

Application Note

使用 **TPS92205x** 降压 **LED** 驱动器为 **LED** 频闪应用供电



Ari Zhang, Lucia Gao

摘要

基于 LED 的消防频闪灯产品必须产生可重复的高强度光脉冲，同时最大限度地降低输入能量。UL 1638/ULC 526 标准更新后，要求额定光输出基于最长 20ms 的光脉冲，这使得 LED 电流上升时间成为有效频闪效率的直接影响因素。本应用手册介绍了如何在短脉冲频闪设计中使用 TPS92205x 降压 LED 驱动器系列，重点在于避免器件在低占空比操作期间发生重复关断和软启动的问题。该产品系列会在发出主光脉冲之前，先引入预处理 EN/PWM 脉冲，用于提前准备好内部基准和控制环路。本手册还探讨了外部补偿、输出电容和电感器选型，以助在缩短电流上升时间的同时，保持稳定的操作状态和可接受的过冲幅度。

内容

1 简介.....2

2 旨在避免重复软启动的 EN/PWM 时序设计.....3

 2.1 TPS922050/1 快速 PWM 调光行为.....3

 2.2 TPS922052/3/4/5 快速 PWM 调光行为.....3

 2.3 时序设计指南.....4

 2.4 测试验证和结果.....5

3 外设电路参数优化.....6

 3.1 补偿网络.....6

 3.2 C_{OUT} 7

4 总结.....8

5 参考资料.....8

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

可见消防频闪灯产品正越来越多地从氙气管过渡到 LED 方案。与氙气解决方案相比，LED 能够降低待机功耗和闪光能耗、简化光学与机械设计、延长系统寿命并实现数控光分布。

但是，基于 LED 的频闪系统必须在极短时段内输出绝大部分有效光能。如果 LED 电流缓慢上升，则在 LED 达到其额定电流之前，将会消耗部分可用的闪光持续时间。这会降低有效光输出，并减少每焦耳的有效坎德拉。因此，LED 驱动器必须在主频闪事件期间提供快速、可重复且几乎为方波的电流脉冲。

2023 年版的 UL 1638 / ULC 526 对火警和信号系统中所用可见信号器件的要求进行了界定。对于公共模式可见光信号器件，闪光速率必须为每秒 1 到 2 次，在 10% 振幅点之间测得的闪光持续时间不得超过 200ms，并且额定光输出应基于最长 20ms 的光脉冲。如果实际脉冲持续时间长于 20ms，则测得的光输出将折算为 20ms 等效值。正因如此，LED 电流上升时间成为满足所需有效光输出要求的关键因素。

而 TPS92205x 系列就非常适合高效 LED 频闪设计。该系列器件集成了功率 MOSFET，支持高压降压 LED 驱动器操作，通过外部传感电阻调节 LED 电流，并且提供 PWM 和模拟调光选项。TPS922050 和 TPS922051 适用于 1A 和 2A 应用，而 TPS922052、TPS922053、TPS922054 和 TPS922055 则支持电流更高的 LED 驱动器设计。

对于使用 TPS922055 的大功率频闪应用，一个重要的设计注意事项在于 EN/PWM 低电平时间行为。如果 EN/PWM 引脚长时间保持低电平，该器件将进入关断状态，下一次脉冲必须经历启动和软启动序列之后，LED 电流才能达到配置值。在具有 20ms 光脉冲的 1Hz 频闪应用中，这一延迟可能会显著降低有效光输出。本应用手册讨论了在使用 TPS92205x 器件时，用于缩短 LED 电流上升时间和提升频闪效率的时序控制和外围电路优化方法。

2 旨在避免重复软启动的 EN/PWM 时序设计

2.1 TPS922050/1 快速 PWM 调光行为

对于 TPS922050/1，在 PWM 调光过程中，LED 电流会随着 DIM 输入的状态变化快速响应。如 图 2-1 所示，当 PWM 输入为高电平时，电感器电流会逐渐爬升至稳压值。当 PWM 输入为低电平时，LED 电流则会降至零。该器件专为实现快速 PWM 调光而设计，因此 TPS922050/1 非常适合低电流频闪设计。

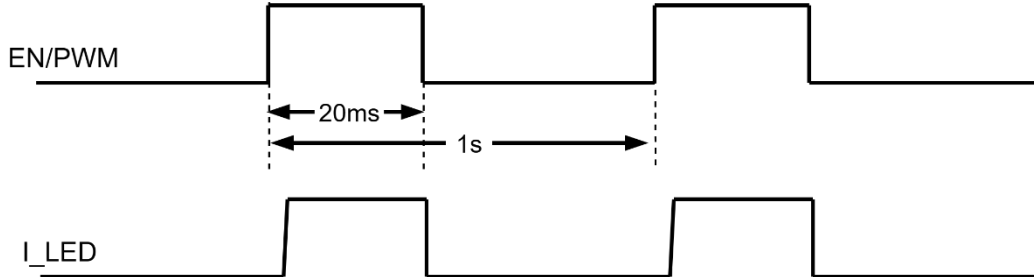


图 2-1. TPS922050/1 在快速 PWM 调光期间的 LED 电流响应

2.2 TPS922052/3/4/5 快速 PWM 调光行为

对于 TPS922052/3/4/5，如果 EN/PWM 引脚的关断时间短于使器件关断所需的 PWM 输入最短关断时间 ($t_{PWM_IN_OFF}$)，则该引脚可支持快速响应。如果 EN/PWM 引脚保持低电平的时间超过 $t_{PWM_IN_OFF}$ ，该器件将进入禁用状态。下一个 EN/PWM 脉冲必须重新启用器件、满足启动和调光模式进入要求，并等待内部基准和补偿路径稳定下来。图 2-2 展示了重复软启动可能导致 LED 电流在每次闪光开始时缓慢爬升。

数据表介绍了启动序列和调光模式进入要求。EN/PWM 引脚需要一个超过 5 μ s 的初始使能脉冲方能启用器件，并且调光模式在内部时序序列完成后之后才会启动。对于模拟、混合或灵活调光情形，VREF 可能需要毫秒级的稳定时间；当目标基准为 200mV 时，初始 VREF 变化约为 5ms。

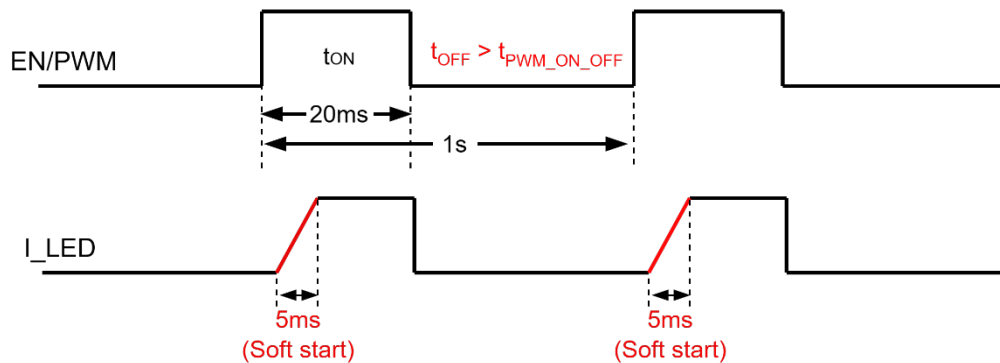


图 2-2. TPS922052/3/4/5 在 PWM 调光期间因重复软启动导致的 LED 电流延迟

为了避免重复关断和软启动导致 LED 电流延迟，可以在正常 PWM 导通脉冲之前插入一个窄幅预处理脉冲。预处理脉冲并非用于产生有效光输出。其目的是唤醒器件、满足启动和调光模式选择要求，并让内部基准通路在主 PWM 脉冲开始之前做好准备。

建议按以下顺序进行：

- 首先在 EN/PWM 上应用窄幅脉冲；
- 然后在一段受控的关断时间内将 EN/PWM 保持为低电平
- 最后，在内部基准有足够的时间稳定后，应用正常的 PWM 导通脉冲。

图 2-3 展示了一个典型示例：

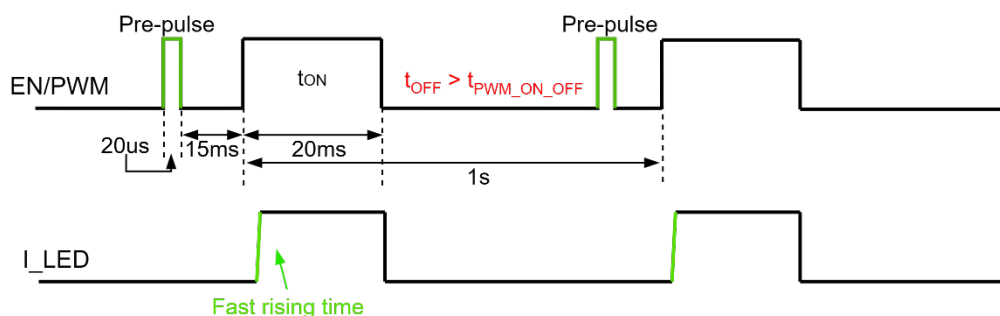


图 2-3. EN/PWM 预处理脉冲时序，用于消除频闪操作中的软启动延迟

2.3 时序设计指南

表 2-1 总结了预处理脉冲方法的推荐时序参数。以下数据值根据以下原则选取：

- 对于预脉冲宽度，最短脉冲持续时间应长于系统总延迟时间，以确保驱动器和 LED 电流路径有足够的时间做出响应。最大预处理脉冲宽度应予限制，使 LED 电流尚未完全稳定到稳压输出电平，从而防止预处理脉冲产生意外的可见光输出。
- 对于预处理脉冲之后的可控关断时间，最短关断时间应足够长，以使器件完成软启动并确保内部基准、偏置电路和控制环路均已达到稳定的运行状态。最长可控关断时间必须保持短于禁用器件所需的最短 PWM 输入关断时间，以使 IC 保持启用状态并为后续主闪存脉冲做好准备。

表 2-1. 预处理脉冲方法的推荐时序参数

参数	推荐值	设计目的	避免违规风险
预处理脉冲宽度， t_{pre_pulse}	$10\mu s < t_{pre_pulse} < 150\mu s$	启用器件并满足调光模式进入逻辑要求	过长：可见闪光或不需要的电流
预处理脉冲后的可控关断时间， t_{OFF}	$10ms < t_{OFF} < t_{PWM_IN_OFF}$	使内部 VREF/软启动达到稳定状态，同时避免再次关断	过短：电流爬升缓慢；过长：器件可能重新进入关断状态
主 PWM 脉冲宽度	20ms	产生预期的光输出脉冲	如果在 VREF 稳定之前应用，LED 电流不会呈现方波形态

2.4 测试验证和结果

已在以下测试条件下对时序设计进行了验证： $V_{in}=54V$ 、 $V_{out}=30V$ 、 $I_{LED}=3A$ 。该测试对比了两种情形：无预处理脉冲情况下的重复启动，以及在主 PWM 脉冲到达之前使用预处理脉冲的操作方式。

• 无预脉冲的情形

当未应用预处理脉冲时，器件会在长时间关断期间反复进入关断状态。随后的每一个 PWM 脉冲都会触发一次完整的软启动周期，从而导致 LED 电流缓慢上升，用时约为 5ms。图 2-4 展示了电流逐渐上升的情形，但在达到目标振幅之前存在明显延迟。

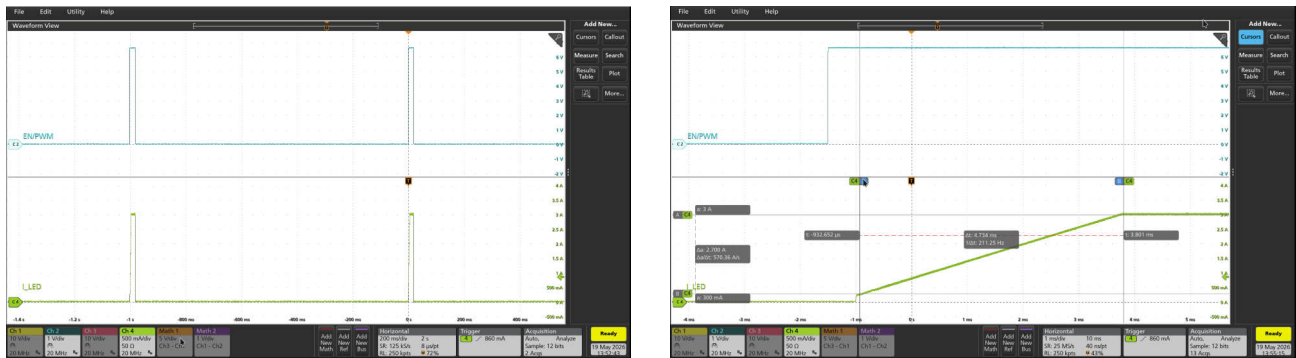


图 2-4. 无预脉冲时的 LED 电流启动响应

• 有预脉冲的情形

在加入窄幅预处理脉冲后，内部基准和控制环路在主 PWM 脉冲到达之前便已进入稳定状态。图 2-5 证实了上升时间大幅缩短至微秒级别，从而实现近乎瞬时的电流响应。

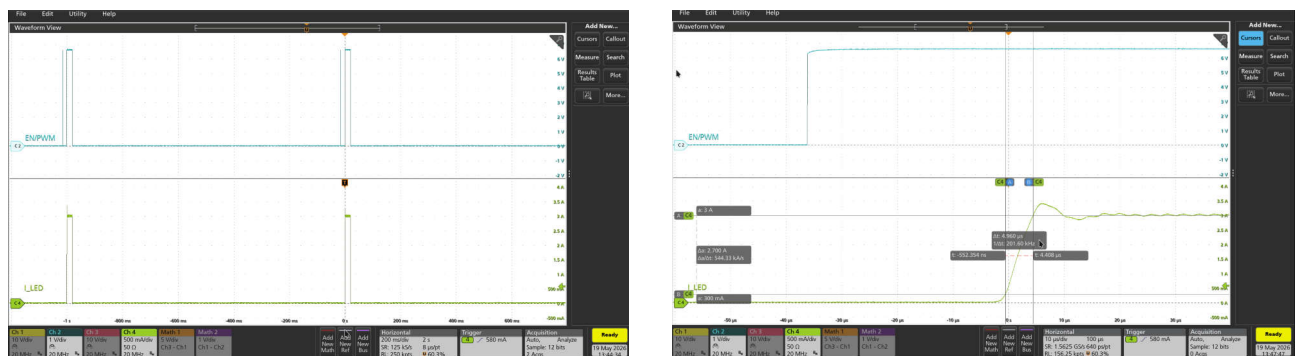


图 2-5. 具有预脉冲的 LED 电流启动响应

3 外设电路参数优化

本节介绍了外部环路补偿网络、输出电容器和电感器如何影响 LED 电流的开启瞬态。目标是缩短上升时间，同时保持可接受的过冲幅度、环路稳定性、LED 电流应力和输出电压纹波。图 3-1 中所示的简化版降压 LED 驱动器功率级可用作参考电路。

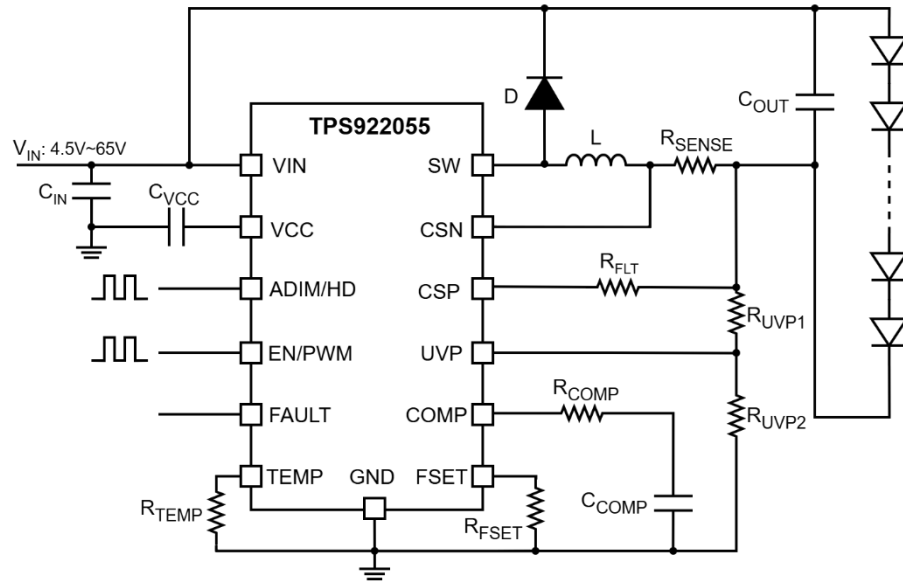


图 3-1. 简化版原理图

3.1 补偿网络

对于降压 LED 驱动器，补偿网络决定了电流调节环路的动态响应特性。较小的 C_{COMP} 会提升理论环路带宽，原因是主要补偿极点会移至更高频率。当 R_{COMP} 与 C_{COMP} 串联使用时，补偿零点大约为：

$$f_z = \frac{1}{2\pi \times R_{COMP} \times C_{COMP}} \quad (1)$$

减小 C_{COMP} 会使主要补偿极点移至更高频率，并提高中低频范围内的环路增益。因此，只要保持足够的相位裕度，电流调节环路就可以实现更高的交叉频率和更快的瞬态响应。图 3-2 和表 3-1 显示了仿真结果。在 PWM 调光开启期间，这种更快的响应有助于 LED 电流更快地达到其目标值，从而缩短 LED 电流上升时间。然而，较小的 C_{COMP} 可能会导致 LED 电流的过冲增大。因此， C_{COMP} 的选型应通过平衡调光响应速度、环路稳定性和峰值 LED 电流来确定。

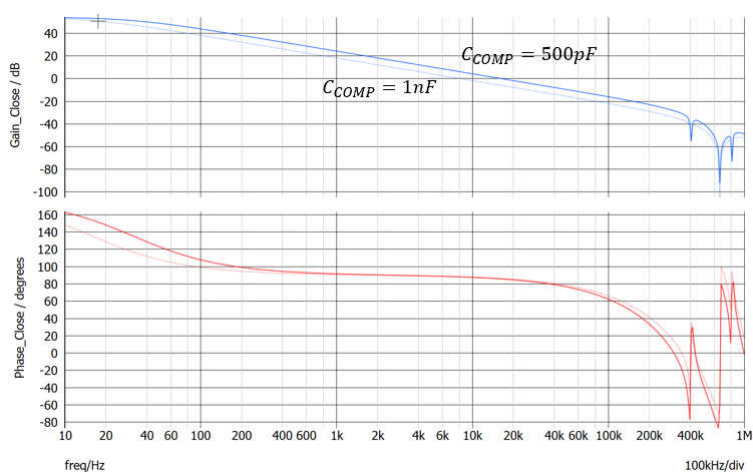


图 3-2. 具有不同 C_{COMP} 的环路仿真

表 3-1. C_{OUT} 对上升时间和峰值电流的影响

C _{COMP} (pF)	电峰值电流 (A)	上升时间 (us)
470	3.81	4.21
690	3.61	4.36
910	3.42	4.92
1000	3.29	6.11

3.2 C_{OUT}

减小C_{OUT}也可以缩短上升时间，原因是在开启期间需要建立的输出节点电荷更少。不过，C_{OUT}也是 LED 输出端主要的阻尼和纹波滤除元件。因此，过小的C_{OUT}会导致 LED 电流纹波增大、输出电压响铃加剧和峰值电流在转换期间升高。合乎实际的目标是选择可在各种线路、负载、温度和调光频率条件下仍能满足 LED 电流纹波、过冲、声学噪声和 EMI 要求的最小C_{OUT}。

表 3-2. C_{OUT} 对上升时间和峰值电流的影响

C _{OUT} (uF)	电峰值电流 (A)	上升时间 (us)
1	3.73	4.32
2.2	3.42	4.92
3.2	3.38	6.71
4.4	3.29	7.08

4 总结

对于 LED 消防频闪灯应用，驱动器必须要在额定短脉冲时间内输出有效的光能。窄幅 EN/PWM 预处理脉冲可让将器件提前唤醒，以便内部基准通路和控制环路在主 20ms 光脉冲到来之前做好准备。基准数据显示，不使用预处理脉冲时，电流上升时间约为 5ms；而使用预处理脉冲后，电流上升时间缩短至约 5μs。正确设置时序方案后， C_{COMP} 、 C_{OUT} 您可以优化电感值，以进一步缩短上升时间，同时控制过冲、纹波、EMI 和 LED 应力。推荐的设计方法是首先优化时序，然后根据实测电流波形调整功率级元件，最终找到最佳解决方案。

5 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，[TPS922050/1 具有 PWM/模拟调光功能的 65V、1A/2A 降压 LED 驱动器](#)，数据表。
2. 德州仪器 (TI)，[TPS92205x 具有电感式快速调光功能的 65V 2A/4A 降压 LED 驱动器](#)，数据表。
3. UL 1638 [UL 1638](#)，网页。

重要通知和免责声明

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月