压。D1 和 D2 是两个串联的 SFH 4725AS LED。一旦 FLASH 信号被激活，NCV7694 控制器就会驱动外部 NMOS，将通过 LED 的电流调节至 4 A。R_{SNS} 是用来测量 LED 电流的功率电阻。NCV7694 使用 R_{SNS} 上产生的电压来控制外部 MOSFET T2 的栅极。由于 500 mA 输入电流限制，所需的 4 A LED 电流脉冲不能直接从 12 V 电源中获取。为此，保持电容 C_{BULK} 需要存储足够的能量以在 500 μ s LED 频闪期间以 4 A 驱动 LED。

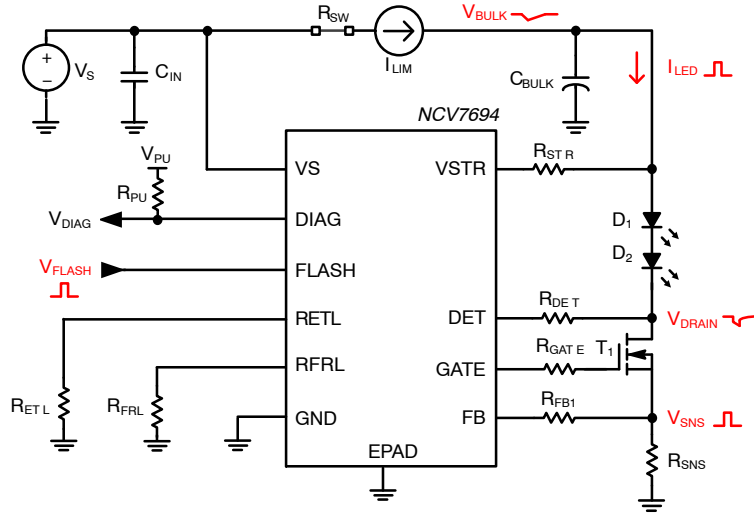


图 4. 基于 NCV7694 的 LED 驱动器工作原理

分步设计指南

验证支持的最大 LED 开启时间

作为第一个设计步骤，建议根据所需的帧率、LED 电流和电源电流的限制，检查图 4 上所示的拓扑结构是否能够满足目标 LED 脉冲电流持续时间。该验证可通过公式 1 完成：

$$T_{ON(MAX)} = \frac{1}{\text{frame rate}} \cdot \frac{I_{LIM}}{I_{LED}} \quad (\text{公式 1})$$

其中：

$T_{ON(MAX)}$ - 支持的最大 LED 脉冲电流持续时间 (s)

帧率 - 目标图像传感器帧率 (fps)

I_{LIM} - 输入电流限值 (A)

I_{LED} - LED 电流 (A)

考虑表 1 中总结的设计输入参数，即帧率 = 60 fps， $I_{LIM} = 0.5 \text{ A}$ ， $I_{LED} = 4 \text{ A}$ ，支持的最大 LED 脉冲电流持续时间为 $T_{ON(MAX)} = 2.08 \text{ ms}$ 。

根据这个初步检查，可以预期图 4 所示的拓扑结构是该设计的一个很好的选择，所需的 $T_{ON} = 500 \mu\text{s}$ 也能够得到满足。这个初步检查未考虑将在本文档后面分析的热性能。

如果所需的 T_{ON} 超过了计算出的 $T_{ON(MAX)}$ ，一个潜在的解决方案是增加电源电压，并引入一个电压预调节器级，以有效地减少从电源中汲取的电流，如图 5 所示。

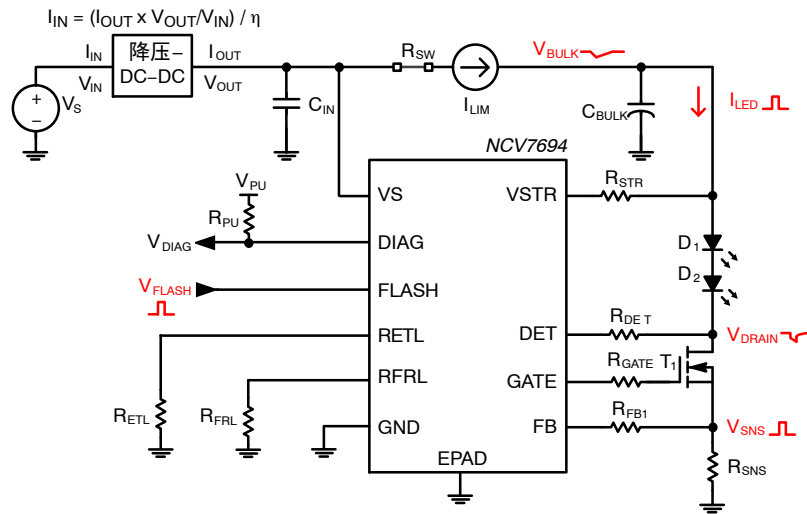


图 5. 基于 NCV7694 的 LED 驱动器带有一个额外的降压 DC-DC 级

关于保持电容的选择

下一步是计算所需的保持电容值 C_{BULK} 。它需要足够大以在 D1、D2、T1 和 R_{SNS} 上保持足够的电压，使 LED 电流在整个导通时间内保持恒定。所需的最小电压余量应根据 D1、D2 和 T1 器件规格确定。根据 SFH 4725AS 的数据表，在 -40°C 至 145°C 的温度和工艺变化范围内，这个 LED 的最大正向电压 V_F 在 $I_{LED} = 4 \text{ A}$ 时为 4.1 V 。在 T1 的情况下，需要将其漏极-源极电压降 V_{DS} 保持在尽可能低的水平，以最小化 MOSFET 内的功率损耗，但同时又要足够高，以使该器件在饱和状态下工作。在这个例子中，选择 $V_{DS} = 0.5 \text{ V}$ 进行计算。感应电压 V_{SNS} 被 NCV7694 反馈回路保持在恒定的 0.3 V 。

基于这些输入，可以使用公式 2 确定所需的最小保持电容：

$$C_{BULK(MIN)} > \frac{I_{LED} - I_{LIM}}{V_{BULK(MIN)} - 2 \cdot V_{LED(MAX)} - V_{DS} - V_{SNS}} \cdot T_{ON} \quad (\text{公式 2})$$

$C_{BULK(MIN)}$ - 最小保持电容 (F)

I_{LED} - 近红外 LED 电流 (A)

$V_{LED(MAX)}$ - 最大二极管 V_F 电压 (V)

I_{LIM} - 输入电流限制 (A)

V_{DS} - MOSFET 压降 V_{ds} (V)

V_{SNS} - 感应电压 (V)

T_{ON} - LED 开启时间 (秒)

$V_{BULK(MIN)}$ - 最小电源输入电压 (V)

设计规范

$V_{BULK(MIN)} = 11-4 \text{ V}$, $V_{LED(MAX)} = 4.1 \text{ V}$, $V_{DS} = 0.5 \text{ V}$, $V_{SNS} = 0.3 \text{ V}$, $I_{LED} = 4.0 \text{ A}$, $I_{LIM} = 500.0 \text{ mA}$, $T_{ON} = 500 \mu\text{s}$

将这些代入公式 2 得到以下结果:

选择保持电容时, 选择具有低 ESR 和足够纹波电流能力的部件很重要。在 Nichicon PCR1C102MCL1GS 设计中, 选择了 $1000 \mu\text{F}$ 、 16 V 铝聚合物电容器,

$$P_{D_T1(AVG)} = \left(\left(V_{BULK(MAX)} - \frac{\Delta V_{BULK(MIN)}}{2} \right) - 2 \cdot V_{LED(MIN)} - V_{SNS} \right) \cdot I_{LED} \cdot T_{ON} \cdot \text{frame rate} \quad (\text{公式 3})$$

其中:

$P_{D_T1(AVG)}$ - 平均 MOSFET 功耗 (W)

$V_{BULK(MAX)}$ - 最大大容量电容器电压 (V)

$\Delta V_{BULK(MIN)}$ - LED 开启期间的最小大容量电容器电压突降 (V)

$V_{LED(MIN)}$ - 最小 LED 正向压降 (V)

V_{SNS} - 分流电压 (V)

I_{LED} - LED 电流 (A)

T_{ON} - LED 开启时间 (s)

帧率 - 图像传感器帧率 (fps)

公式 3 中的 $\Delta V_{BULK(MIN)}$ 可使用以下方程式计算:

$$P_{D_T1(AVG)} = ((12.6 \text{ V} - 1.46 \text{ V}) - 2 \cdot 2.63 \text{ V} - 0.3 \text{ V}) \cdot 4 \text{ A} \cdot 0.5 \text{ ms} \cdot 60 \text{ fps} = 706 \text{ mW}$$

上述计算得到的功耗可以用于通过“计算流体力学”(CFD) 类型的模拟来估算给定 PCB 尺寸下的 MOSFET 自发热情况。

为了最小化 PCB 尺寸, 选择了采用 PWR22 2x2 mm 封装的 NVLJWS5D0N03CL MOSFET。在本参考设计的情况下, 估计整个 MOSFET 结至环境的热阻 (Θ_{JA}) 约为 61°C/W 。热阻 Θ_{JA} 导致 MOSFET 自发热 ΔT_J 约

ESR 为 $13 \text{ m}\Omega$, 纹波电流为 4.3 A 。由于保持电容器对整体解决方案尺寸有重大影响, 此时最好验证基于所选电容器的设计是否能够满足所需的 PCB 尺寸。

关于 MOSFET 的选择

对于 LED 驱动器参考设计, 正确选择 MOSFET 至关重要。MOSFET 中的平均功耗可以使用公式 3 估算:

$$\Delta V_{BULK(MIN)} = \frac{T_{on} \cdot (I_{LED} - I_{LIM})}{C_{BULK(MAX)}} \quad (\text{公式 4})$$

其中:

$\Delta V_{BULK(MIN)}$ - LED 开启期间的最小大容量电容器电压突降 (V)

T_{ON} - LED 开启时间 (s)

I_{LED} - LED 电流 (A)

I_{LIM} - 输入电流限值 (A)

$C_{BULK(MIN)}$ - 最大保持电容 (F)

考虑到参考设计的要求, 公式 3 产生以下结果:

为 43°C , 这会导致在环境温度 $T_{A(MAX)}$ 为 85°C 时, 结温度 T_J 达到 128°C 。这与 NVLJWS5D0N03CL 最大工作结温度 175°C 相比, 还剩下 47°C 的余量。

自发热 $\Delta T_J 43^\circ\text{C}$ 是平均结温升幅, 因为它基于平均 MOSFET 功耗和稳态 Θ_{JA} 。为找到峰值 T_J , 根据图 6 进行了 SPICE 仿真。

TND6416/D

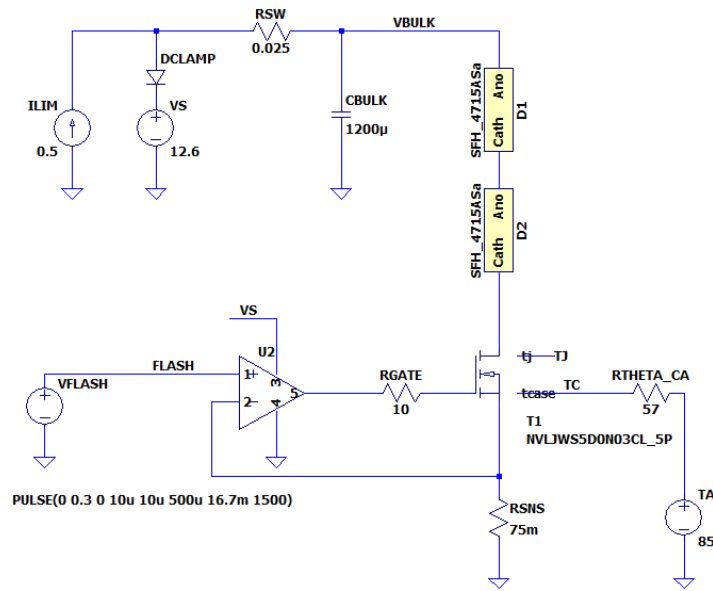


图 6. NVLJWS5D0N03CL 结温仿真设置

图 7 显示了结温仿真结果。10 秒后，结温达到稳定状态。在此期间，平均结温 T_J 从最初的 85°C 增加到 128°C ，这与计算预测的值相符。

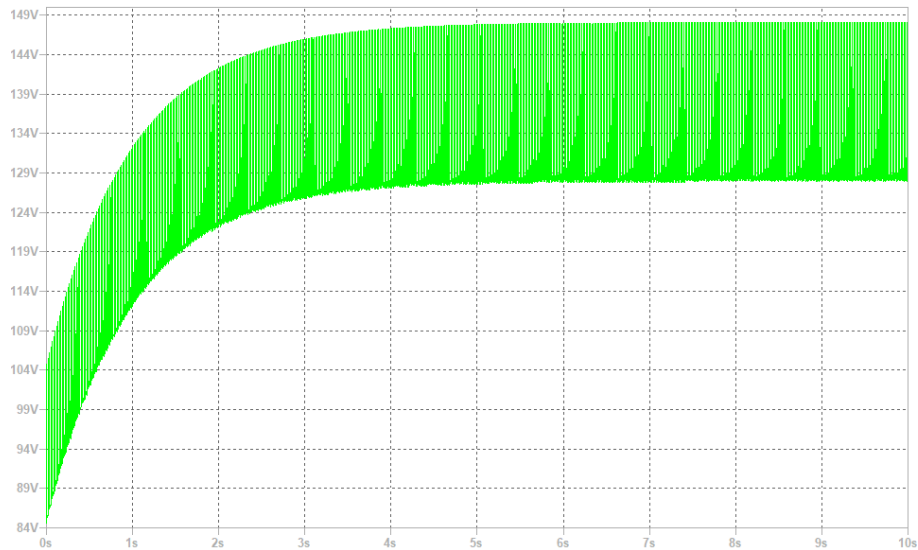


图 7. 仿真的 NVLJWS5D0N03CL 结温

图 8 更详细地显示了漏极电流脉冲期间仿真的 MOSFET 结温。由于漏极电流脉冲期间的瞬时功率耗

散很大，结温 T_J 在此期间增加了约 20°C ，高于 148°C 峰值的稳态值。

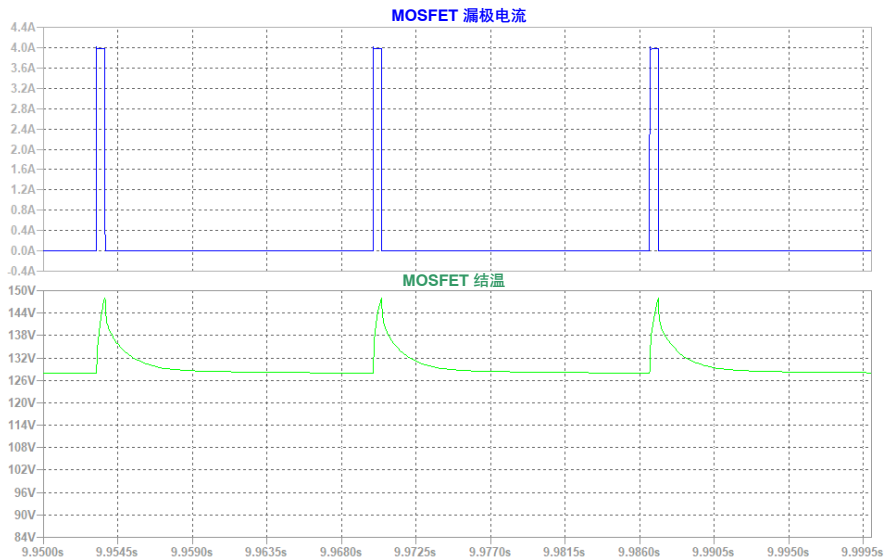


图 8. 仿真的 MOSFET 结温和漏极电流的详细视图

$T_{J(\text{PEAK})} = 148^{\circ}\text{C}$ 远低于 NVLJWS5D0N03CL 的最大工作温度 $T_{J(\text{MAX})} = 175^{\circ}\text{C}$ 。

由于在此类应用中，MOSFET 在饱和状态下运行，因此分析 NVLJWS5D0N03CL 时的一个重要部分是热稳定性评估。在饱和状态下运行的低压沟槽 MOSFET 可能会出现热不稳定性，在最坏的情况下，可能会导致 MOSFET 损坏。热不稳定性效应，也称为 Spirito 效应，详见 [1]。

为了验证 NVLJWS5D0N03CL 在这方面的使用是否安全，已根据以下假设进行了热稳定性评估：

- MOSFET 漏极-源极电压 V_{DS} 为 6 V
- 漏极电流脉冲宽度为 1 ms
- MOSFET I_{D} 从 0 A 逐渐增加，直到器件失效。
- 该器件安装在一个带有 1 层 1 盎司铜箔的小型卡扣插板上。
- 对 5 个单元进行了测试
- 初始结温 $T_{\text{J}(\text{initial})}$ 为 128°C

在上述预期条件下，根据对 NVLJWS5D0N03CL 的 5 个样品的测量，在达到 14 A 的漏极电流之前，器件不会损坏。这让人非常有信心该器件可以在最终应用中可以安全使用，并且不会出现热不稳定。

人眼安全防护设计

该参考设计具有以下人眼安全防护机制：

- 最大 LED 开启时间限制
- 最大 LED 开启频率限制
- 最小允许照明距离。

NCV7694 允许限制最大 LED 开启时间和频率。

电阻器 R_{ETL} 用于根据以下公式设置最大 LED 开启时间：

$$T_{\text{ON}(\text{MAX})} = \frac{R_{\text{ETL}}}{K_{\text{ETL}}} \quad (\text{公式 5})$$

其中：

$T_{\text{ON}(\text{MAX})}$ - 最大 LED 开启时间限制 (ms)

$K_{\text{ETL}} - 2.5 \pm 13\%$ (k Ω /ms) (在整个温度和工艺范围中)

R_{ETL} - 连接到 NCV7694 引脚 RETL 的电阻值 (k Ω)

一旦 FLASH 输入置于有效电平，NCV7694 就开始在 RETL 引脚内部产生一个电压斜坡，该斜坡的斜率与 R_{ETL} 值成反比。一旦 R_{ETL} 引脚电压达到 1 V，栅极输出关闭，从而禁用 MOSFET T1。此功能的操作在图 10 所示的时序图进行了说明。此外，当 NCV7694 栅极输出变为低电平时，/DIAG 输出置于有效电平，从而关闭与 LED 串联的 FPF2895V 高边开关，如图 9 所示。在这个参考设计的情况下，选择使用 $R_{\text{ETL}} = 1.43 \text{ k}\Omega$ 来限制 T_{ON} 至 572 μs 。 R_{ETL} 电阻允许调整 T_{ON} 从 320 μs 至最多 6 ms。

帧率限制操作如下：当 FLASH 信号变低时，NCV7694 R_{FRL} 引脚的电压开始上升。在将下一个 FLASH 信号置于有效电平之前， R_{FRL} 引脚电压与内部参考电压进行比较。如果 R_{FRL} 引脚电压高于参考电压，则 T1 导通。如果不是这种情况，则 NCV7694 /DIAG 输出被激活，并且 NCV7694 栅极输出的开启被延迟，直到 R_{FRL} 引脚电压超过内部参考电压。下面的公式允许计算 LED 电流脉冲之间的最短时间。支持的最小关闭时间 $T_{\text{OFF}(\text{MIN})}$ 是 8 ms，对应于 125 Hz。

$$T_{\text{OFF}(\text{MIN})} = \frac{R_{\text{FRL}}}{K_{\text{FRL}}} \quad (\text{公式 6})$$

其中：

$T_{\text{OFF}(\text{MIN})}$ - LED 激活之间的最短关闭时间 (ms)

$K_{\text{FRL}} - 0.1 \pm 13\%$ (k Ω /ms) (在整个温度和工艺范围中)

R_{FRL} - 连接到 NCV7694 引脚 R_{FRL} 的电阻值 (k Ω)

TND6416/D

在设计中，使用 $R_{FRL} = 1.3 \text{ k}\Omega$ 来将 LED 电流脉冲之间的最短时间限制为 13 ms。此值对应于 74 fps 的最大帧率。

近红外照明源与驾驶员眼睛之间的最小允许距离受外部光电晶体管和 NCV803 电压检测器的限制，连接如图 9 所示。

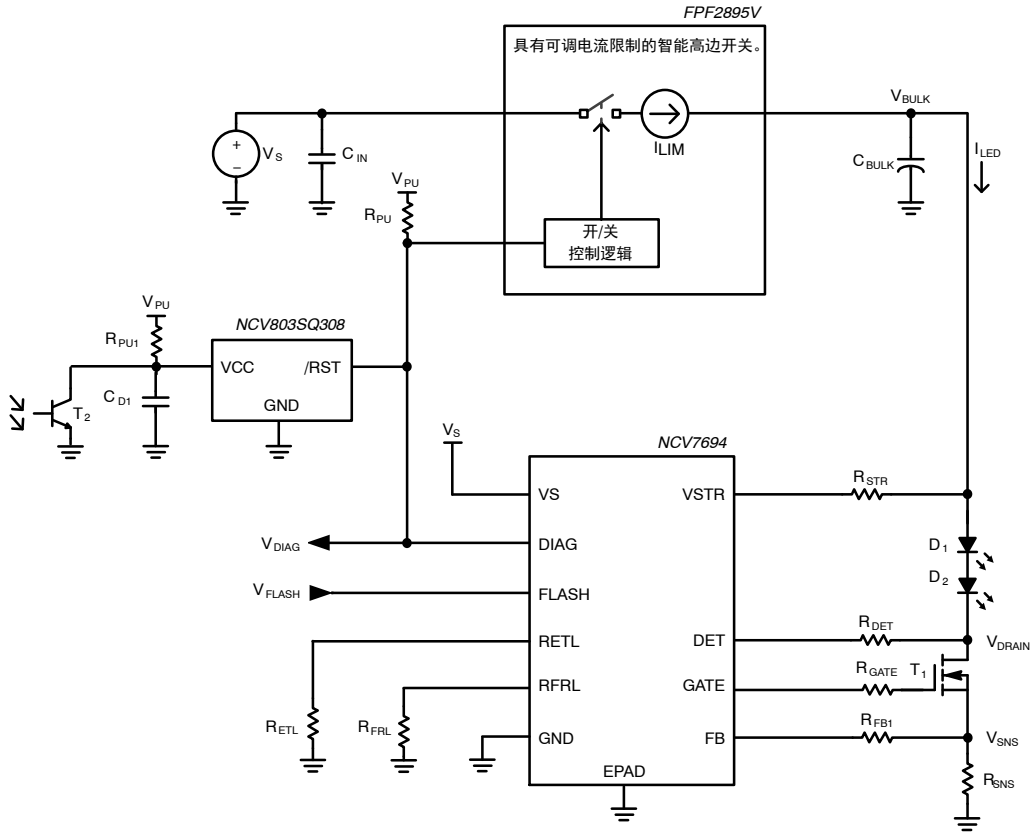


图 9. LED 驱动器框图

TND6416/D

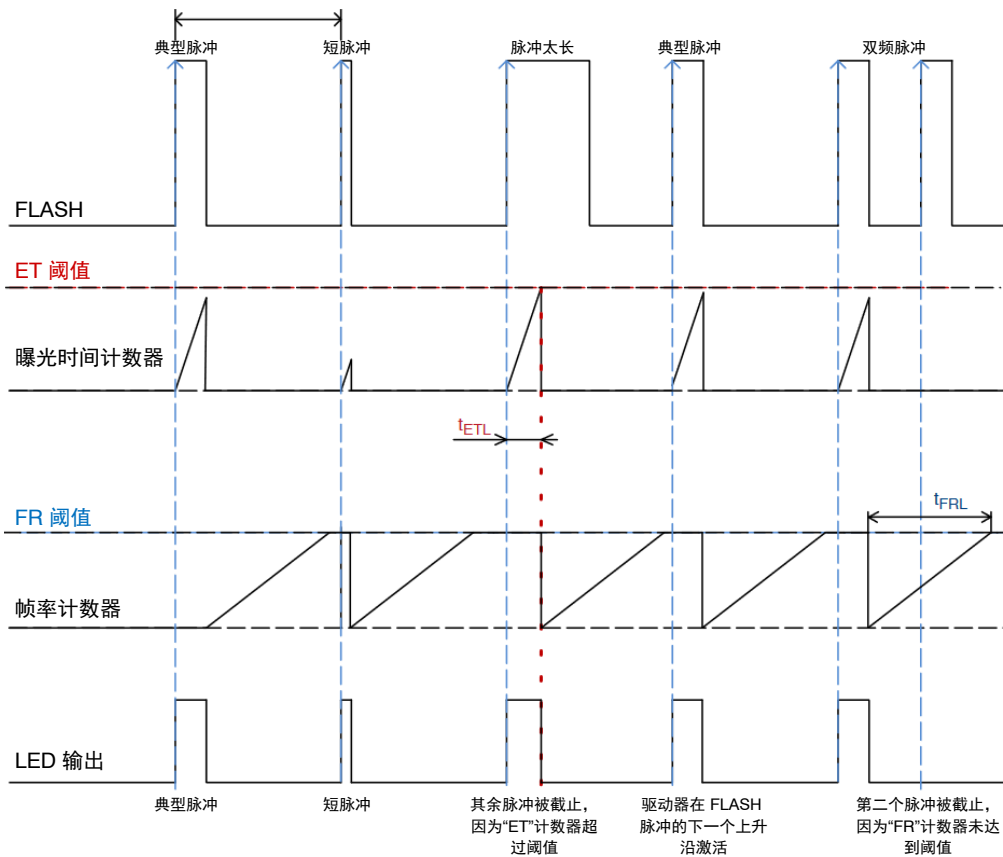


图 10. NCV7694 眼睛安全防护功能的操作

当被照物体远离近红外 LED 时，光电晶体管 T2 捕获的反射近红外光强度非常低，T2 被截止。

电压监控器 [NCV803SQ308D2T1G](#) 的 V_{CC} 通过电阻 $R_{PU} = 10\text{ k}\Omega$ 从 $V_{PU} = 5\text{ V}$ 进行偏置。在 $T_A = -40^\circ\text{C}$ 至 105°C 范围内，NCV803 的供电电流最大为 $2.5\text{ }\mu\text{A}$ ，这在 R_{PU} 上产生 25 mV 的压降，因此器件的 V_{CC} 接近 5 V 。结果，/RST 输出被禁用。

当被照物体接近近红外 LED 时，T2 集电极电流开始增加，这导致跨越 $R_{PU} = 10\text{ k}\Omega$ 的压降增加。一旦

V_{CC} 降至 3.08 V 以下，NCV803 /RST 输出被激活并关闭 LED。要使 V_{CC} 降至 3.08 V ，需要 $190\text{ }\mu\text{A}$ 的 T2 集电极电流。

一旦 LED 关闭， V_{CC} 回升到约 5 V 的电压。由于内部 NCV803 复位延迟，/RST 输出在 $V_{CC} \sim 5\text{ V}$ 恢复后保持逻辑低电平状态，持续时间为 $t_{RP} = 20\text{--}66\text{ ms}$ ，如图 11 所示。

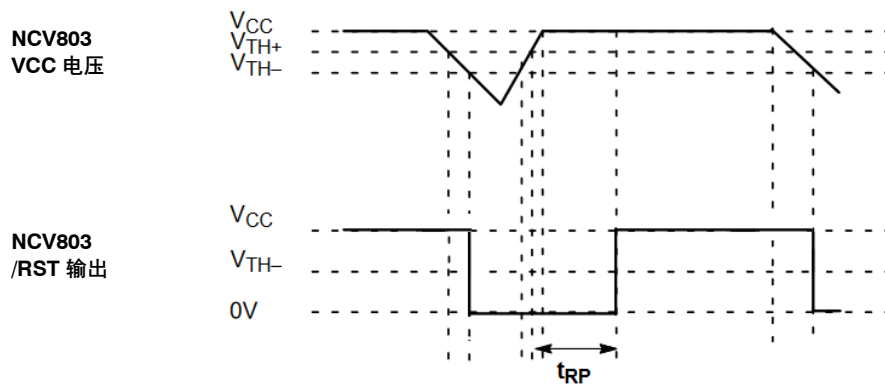


图 11. NCV803 电压检测器操作

设定 LED 电流水平

以下公式可用于设置近红外 LED 额定电流水平:

$$I_{LED} = \frac{V_{SNS}}{R_{SNS}} \quad \text{(公式 7)}$$

其中:

I_{LED} - LED 电流 (A)

$V_{SNS} = 0.3$ (V)

(V_{SNS} 是 NCV7694 内部的电压参考值。该参考值在工作结温和工艺变化范围内具有 $\pm 10\%$ 的容差)

R_{SNS} - LED 电流检测电阻值 (Ω)。

在本设计中, 选择使用 $R_{SNS} = 75 \text{ m}\Omega$ 来为 LED 提供 4 A 电流。值得强调的是, NCV7694 具有内部诊断功能, 有助于识别和标记 R_{SNS} 是否存在开路或短路。

在某些情况下, 可能需要调整应用中的 LED 电流水平。

即, 在降低 LED 脉冲宽度实施不可行的情况下, 可能需要调整 LED 电流。LED 电流调整还可以通过最佳照明条件下限制 LED 强度来帮助节省用电, 因为非常明亮的阳光会对捕获的图像质量产生负面影响。在这种情况下, 增加近红外 LED 强度可能有助于获得更高质量的图像。在夜间, 当没有或非常有限的太阳光干扰存在时, 近红外 LED 能以较低强度运行以减少功率损耗。

此参考设计不包括 LED 电流水平调整功能。但是, 使用 NCV7694 可以实现此功能。图 12 显示了如何将外部缓冲数模转换器 (DAC) 输出连接到 NCV7694 以调节 LED 电流水平。

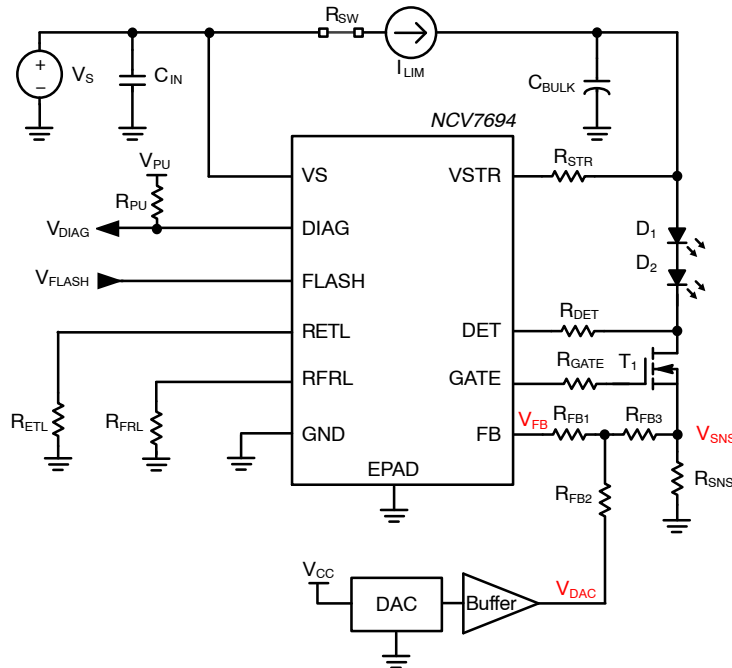


图 12. 通过外部数模转换器调节 LED 电流水平

公式 (8)、(9)、(10) 可用于确定在指定范围内调整 LED 电流所需的元件值:

$$V_{SNS(MAX)} = \frac{V_{FB} \cdot I_{LED(MAX)} \cdot V_{DAC(MAX)}}{I_{LED(MAX)} [V_{DAC(MAX)} - V_{FB}] + I_{LED(MIN)} \cdot V_{FB}} \quad \text{(公式 8)}$$

$$\frac{R_{FB3}}{R_{FB2}} = \frac{V_{SNS(MAX)} - V_{FB}}{V_{FB} - V_{DAC(MIN)}} \quad \text{(公式 9)}$$

$$R_{SNS} = \frac{V_{SNS(MAX)}}{I_{LED(MAX)}} \quad \text{(公式 10)}$$

其中:

$V_{SNS(MAX)}$ - R_{SNS} 的最大电压, 对应于目标最大 LED 电流 (V)

R_{SNS} - 感应电阻值 (Ω)

$I_{LED(MAX)}$ - 目标最大 LED 电流 (A)

$I_{LED(MIN)}$ - 目标最小 LED 电流 (A)

V_{FB} - NCV7694 FB 引脚电压 = 0.3 (V)

$V_{DAC(MIN)}$ - 最小 DAC 电压 (V)

$V_{DAC(MAX)}$ - 最大 DAC 电压 (V)

R_{FB3} - 反馈电阻 (Ω)

(建议将 R_{FB3} 设置在 330 Ω 至 1 k Ω 的范围内)

R_{FB2} - 反馈电阻 (Ω)

下面的示例显示了如何设计这样一个电路：该电路允许使用可在 0 V 至 3.1 V 范围内调节的电压源，将 LED 电流设置在 0.5 A 至 4.0 A 的范围内：

$$V_{FB} = 0.3 \text{ V}, I_{LED(MAX)} = 4 \text{ A}, I_{LED(MIN)} = 0.5 \text{ A}, \\ V_{DAC(MAX)} = 3.1 \text{ V}, V_{DAC(MIN)} = 0 \text{ V}, R_{FB3} = 470 \Omega$$

由公式 (8):

$$V_{SNS(MAX)} = 0.328 \text{ V}$$

由公式 (9):

$$\frac{R_{FB3}}{R_{FB2}} = 0.093$$

将 $R_{FB3} = 470 \Omega$ 代入公式 (9) 后:

$$R_{FB2} = \frac{470 \Omega}{0.093} = 5.05 \text{ k}\Omega$$

由公式 (10):

$$R_{SNS} = 82 \text{ m}\Omega$$

最后，完整的 LED 电流调节电路如下:

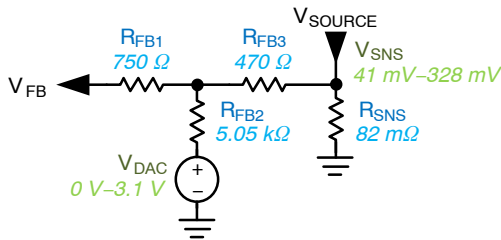


图 13. LED 电流调节电路

输入限流和高边保护开关的设计

为了限制保持电容的充电电流并在故障事件期间提供一种断开 V_S 与 V_{BULK} 之间连接的方法，参考设计中使用了电流限制开关 FPF2895V。FPF2895V 是一款符合 AEC-Q100 标准的智能高边开关，具有以下特性:

- 输入至输出可调电流限制
- 输出到输入电流阻断
- 固定欠压和可调过压
- 过温关断
- 故障输出标记
- 可配置触发电流限制时的行为

FPF2895V 限流环路的良好动态特性确保在进入限流操作时不会出现明显的输入电流过冲。这在器件评估期间得到了验证，详见[评估结果](#)部分。

图 14 显示了参考设计中 FPF2895V 的实际实现:

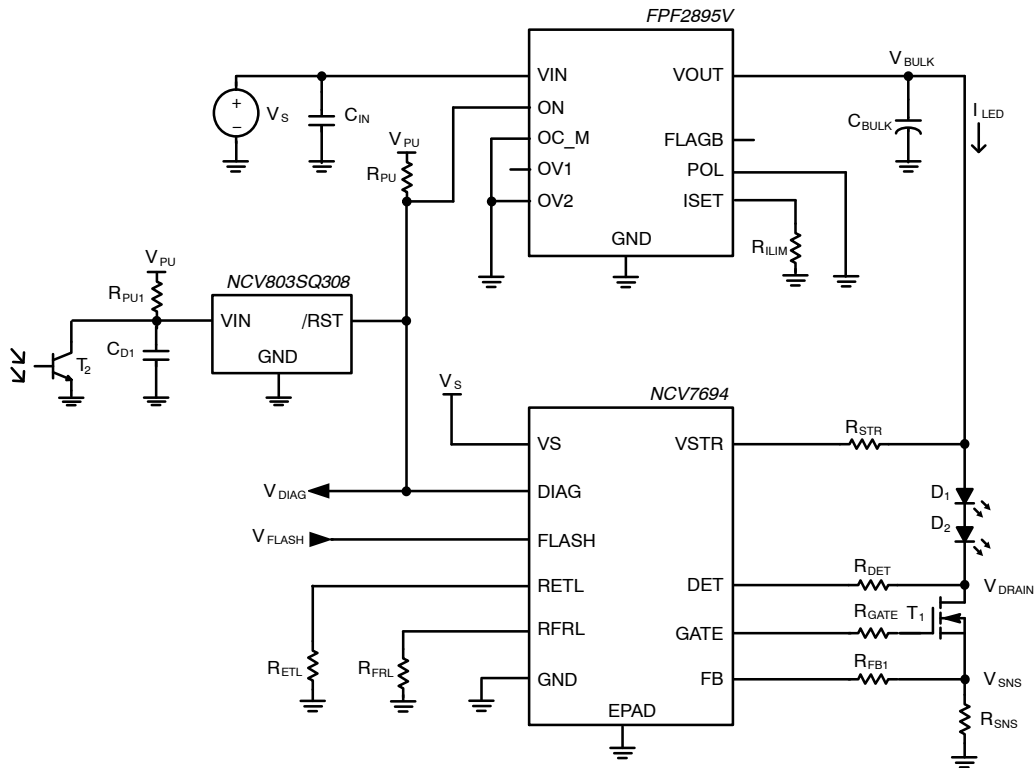


图 14. 具有 FPF2895V 电流限制和高边保护开关的 LED 驱动器

TND6416/D

电阻 R_{ILIM} 连接到 FPF2895V 的引脚 I_{SET} ，用于设置电流限制 (C_{BULK} 充电电流)，根据公式：

$$R_{ILIM} = \frac{4448.6}{I_{LIM}} \quad (\text{公式 11})$$

其中：

I_{LIM} - 目标电流限值 (mA)

R_{ILIM} - 所需的电流限值 (k Ω)

在设计示例中，使用了一个 8.87 k Ω 1% R_{ILIM} 电阻，这对应于 $I_{LIM} = 501.5$ mA (典型值) 的电流限制。FPF2895V 在 -40 $^{\circ}$ C 至 105 $^{\circ}$ C 的环境温度范围内支持 15% 的电流限制精度，过流限制范围为 500 mA 至 2 A。

FPF2895V 的引脚 OC_M 用于设置电流限制时的器件行为。将此引脚拉低将使器件用作恒电流源。将 OC_M 拉高可启用自动重启模式。

FPF2895V 的引脚 $OV1$ 和 $OV2$ 允许根据表 2 设置过压锁定 (OVLO) 阈值：

表 2. 支持的 FPF2895V OVLO 水平

OV1	OV2	OVLO 水平
低	低	23 V (典型值)
低	高 (浮动)	10 V (典型值)
高 (浮动)	低	16.8 V (典型值)
高 (浮动)	高 (浮动)	5.95 V (典型值)

由于应用示例中的额定电源电压 V_S 为 12 V，而 C_{BULK} 额定值为 16 V，OVLO 水平设置为 16.8 V (典

型值)。在 -40 $^{\circ}$ C 和 105 $^{\circ}$ C 之间的工艺范围和环境温度变化范围内，OVLO 水平可以在 16.3 V 和 17.1 V 之间变化。

FPF2895V POL 引脚用于设置 ON 引脚极性。ON 输入是用于禁用或启用器件输出的低电压逻辑输入。在参考设计中，设置了正极性。因此，只要 ON 引脚电压高于 1.2 V，器件就会开启。

ON 输入被上拉至板载 5 V LDO 输出，如图 14 所示。FPF2895V ON 输入由两个来源下拉：

1. NCV7694 LED 驱动器/DIAG 引脚 (漏极开路，低电平有效输出)
一旦 NCV7694 检测到以下任何故障，/DIAG 输出就会激活：
 - ◆ LED 阳极至阴极开路
 - ◆ LED 阳极至阴极短路
 - ◆ LED 阴极短接到地
 - ◆ FLASH 输入太长或太频繁
 - ◆ VS 欠压或 VS 过压
 - ◆ 过温
2. NCV803 光传感器比较器/RST 引脚 (漏极开路，低电平有效输出)
随着被照物体越来越靠近 LED，T2 集电极电流增加，从而在 R_{PU1} 产生更大的压降，最终 NCV803 /RST 输出被拉低。

选择限流器时，重要的是要验证所选 IC 是否能够满足目标系统中所需的功耗曲线。为了完成此验证，根据图 15 设置了 SPICE 仿真：

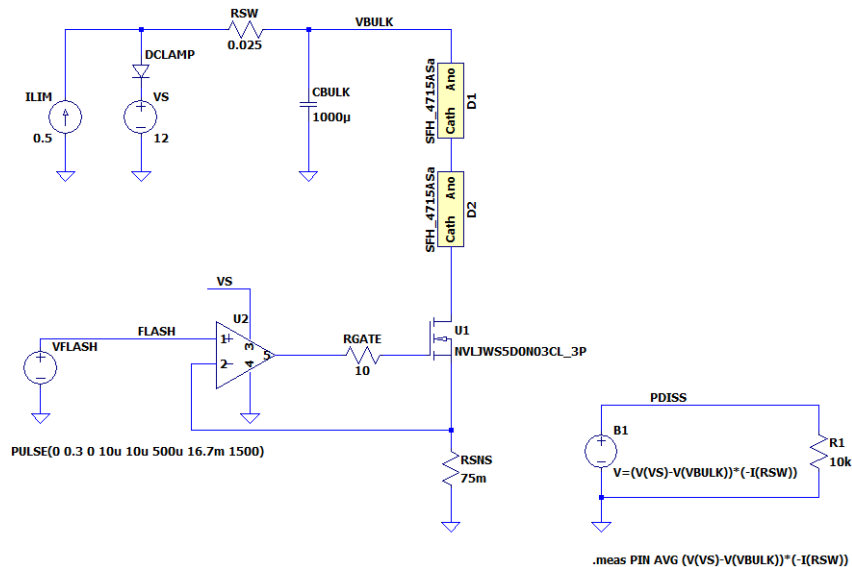


图 15. LED 电流调节电路

TND6416/D

由此产生的高边开关功耗曲线可以在图 16 上看到。功耗呈三角形，峰值功率在 500 μ s LED 脉冲结束时达到 0.9 W。平均功耗为 105 mW。基于此热分析，证实

在 $T_{A(MAX)} = 85^{\circ}\text{C}$ 下，器件的最高结温 $T_{J(MAX)}$ 在运行期间将保持在 125°C 以下。

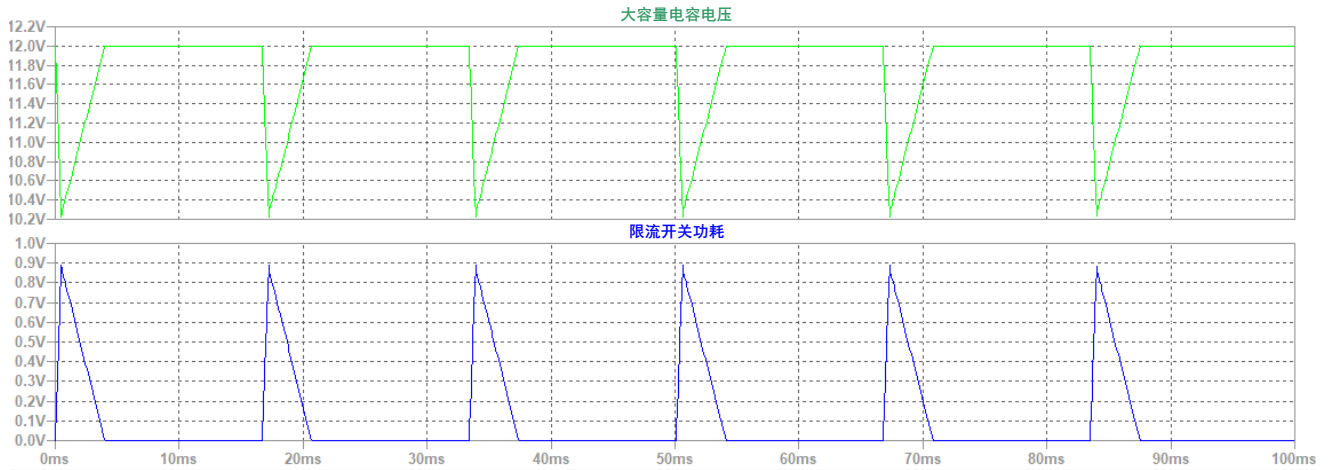


图 16. LED 电流调节电路

TND6416/D

参考设计原理图

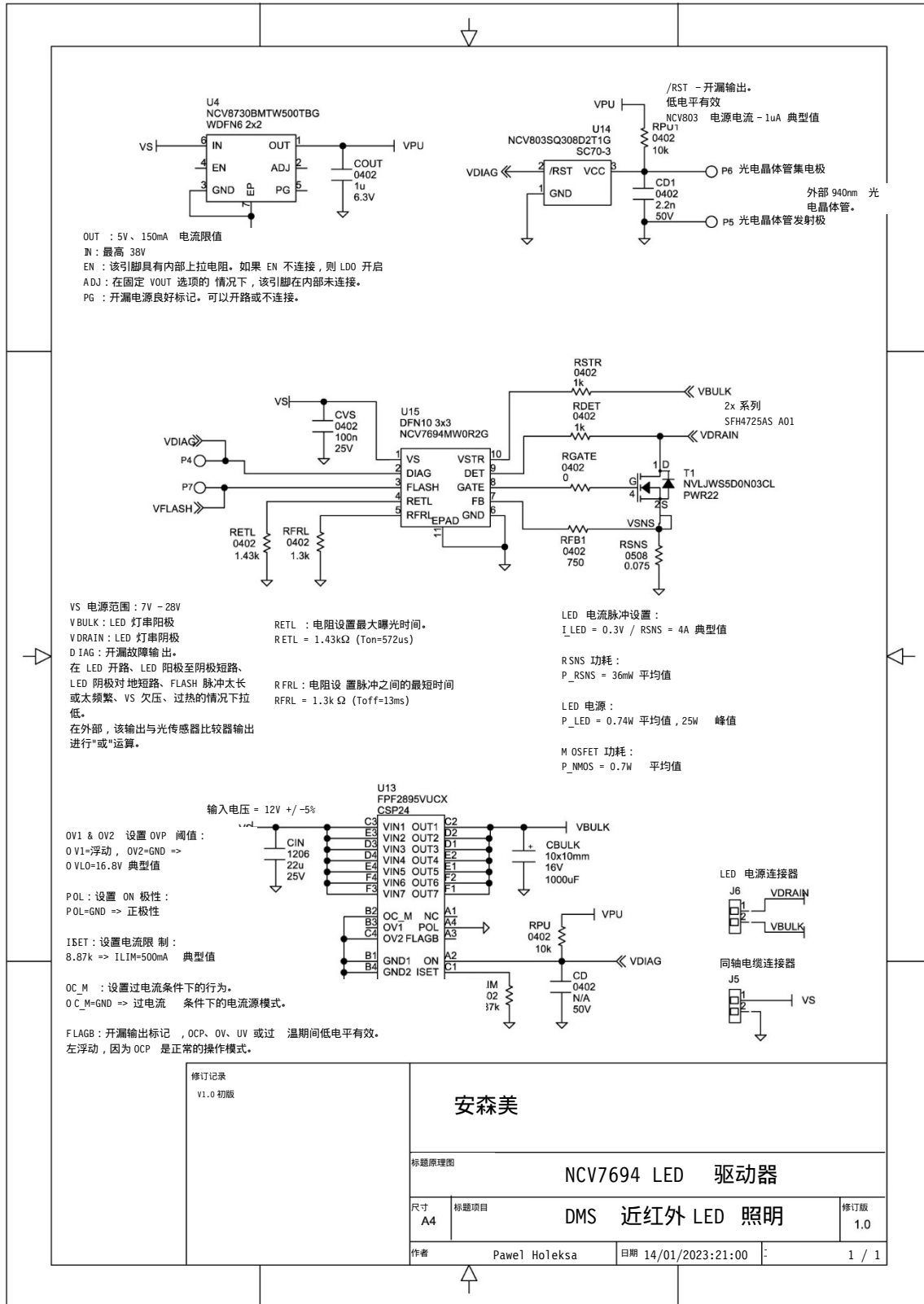


图 17. DMS LED 驱动器参考设计原理图

参考设计布局

近红外 LED 驱动器参考设计基于 15x15 mm 4 层 FR-4 PCB。顶层包含除放置在底层的保持电容器之外的所有组件。底部使用铜多边形，以在打开和关闭

LED 电流时最大限度地减少寄生电感的影响。信号走线在顶层和第二内层上布线。第一内层完全被 GND 铜层覆盖。

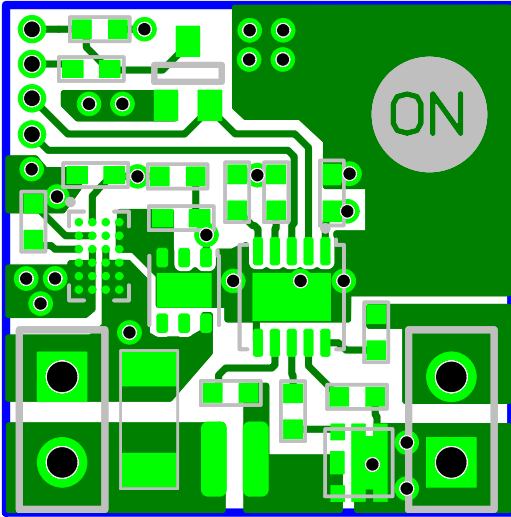


图 18. 顶层

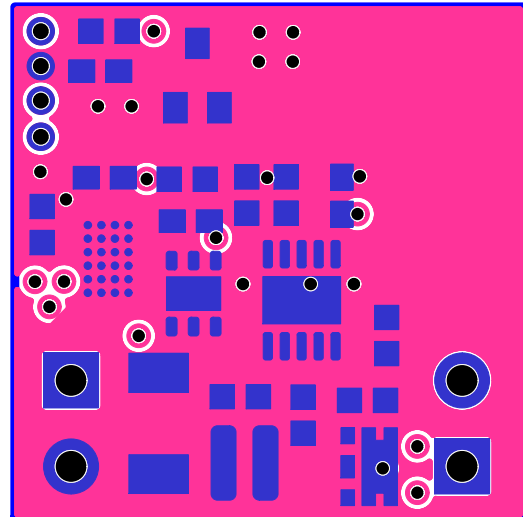


图 19. 第一内层

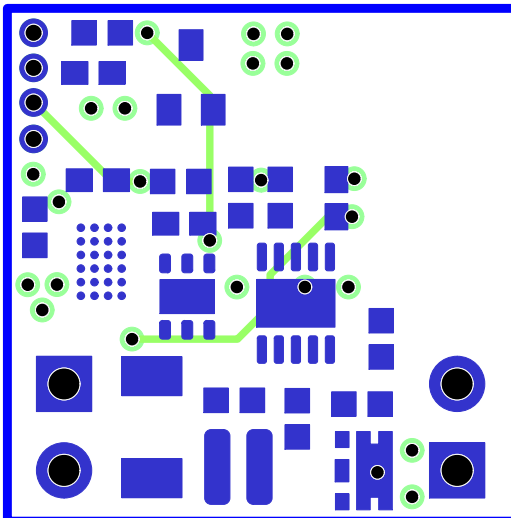


图 20. 第二内层

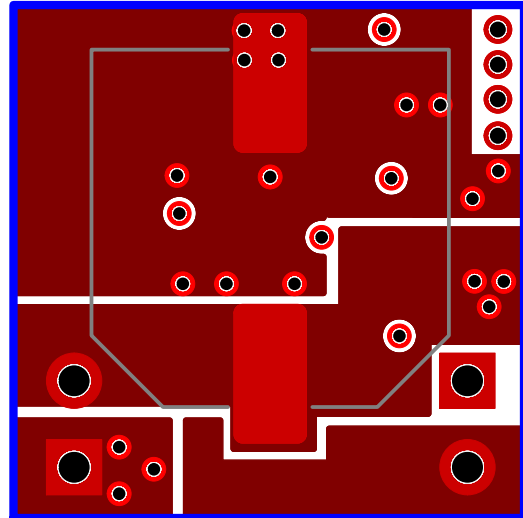


图 21. 底层

TND6416/D

参考设计物料清单

表 3. 物料清单

器件位号	数量	零件编号	供应商	封装	描述	值
CD1	1	UMF105B7222KVHF	Taiyo Yuden	0402	MLCC X7R 2.2 nF 10%, 50 V 0402	2.2 nF
CD	1	N/A	无	0402	零件未填充	2.2 nF
CVS	1	C0402C104K3RACTU	Kemet	0402	MLCC X7R 100 nF 10%, 25 V 0402	100 nF
CIN	1	GRM31CC71E226ME15L	Murata	1206	MLCC X7S 22 μ F 20%, 25 V 1206	22 μ F
COUT	1	GRM155R70J105MA12D	Murata	0402	MLCC X7R 1 μ F 20%, 6.3 V 0402	1 μ F
P4-P7	4	5002	Keystone	通孔	微型测试点, 1 mm, White	无
RPU, RPU1	2	AC0402FR-0710KL	Yageo	0402	电阻 10 k Ω 62.5 mW 1%, AEC-Q200	10.0 k Ω
RFB1	1	AC0402FR-07750RL	Yageo	0402	电阻 750 Ω 62.5 mW 1%, AEC-Q200	750 Ω
RGATE	1	AC0402FR-070RL	Yageo	0402	电阻 0 Ω 62.5 mW 1%, AEC-Q200	0 Ω
RILIM	1	AC0402FR-078K87L	Yageo	0402	电阻 8.87 k Ω 62.5 mW 1%, AEC-Q200	8.87 k Ω
RDET, RSTR	2	AC0402FR-071KL	Yageo	0402	电阻 1.0 k Ω 62.5 mW 1%, AEC-Q200	1.0 k Ω
RFRL	1	AC0402FR-071K3L	Yageo	0402	电阻 1.3 k Ω 62.5 mW 1%, AEC-Q200	1.3 k Ω
RETL	1	ERJ-2RKF1431X	Panasonic	0402	电阻 1.43 k Ω 62.5 mW 1%, AEC-Q200	1.43 k Ω
RSNS	1	LTR10EVHFSR075	Rohm	0508	电流检测电阻 75 m Ω 1%, AEC-Q200	0.075 Ω
T1	1	NVLJWS5D0N03CL	onsemi	PWR22 2x2	逻辑电平功率 NMOS, 30 V 4.2 m Ω	无
U4	1	NCV8730BMTW500TBG	onsemi	WDFN6 2x2	LDO 调节器, 超低 Iq, 5 V Vout	无
CBULK	1	PCR1C102MCL1GS	Nichicon	10x10 mm	铝聚合物电容器 16 V 1000 μ F 20% 13 m Ω , AEC-Q200	1000 μ F
U13	1	FPF2895VUCX	onsemi	CSP24	带 OVP 的限流开关, 28 V/5 A	无
U14	1	NCV803SQ308D2T1G	onsemi	SC70-3	电压检测器, 超低 Iq	无
U15	1	NCV7694MW0R2G	onsemi	DFN10 3x3	近红外 LED 照明安全控制器	无

NCV7694 近红外 LED 驱动器参考设计的评价

评估平台说明

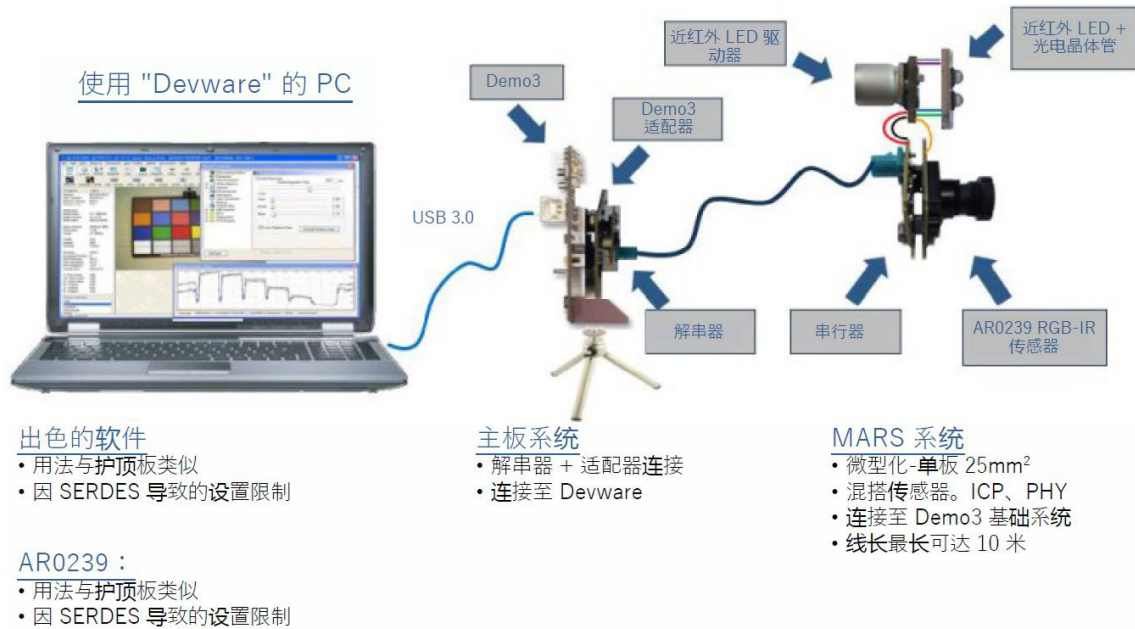


图 22. DMS 近红外 LED 驱动器评估设置

图 22 显示了安森美 (onsemi) 的平台被用于评估基于 POC 的摄像头系统中的 NCV7694 近红外 LED 驱动器参考设计。评估是基于 AR0239 RGB-IR 图像传感器和 NCV7694 近红外 LED 驱动器参考设计完成的，两者均由稳压 12 V POC 供电。NCV7694 LED 驱动器 FLASH 输入连接到 AR0239 RGB-IR 传感器的 FLASH 输出，NCV7694 近红外 LED 驱动器/DIAG 输出连接到串行器 GPIO 引脚。安森美的 Devware 软件用于配置图像传感器，以传输、捕获图像数据并研究图像质量。12 V POC 电源由计算机的 5 V USB 端口通过 5 V 至 12 V 升压转换器供电，该转换器是解串器板的一部分。如果需要，解串器板允许断开与板载升压转换器的连接并连接到外部 POC 电源。

已对 NCV7694 参考设计进行了以下评估：

- 人眼安全防护功能评价
- 限流功能评估
- 对 V_{BULK} 和 I_{LED} 进行评估，并将其与[分布设计指南](#)中计算出的值进行比较。

评估结果

图 23 显示了基于 NCV7694 的 LED 驱动器的典型工作波形。FLASH 信号每 16.67 ms 激活一次，对应于 60 fps 的图像传感器帧率。FLASH 信号的持续时间设置为 500 μ s。由于没有故障存在， V_{DIAG} 被上拉至 5 V。在 LED 开启期间， V_{SNS} 被调节至 0.3 V，而 V_{BULK} 则会线性下降，因为 C_{BULK} 正以恒定电流放电。 V_{FLASH} 关闭后， V_{SNS} 降至 0 V， V_{BULK} 线性恢复至 12 V。

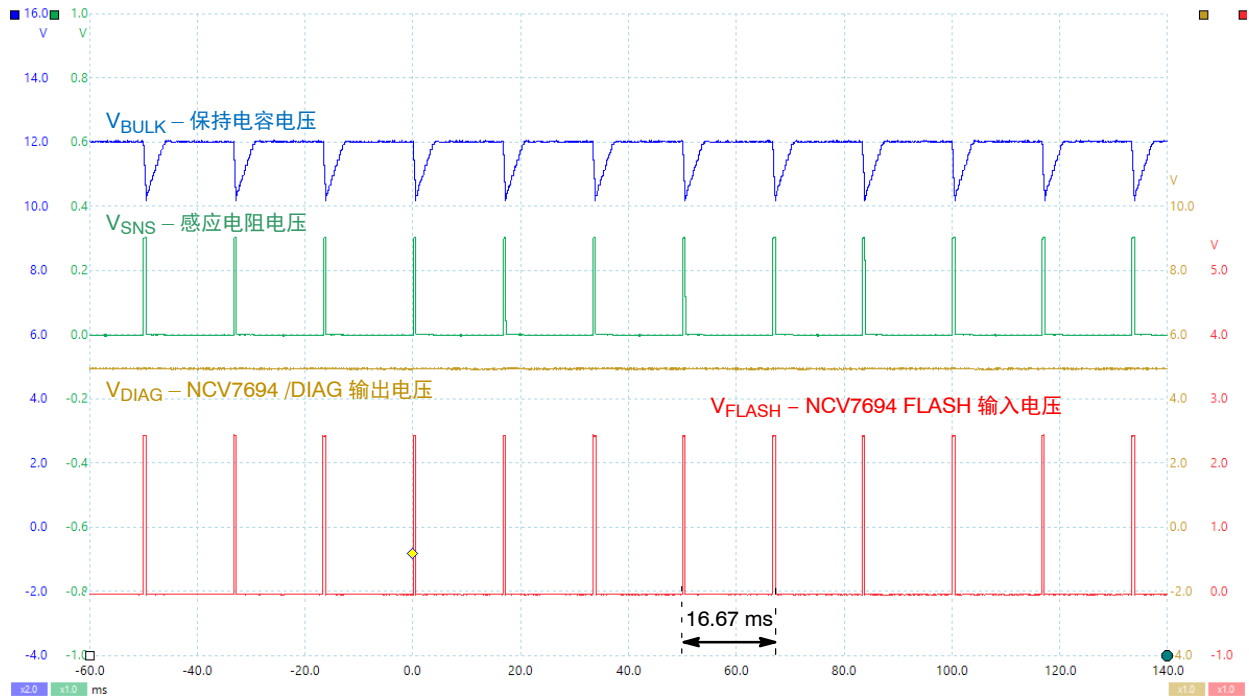


图 23. NCV7694 LED 驱动器 - 典型工作波形

图 24 更详细地显示了典型的工作波形。在 LED 通电时间 $T_{ON} = 500 \mu s$ 内, V_{BULK} 下降了 1.82 V。基于公式 4 的快速验证表明 $C_{BULK} = 960 \mu F$, 与实际的 C_{BULK} 值相符。在 T_{CHARGE} 期间, 通过 PPF2895V 电

流限制器提供 500 mA 的恒定电流来为保持电容充电。测得的 3.51 ms 充电时间与之前的计算结果一致。

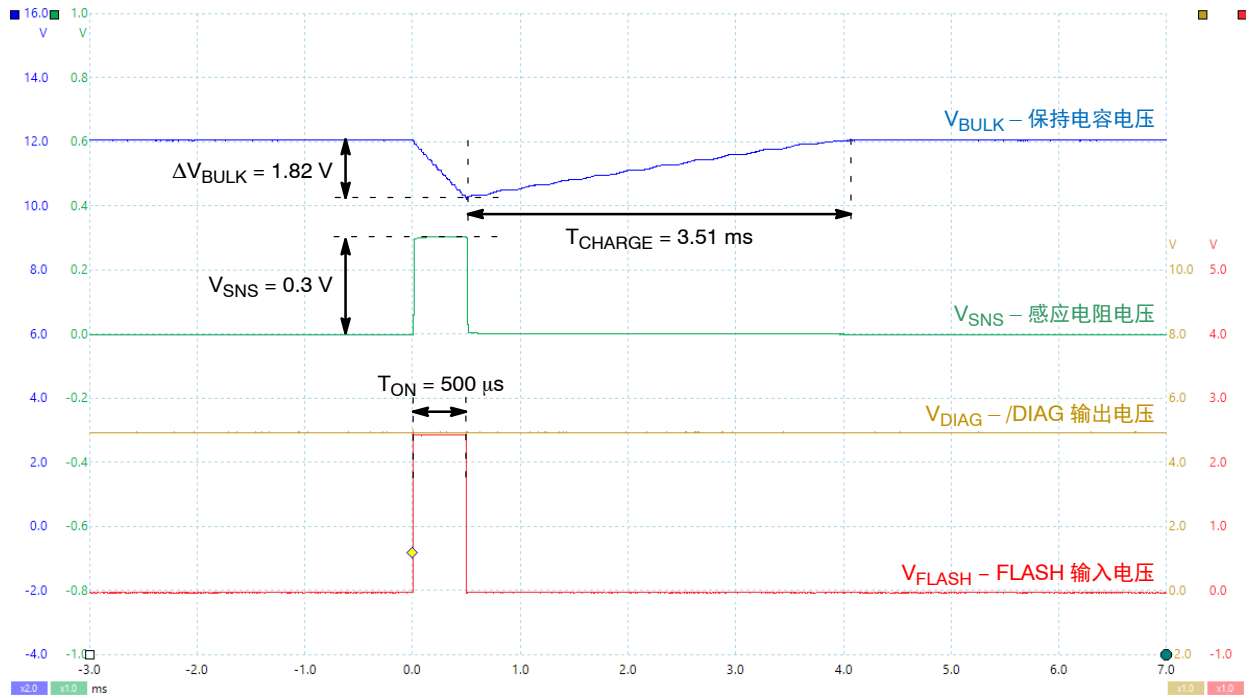


图 24. NCV7694 LED 驱动器 - 典型工作波形

图25 显示了T1 栅极电压以及启用FLASH 输入后的 V_{SNS} 信号。在 V_{FLASH} 被应用约 $1.8 \mu s$ 后, T1 栅极开始上升。大约需要 $6.4 \mu s$ 的时间, T1 栅极才会超过阈

值电压并开始调节漏极电流。LED 电流平稳增加, 没有任何过冲, 表明反馈环路稳定性良好。

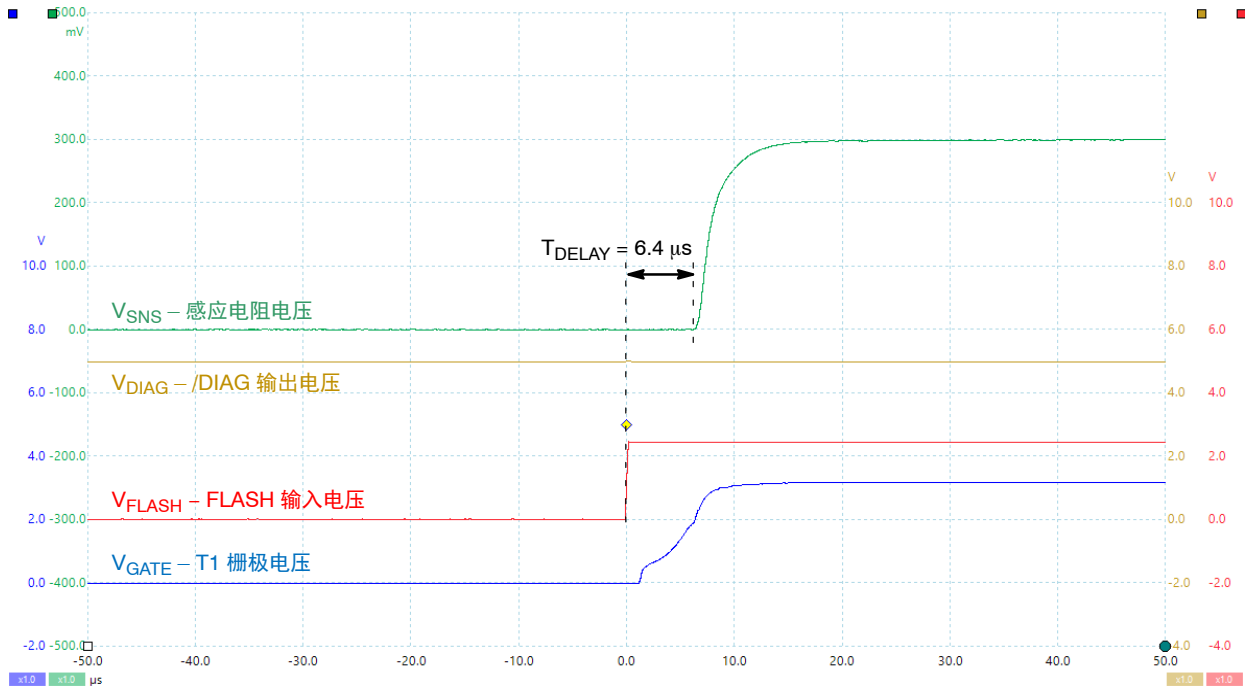


图 25. LED 电流开启 - 详细视图

图 26 显示 T1 栅极电压以及禁用 FLASH 输入后的 V_{SNS} 信号。在 V_{FLASH} 信号被置于无效电平后, T1

栅极立即开始下降。大约需要 $20.5 \mu s$, V_{SNS} 才会降低到接近 $0 V$ 。

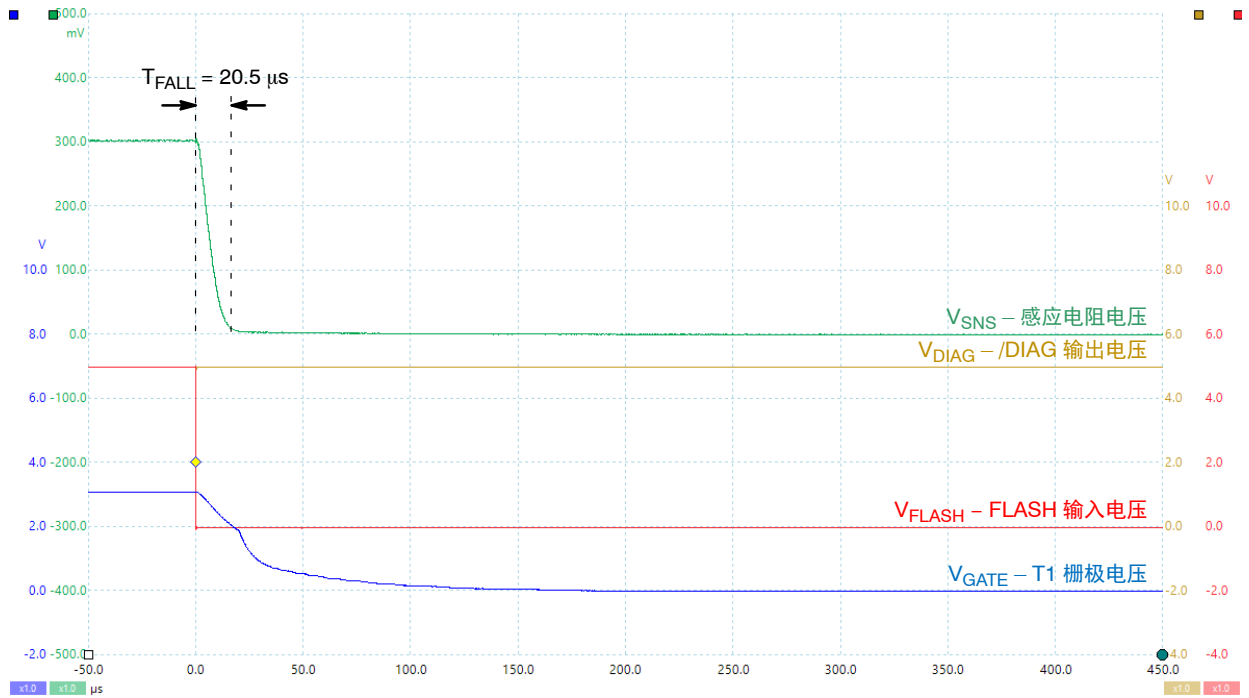


图 26. LED 电流关断 - 详细视图

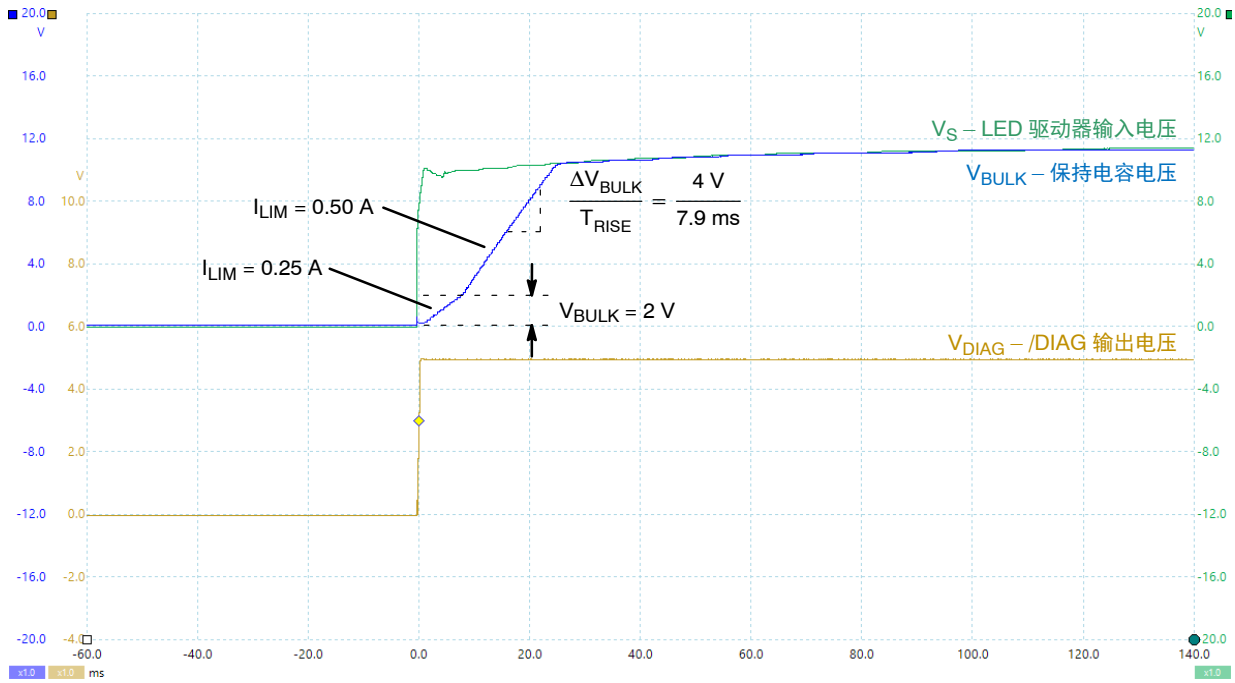


图 27. LED 驱动器的启动

图 27 显示了 LED 驱动器的启动波形。最初施加了 V_S 输入电压后， V_{BULK} 正以 250 mA 的恒定电流充电。这是因为 FPF2895V 的折返电流限制功能。一旦 V_{BULK} 超过 2 V，FPF2895V 电流限制就会增加到 500 mA。从 0 V 到 12 V 的总体 V_{BULK} 充电时间约为 28 ms。 V_{DIAG} 通过 10 k Ω 上拉到 V_{PU} ，因此在启动后不久， $V_{DIAG} = 5$ V。

图 28 显示了 T1 MOSFET 漏极和源极电压以及 T1 功耗。在典型的室温下工作条件下， V_{DRAIN} 下降到 4 V。这为最坏情况提供了额外的余量。T1 的最大功耗为 22.5 W，而平均功耗为 585 mW。与[关于 MOSFET](#) 的选择部分中计算的相比，测量值略低。然而，这符合预期，因为[关于 MOSFET](#) 的选择部分中计算的 706 mW 是在最坏情况条件下进行的估算。

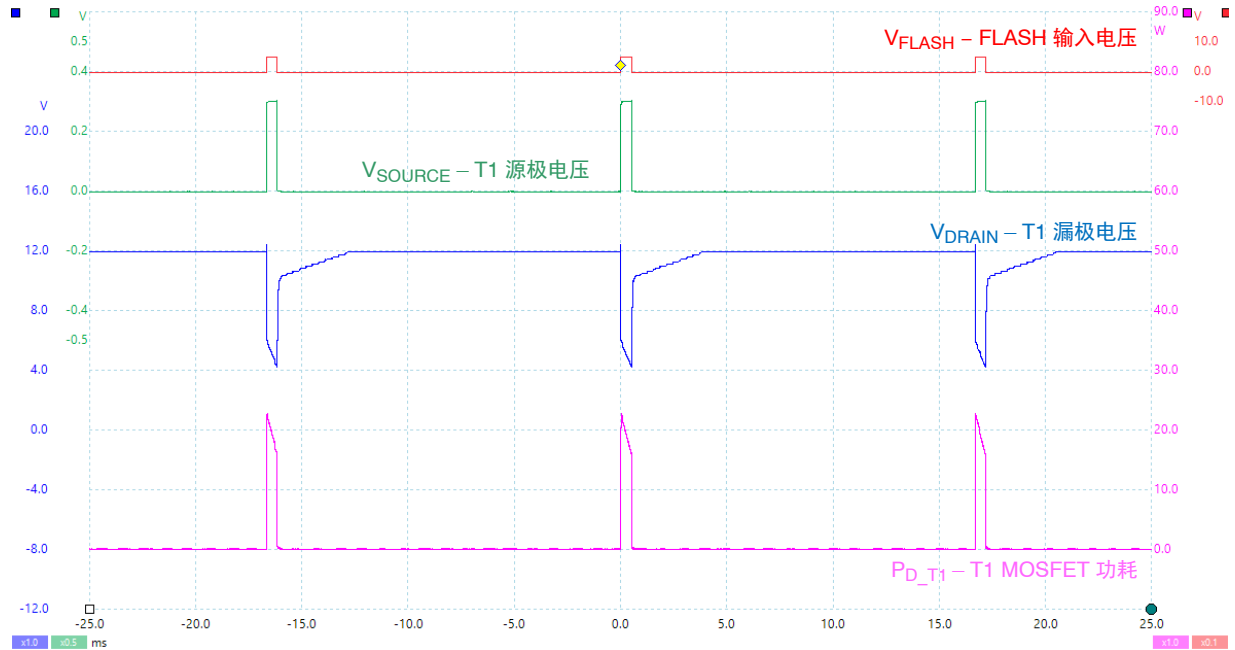


图 28. T1 MOSFET 波形

图 29 显示了 LED 电压和功耗。LED 功耗确定为 25 W 峰值，平均 735 mW。测得 4 A 时 2 个串联 LED 的典型正向压降为 6.2 V。

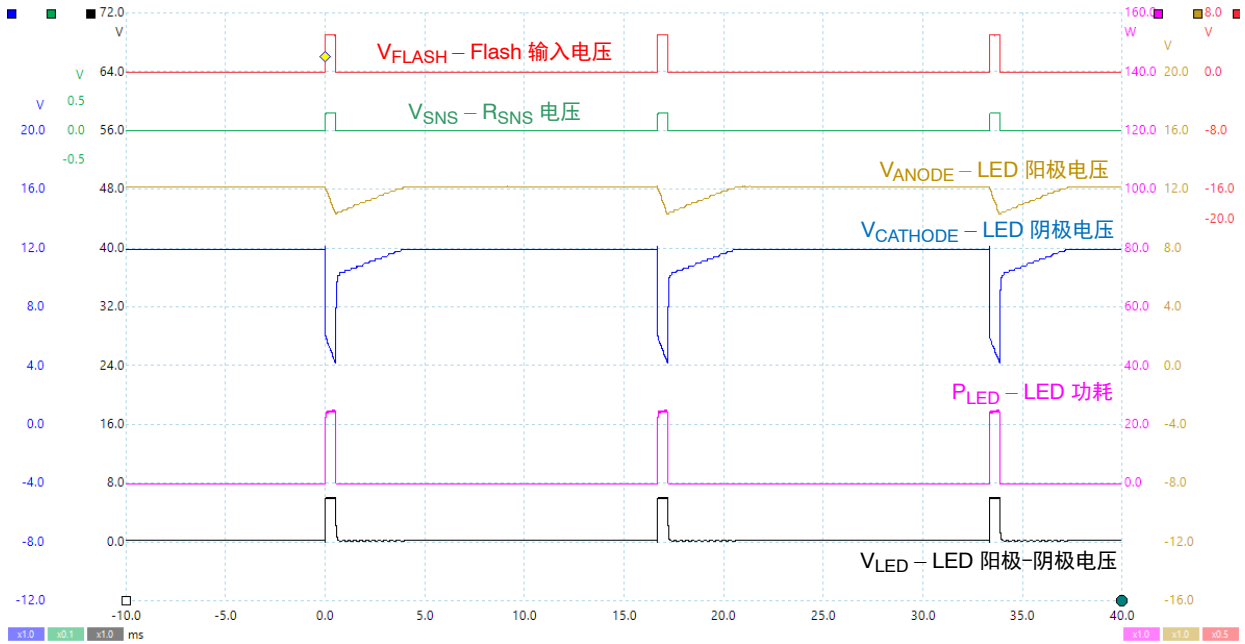


图 29. 近红外 LED 波形

图 30 显示了 LED 开启时间限制的操作。一旦 V_{FLASH} 超过了预设的 LED 开启时间限制 $570 \mu s$ ， V_{DIAG} 就会变低以指示故障状态。T1 和 FPF2895V 都被禁用。一旦延长的 V_{FLASH} 脉冲被禁用，系统将恢

复正常运行。 V_{DIAG} 增加到 5 V，FPF2895V 开启。由于 FPF2895V 中实施了内部开启延迟，器件需要约 2.8 ms 才能重新开始为 V_{BULK} 充电。

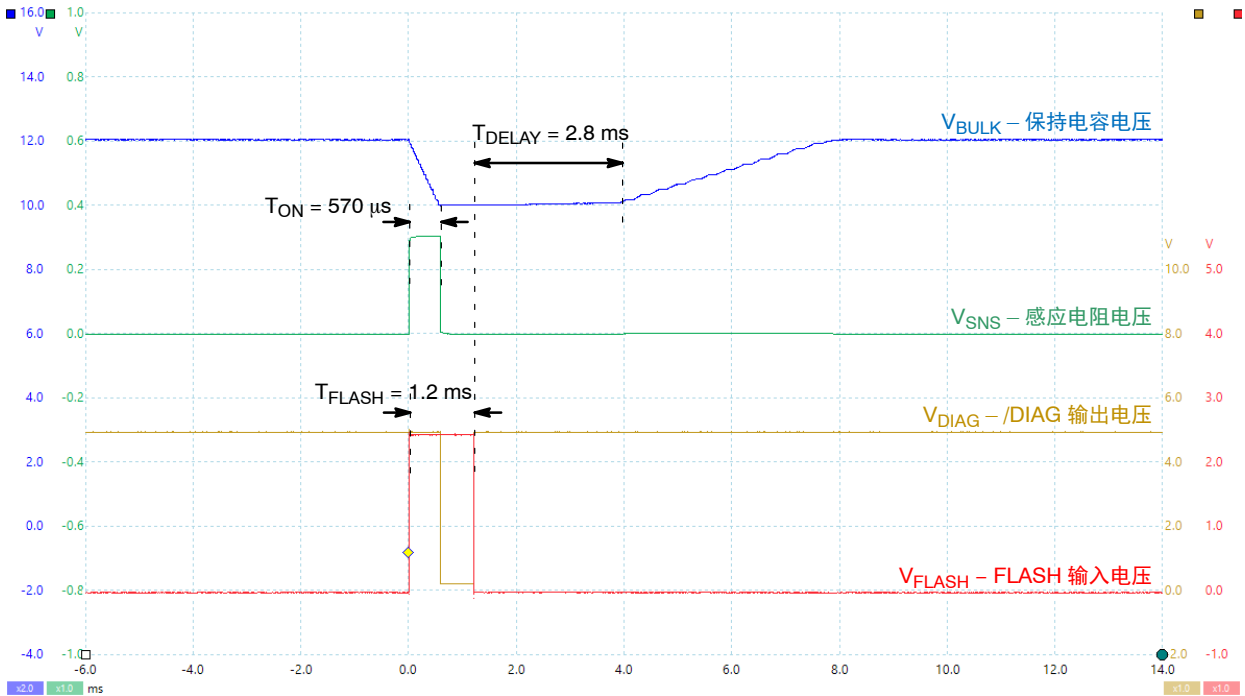


图 30. LED 最大开启时间限制的操作

图 31 更详细地显示了 LED 最大开启时间限制的操作。 V_{DIAG} 被禁用后, T1 栅极立即被拉低。LED 电流从 4 A 下降到 ~ 0 A 大约需要 20 μ s。

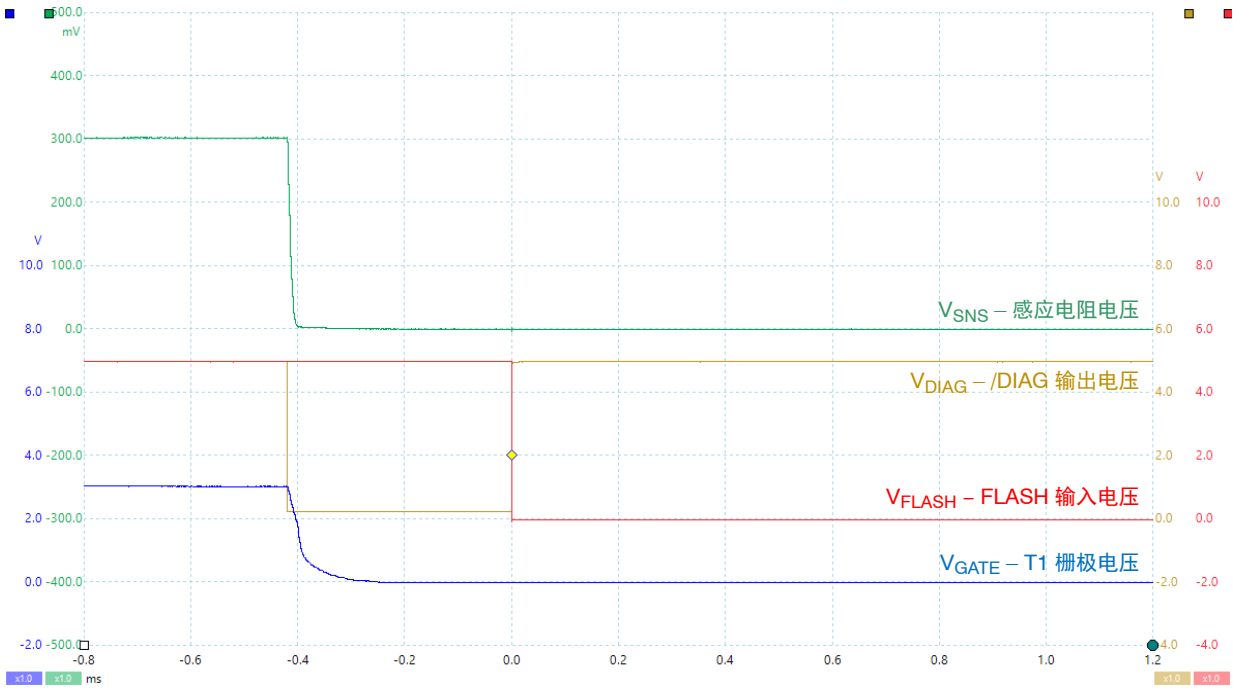


图 31. LED 最大开启时间限制的操作 - 详细视图

图 32 和 33 演示了两个不同 FLASH 信号周期的最小 LED 关闭时间限制的操作。在图 32 中, FLASH 信号周期设置为 12.5 ms, 对应于 80 Hz。在这种情况下, FLASH 脉冲之间的时间为 12 ms, 超过了设定的

13 ms。因此, LED 每隔一个 FLASH 输入脉冲就会被激活, 周期为 25 ms (40 Hz)。在图 33 中, FLASH 信号频率增加到 180 Hz, 对应于 5.55 ms 的 FLASH 周期。因此, 实际的 LED 开启频率要除以 3。

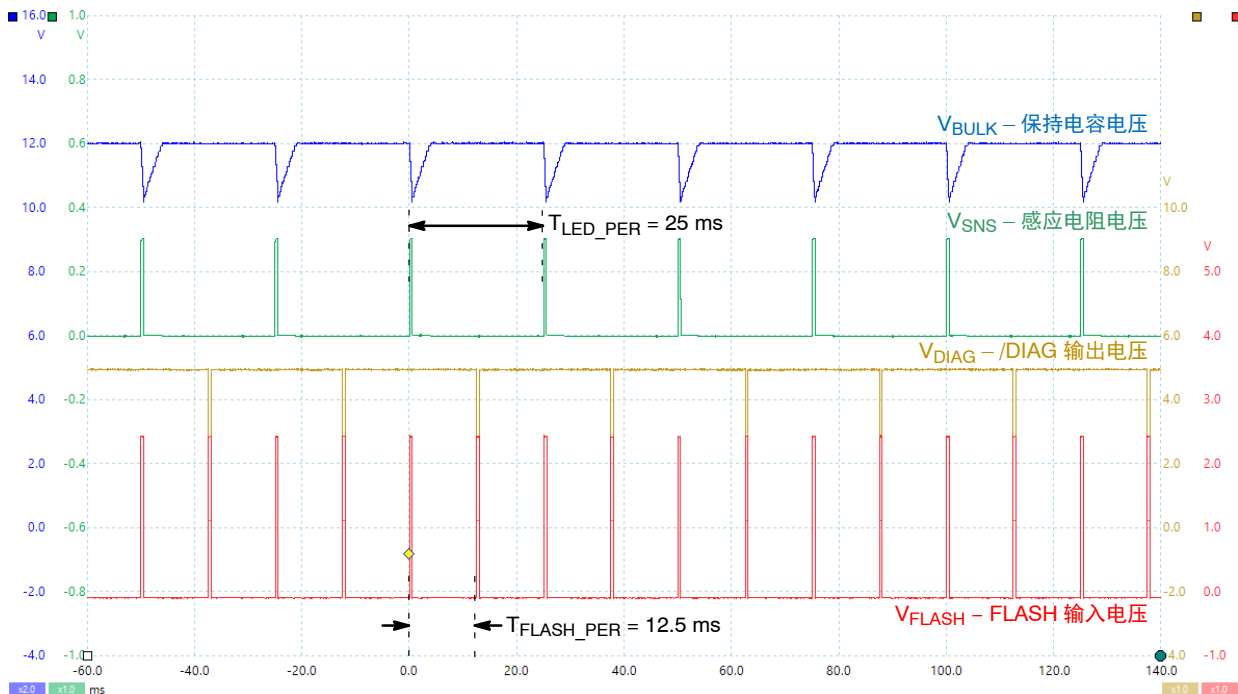


图 32. 最小 LED 关闭时间限制的操作

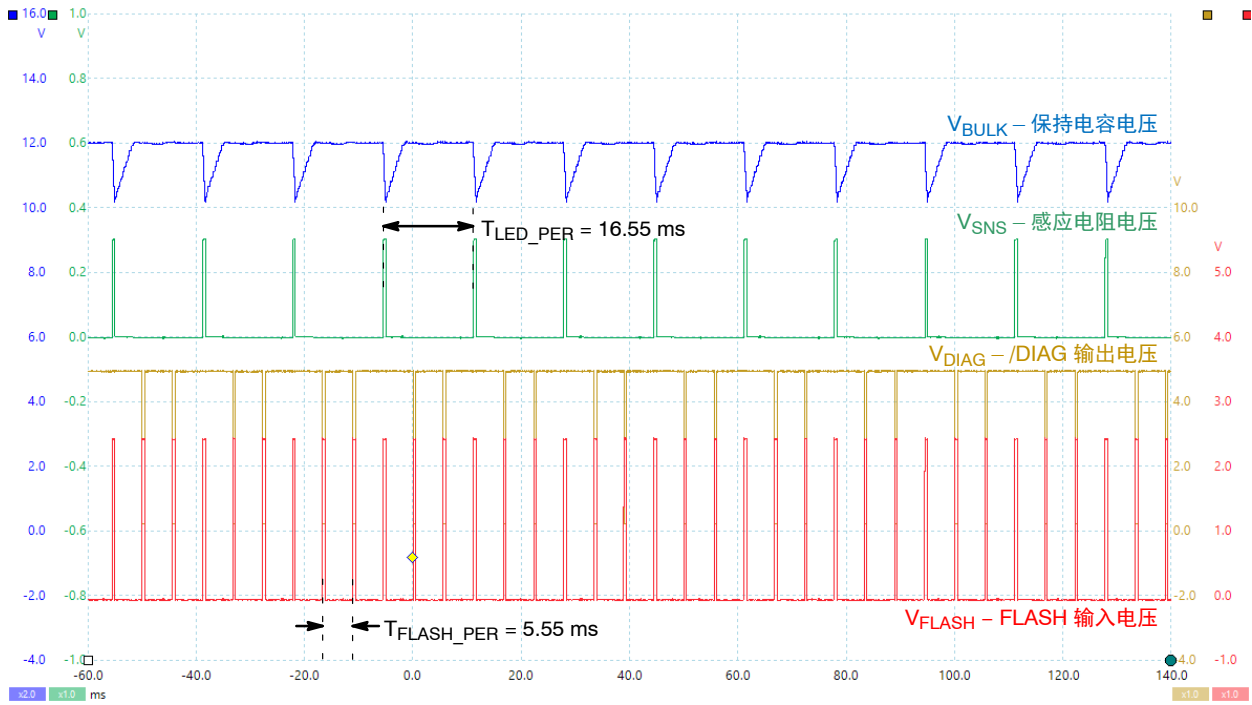


图 33. 最小 LED 关闭时间限制的操作

图 34 显示了在启用 FLASH 输入脉冲和检测到 LED 关闭时间不够短故障之间存在一个小延迟。

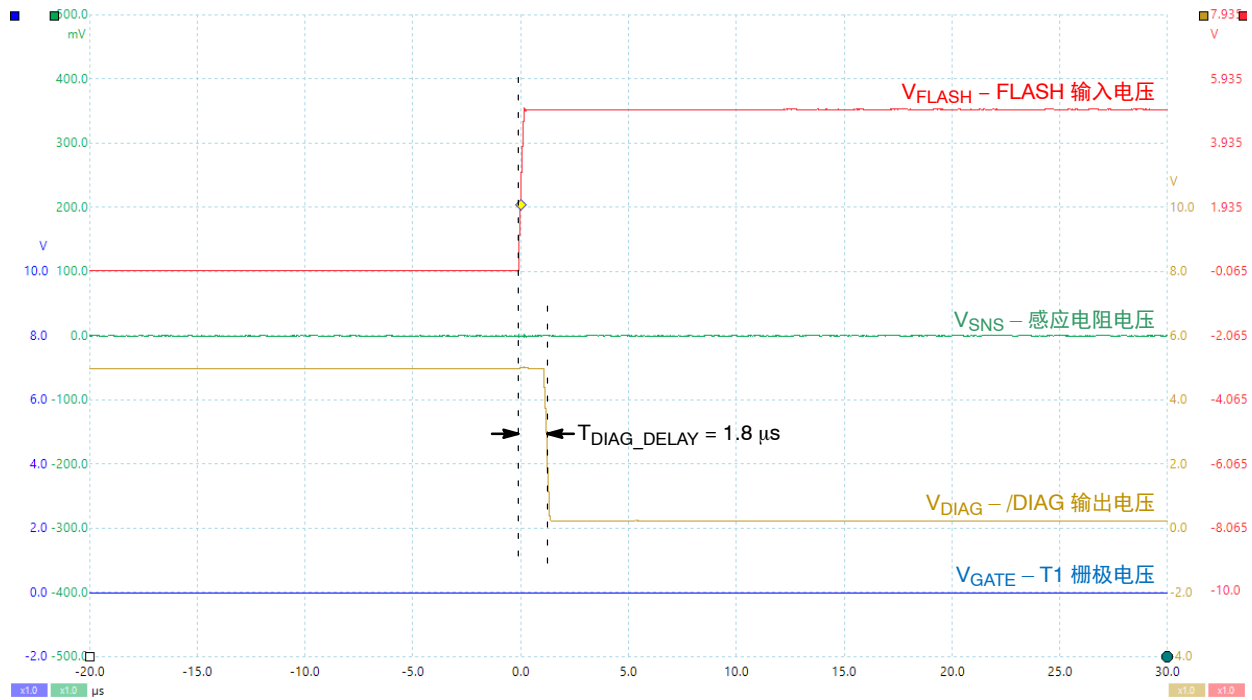


图 34. 最小 LED 关闭时间限制的操作 - 详细视图

图 35 显示了 FLASH 输入信号被施加的时间太长且个别频率太高。NCV7694 正确检测并处理了这两种故障。

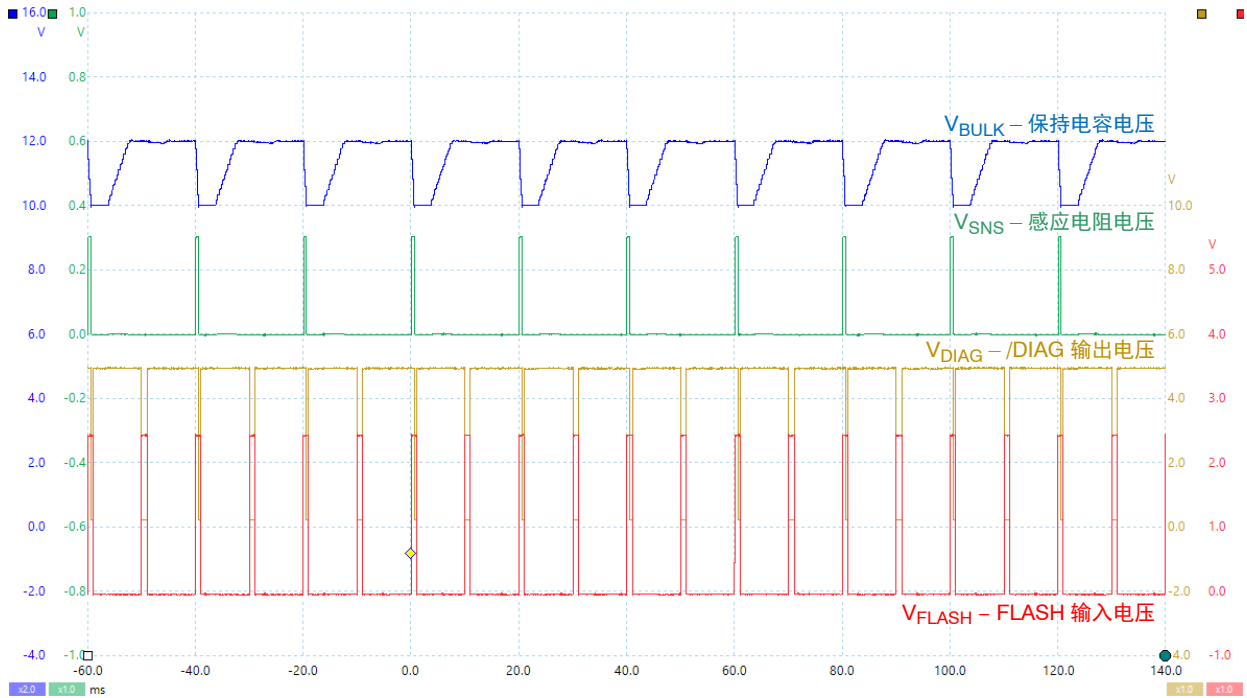


图 35. 最小 LED 关闭时间和最大 LED 开启时间限制的操作

图 36 显示了 LED 阳极-阴极短路情况下的驱动器操作。NCV7694 会监控 LED 灯串的阳极-阴极电压，并在该电压低于 1.22 V 时报告故障。在 FLASH 输入被

激活后， V_{DIAG} 被拉低 30 μ s。在此情况下，MOSFET T1 暴露于高于正常值的峰值功耗，但它经受住了该测试。

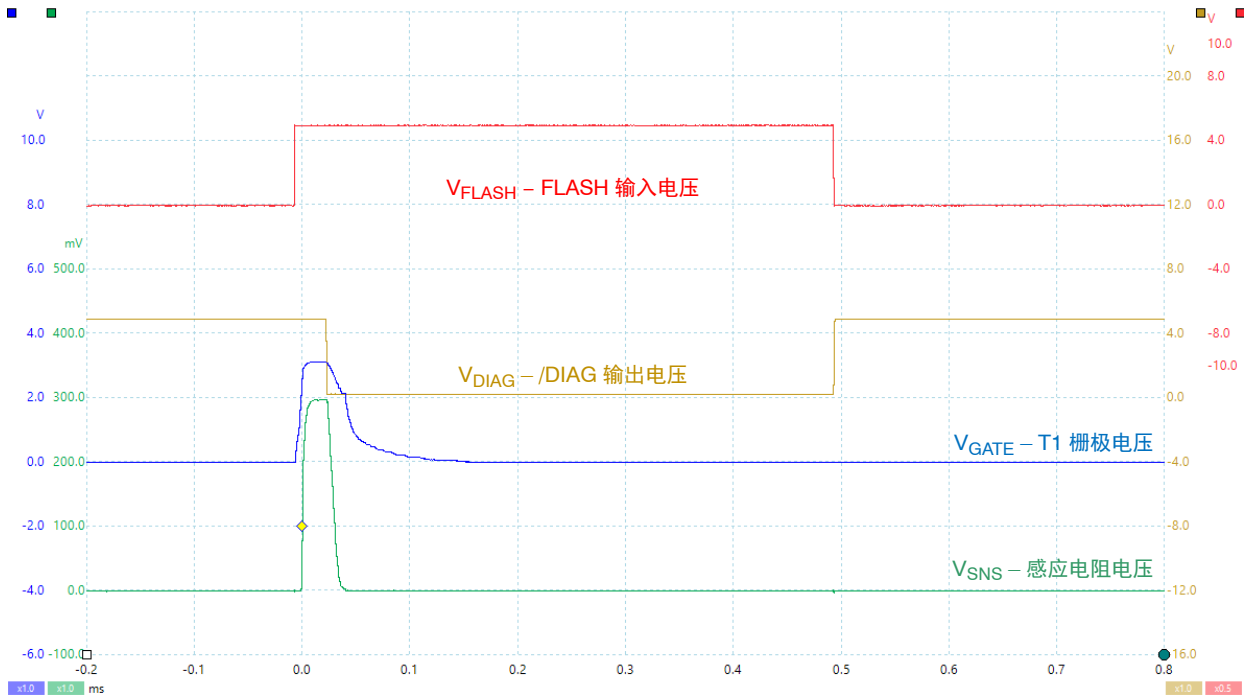


图 36. LED 阳极至阴极短路期间的 LED 驱动器操作

TND6416/D

图 37 显示了当 FLASH 信号被禁用时 T1 MOSFET 漏极短路到 GND 的情况。这种情况导致 V_{BULK} 快速放电。NCV7694 检测到 V_{DET} 的电压下降到 0.35 V 以下，并在 $10\text{ }\mu\text{s}$ 的消隐期后将 V_{DIAG} 拉低到 GND。一旦 FLASH 信号被激活且 T1 MOSFET 漏极短路至

GND，NCV7694 检测到 $V_{DET} < 0.35\text{ V}$ 且 $V_{SNS} < 0.15\text{ V}$ ，这再次导致故障被置于有效电平并下拉 V_{DIAG} 。 V_{DIAG} 在检测到第一个故障后的 $10\text{ }\mu\text{s}$ 或 $22\text{ }\mu\text{s}$ 后被拉低，具体时间取决于第一个检测到的故障是什么。

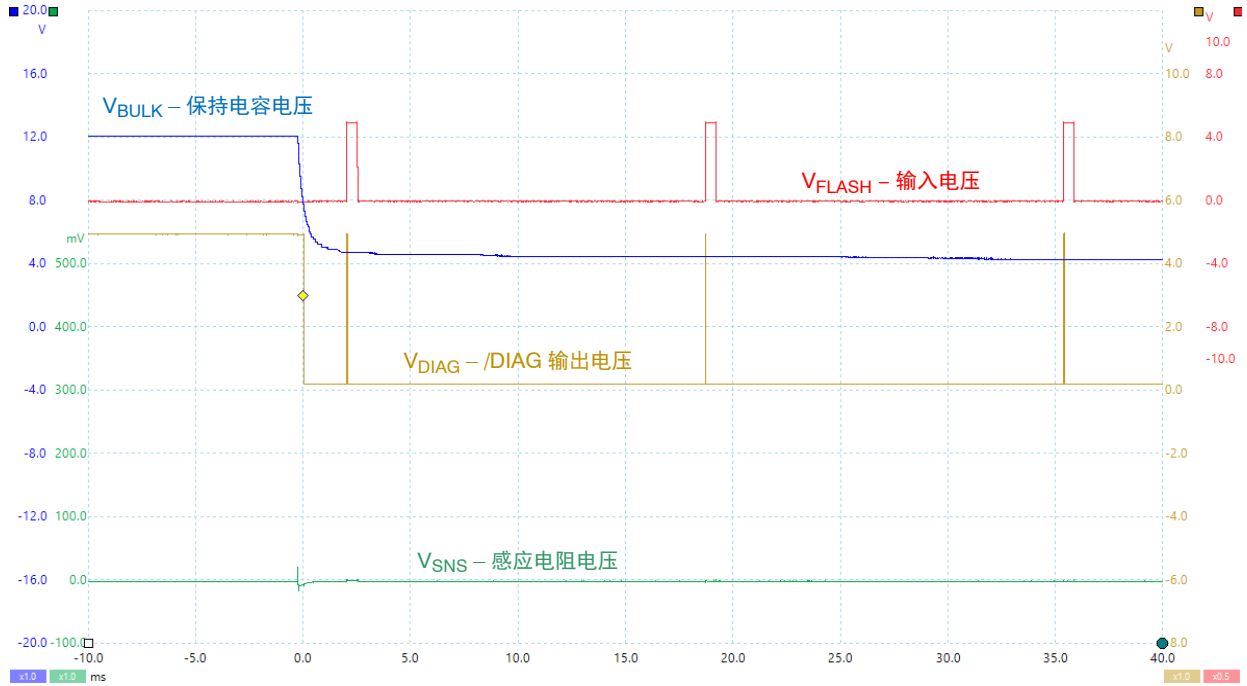


图 37. T1 MOSFET 漏极对地短路期间的 LED 驱动器操作

图 38 演示了当 V_{FLASH} 被禁用时 T1 V_{DS} 的短路情况。在这种情况下，会瞬间从 C_{BULK} 汲取高达 20 A 峰值的大电流。一旦 V_{DET} 低于 0.35 V ，电容器迅速放电。

V_{DIAG} 引脚变低表示有故障，并会禁用 PFP2895V 负载开关。如果当 V_{FLASH} 激活时故障仍然存在，那么 V_{DIAG} 在检测到第一个故障后的 $10\text{ }\mu\text{s}$ 或 $22\text{ }\mu\text{s}$ 后被拉低，具体时间取决于第一个检测到的故障是什么。

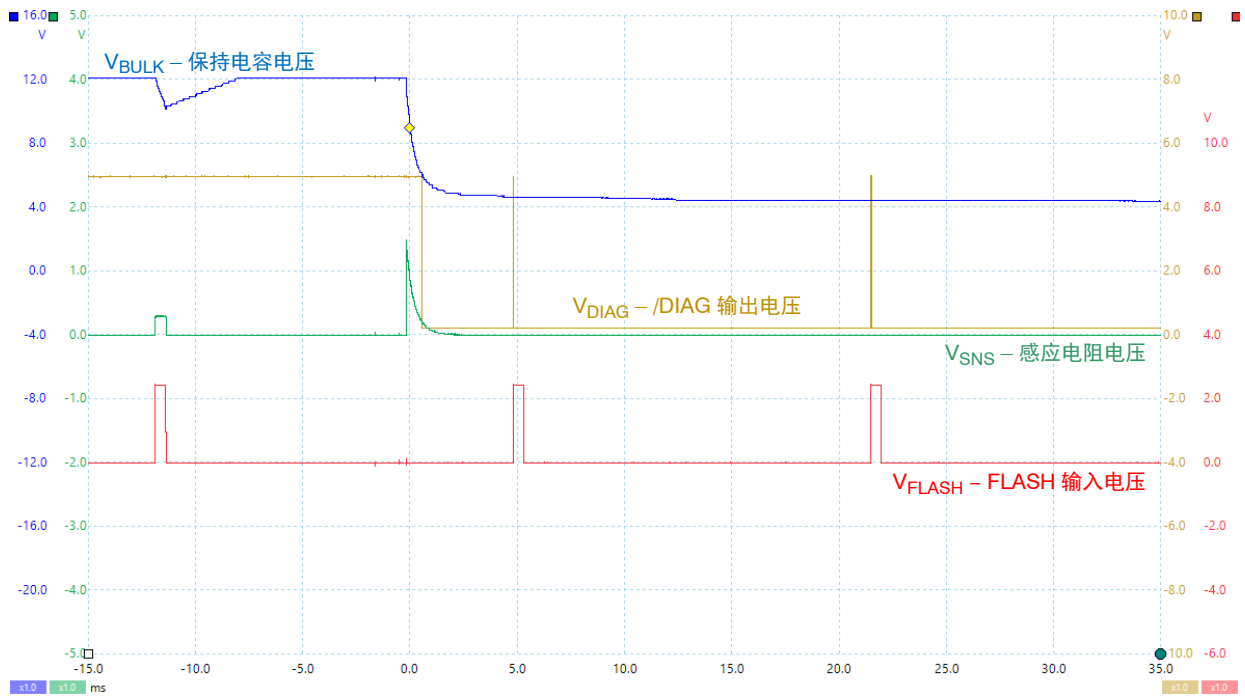


图 38. T1 MOSFET V_{DS} 短路期间的 LED 驱动器操作

图 39 演示了 LED 驱动器输入过压保护的操作。一旦 LED 驱动器的输入电压 V_S 超过 16.8 V, PPF2895V

高边开关将被禁用, 这将终止对保持电容 V_{BULK} 的充电。

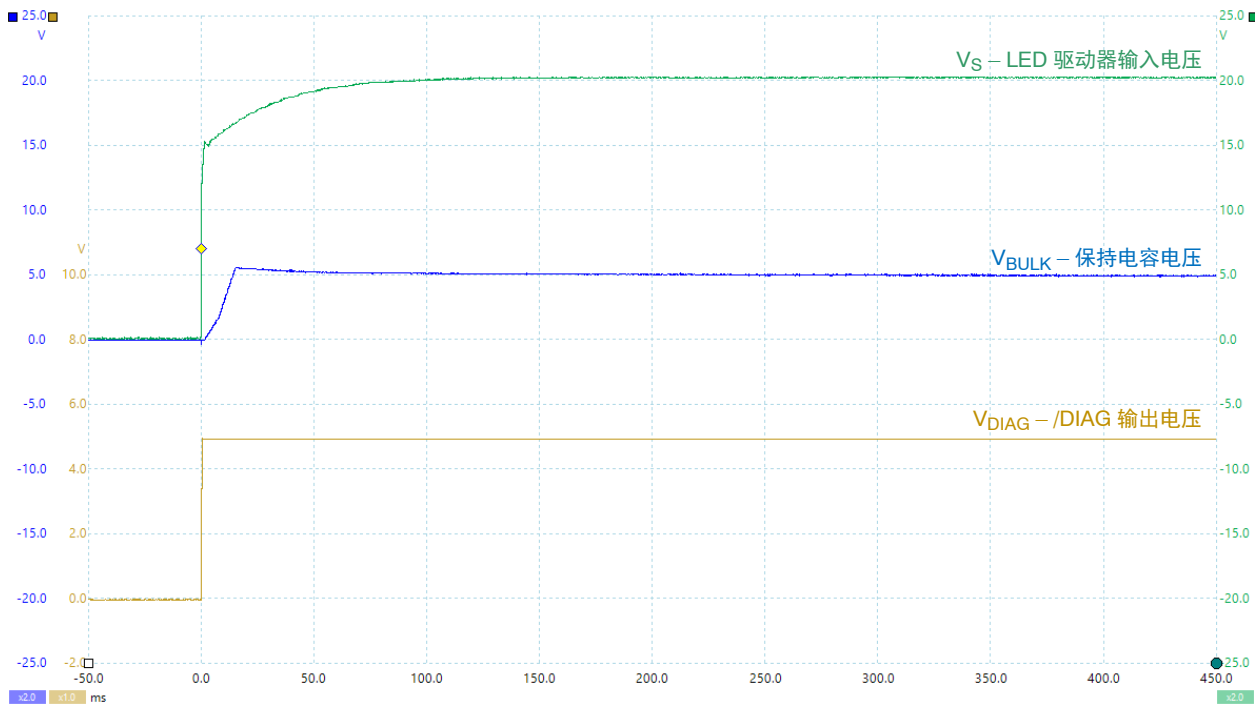


图 39. 输入过压条件下的 LED 驱动器操作

TND6416/D

结论

安森美的这份参考设计详细介绍了适用于驾驶员和乘员监控应用的近红外 LED 驱动器的完整解决方案。该设计完全基于以下安森美 IC:

- NCV7694 LED 驱动器
- FPF2895V 限流高边开关
- NCV803 电压检测器
- NCV8730 LDO

所描述的设计功能是一套广泛的保护和诊断机制, 涵盖 LED 灯串开路和短路保护、人眼安全防护、MOSFET 短路保护、输入电流限制、输入过压保护。

此参考设计提供了有关每个不同构建块的分步设计指南:

- 限电流
- 过压保护
- 保持电容
- 眼睛安全防护
- 功率 MOSFET
- LED 电流调节回路

我们在正常运行期间和[评估结果](#)中涵盖的各种故障情况下对该设计进行了评估。

参考文献

- [1] G. Breglio, F. Frisina, A. Magri, and P. Spirito, "Electro-Thermal Instability in Low Voltage Power MOS: Experimental Characterization," IEEE Proceedings ISPSD 1999, Toronto, p233

onsemi, Onsemi, and other names, marks, and brands are registered and/or common law trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC dba "onsemi" or its affiliates and/or subsidiaries in the United States and/or other countries. onsemi owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of onsemi's product/patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marking.pdf. onsemi reserves the right to make changes at any time to any products or information herein, without notice. The information herein is provided "as-is" and onsemi makes no warranty, representation or guarantee regarding the accuracy of the information, product features, availability, functionality, or suitability of its products for any particular purpose, nor does onsemi assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. Buyer is responsible for its products and applications using onsemi products, including compliance with all laws, regulations and safety requirements or standards, regardless of any support or applications information provided by onsemi. "Typical" parameters which may be provided in onsemi data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. onsemi does not convey any license under any of its intellectual property rights nor the rights of others. onsemi products are not designed, intended, or authorized for use as a critical component in life support systems or any FDA Class 3 medical devices or medical devices with a same or similar classification in a foreign jurisdiction or any devices intended for implantation in the human body. Should Buyer purchase or use onsemi products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold onsemi and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that onsemi was negligent regarding the design or manufacture of the part. onsemi is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

ADDITIONAL INFORMATION

TECHNICAL PUBLICATIONS:

Technical Library: www.onsemi.com/design/resources/technical-documentation
onsemi Website: www.onsemi.com

ONLINE SUPPORT: www.onsemi.com/support

For additional information, please contact your local Sales Representative at www.onsemi.com/support/sales