Application Note

如何降低 LED 驱动器上的声学噪声

Peter Xu

摘要

由于具有出色的稳定性和低成本特性，全局调光 LED 驱动器广泛用于汽车显示屏和 HUD。LP886x-Q1 系列器件具有大调光比和系统稳定性，因此是市场上一种成熟的设计。但是，由于不同应用中对 LED 电流和调光比的要求不同，实际实现中可能会出现声学噪声。本文档主要讨论此类噪声的原因并且介绍了降低噪声的相应设计。

内容

1 简介.....2
2 噪声和设计.....3
3 电容器声学噪声和解决方案.....6
4 总结.....10
5 参考资料.....10

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

English Document: SPVA076
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 简介

LED 驱动器模块始终包含电池、LED 驱动器及 LED。在汽车市场中，大多数电池都基于 12V 系统且电压范围为 9V 至 16V。输出电压范围为 25V 到 45V。因此，大多数 LED 驱动器都使用升压拓扑。如今，汽车中实施的显示模块越来越多、例如仪表组、中心信息显示屏、后座显示屏和抬头显示。这些显示屏的尺寸变得更大。这需要集成更多的 LED，从而导致更高的输出电压。当输出电压增加时，整个系统需要更高的环路稳定性和系统稳定性。

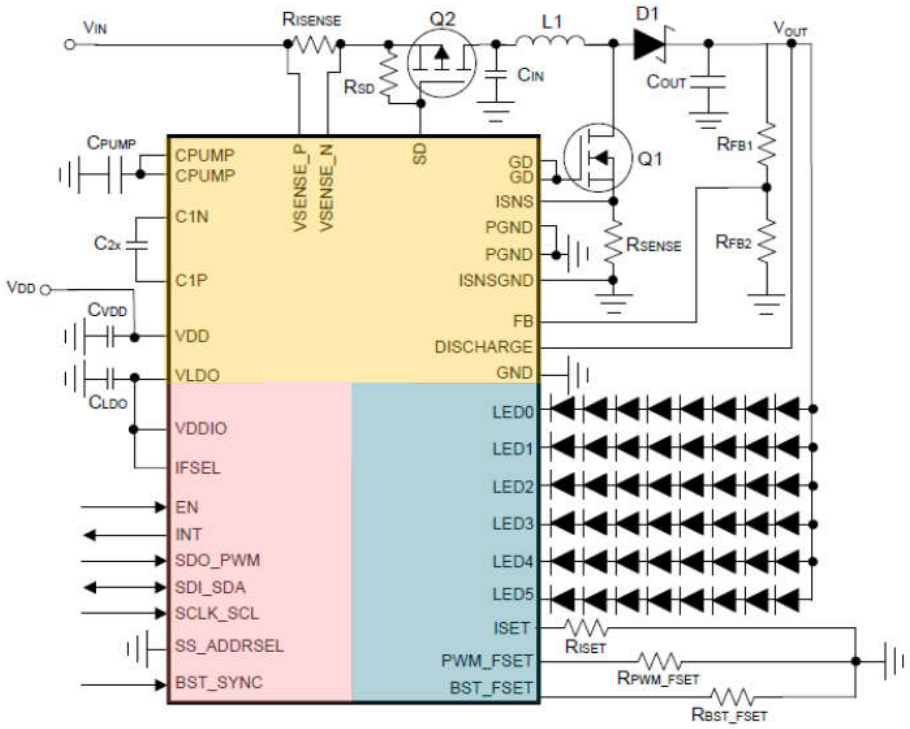


图 1-1. LED 驱动器方框图

有时，当 LED 驱动器运行时，客户会听到噪声。输出电流越大，噪声就越大。在多层陶瓷电容器 (MLCC) 中观察到的声学噪声现象主要归因于陶瓷材料固有的压电效应。由于独特的多层陶瓷结构，MLCC 在承受端子上时变电场时会表现出成比例的机械应力变化。当产生的振动频率处于人类可闻范围 (20Hz – 20kHz) 内时，声发射会表现为可闻噪声。

电感器发出的声学噪声主要来自磁致伸缩：在经受高频交流电时，磁芯材料在时变磁场下会经历周期性的微观应变，从而引起机械振动。这种振动与周围结构和空气耦合，从而产生声波。这种与压电不同的现象构成了寄生磁机械能量转换，这在 LED 驱动器电路等具有脉冲电流的电路中常见。

LED 驱动器中的声学噪声给现代照明系统带来了巨大挑战。这些问题是由开关操作、磁性元件和不良电路设计而引起。过多的噪声不仅会影响电磁兼容性 (EMC)，还会降低用户体验和系统可靠性。为了应对这些挑战，工程师必须采用将原理图设计与 PCB 布局优化相结合的整体方法。本文探讨了降低两级噪声、验证是否符合行业标准并提高性能的策略。

总的来说，本应用手册是供用户降低 LED 驱动器上噪声的设计指南。

English Document: SPVA076
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2 噪声和设计

识别声学噪声源至关重要。在 LED 驱动器中，主要有两种类型，即电感器产生的噪声和电容器产生的噪声。要确定哪个元件会产生声噪声，可以使用一种简单的方法：使用长实心物体（例如铅笔），将一端对着电感器放置，并将另一端靠在耳朵上。如果通过铅笔检测到噪声，则电感器成为噪声源。

确认噪声源为电感器后，测量 SW 节点波形和电感器电流波形。通常，可以在这些波形中观察到 20Hz 至 20kHz 声学范围内的频率分量。

导致电感器声学噪声的因素有多种，包括电感值和设计规格之间的差异、电感器饱和电流不足、输入输出电压差过大和环路不稳定。确定出现声学噪声的电感器后，可以使用电流探头测量电流波形。

选择不合适的电感器可能会导致声学噪声。如图 2-1 所示，检测电感器电流波形中的周期性尖峰表明电感器饱和引起的异常，这随后会产生声学噪声。为了缓解这种现象，建议将电感器替换为具有更高饱和电流的电感器，从而防止与饱和效应相关的复杂性。

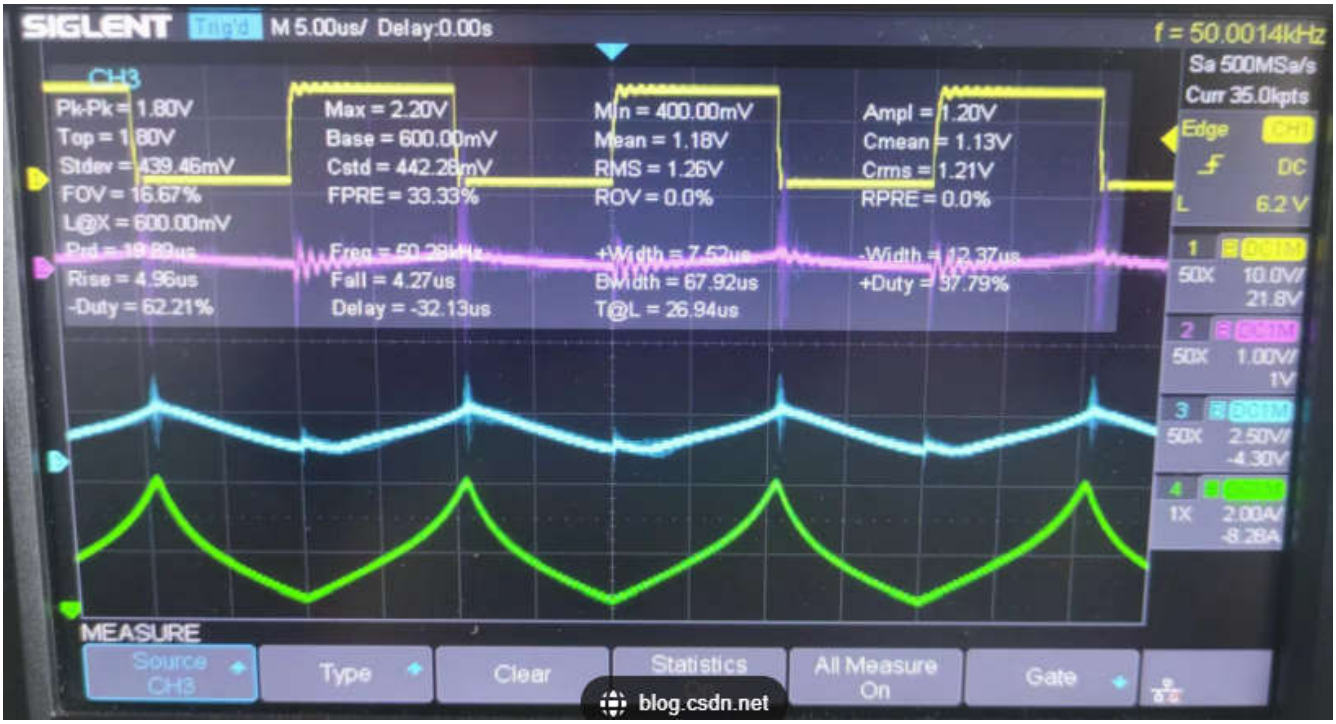


图 2-1. 出现尖峰时的电感器电流波形（绿色）

观察到电感器电流波形中的周期性下降可归因于输出过电压或过大的输入-输出电压差，导致设备无法在固定开关频率条件下维持输出调节。为了解决这种现象，建议增大输入电压或降低开关频率，从而验证输出电压调节是否稳定。

观察到电感器电流波形中的周期性下降可能归因于输出过电压或过大的输入-输出电压差，导致设备无法在固定开关频率条件下维持输出调节。为解决这种现象，TI 建议提高输入电压或降低开关频率，从而验证稳定的输出电压调节。

English Document: SPVA076
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

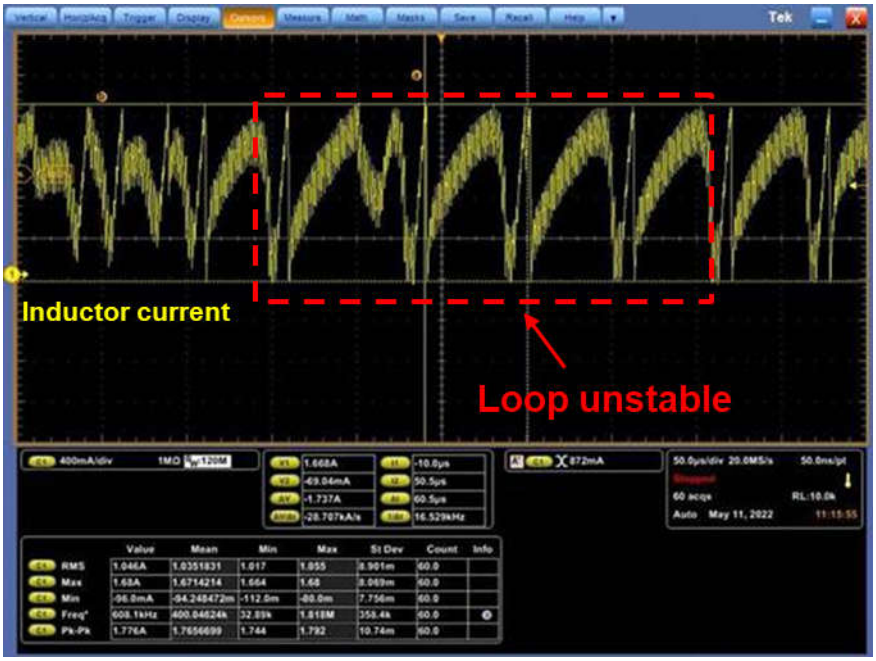


图 2-2. 标题

如所示，电感器电流波形具有不稳定的特性，其中低频纹波分量耦合到开关频率中，从而导致电感器发出声学噪声。此时，应系统地检查原理图设计，并特别注意环路补偿参数。所有 TI LED 驱动器通常都附带专有计算文件，这些文件可以对环路响应特性进行初步验证，如图 2-3 所示。

Cout_effective_actual	20	uF	
Gain Margin Gap	6.0	dB	If gap > 3dB, external compensation is recommended
External compensation used	Yes		
Recommended R4 (FB)	162.0	kOhm	
Recommended $C_{comp\ (FB)}$	96.1	nF	
R4_actual	162	kOhm	
Ccomp_actual	100	nF	
Pole_C_{COMP}	6.7	Hz	Recommend In the range of 1~10Hz
Gain Margin Gap_actual	2.7	dB	Recommend the range of +/-3dB

图 2-3. LP8866-Q1 计算文件

在升压开关转换器配置中，相位裕度通常应超过 45 度，同时保持 10dB 以上的增益裕度。此外，作为最低规格，交叉频率需要超过 1kHz。在图 2-4 所示的 LED 驱动器电路上进行的环路响应显示相位裕度小于 45 度，这无法满足指定的设计要求。在对环路补偿网络进行迭代优化后，重新计算的环路响应参数如图 2-5 所示。

English Document: SPVA076
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

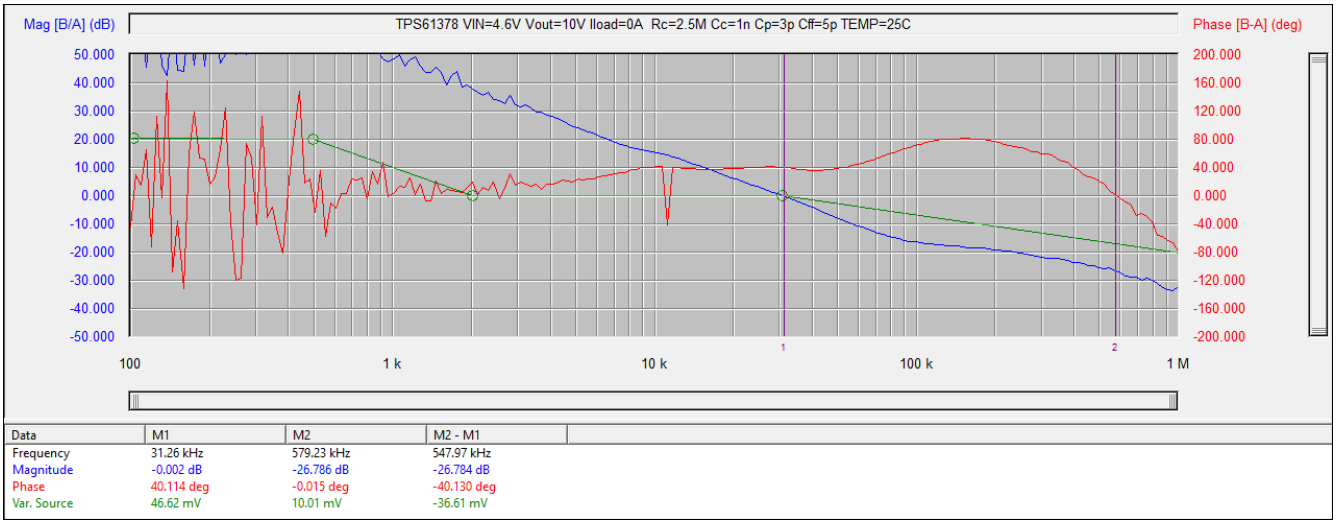


图 2-4. 不稳定环路的环路响应结果（相位裕度 = 40 度）

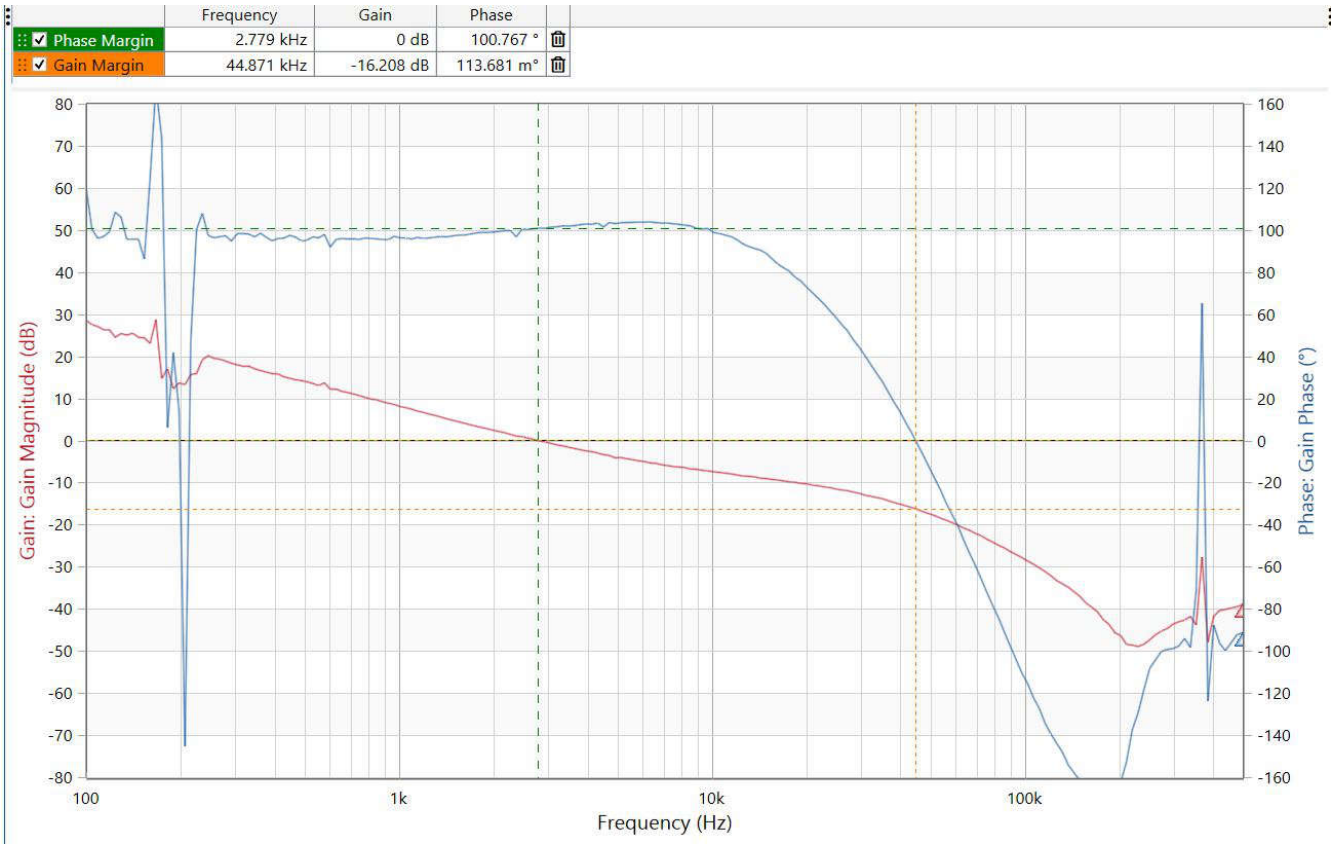


图 2-5. 稳定环路的环路响应结果（相位裕度 = 100 度）

此外，不适当的元件选择会构成额外的潜在噪声源。必须特别注意电感元件的热特性，因为某些铁氧体磁芯材料在工作温度范围内会表现出显著的参数漂移，这会导致热条件变化时的不稳定。

为了进行全面验证，必须在指定的温度曲线上进行满负载测试，其中特别强调低温特性。该过程验证了环路稳定性裕度在整个工作温度范围内是否保持在可接受范围内。必须通过迭代补偿网络调整系统地解决热循环期间所观察到的偏差。

English Document: SPVA076
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3 电容器声学噪声和解决方案

在 LED 驱动器电路中，电容器声学噪声主要由 LED PWM 频率引起。如表 3-1 所示，显示了 LP8866-Q1 驱动器的 LED PWM 频率与调光分辨率之间的关系。理论上，当 LED PWM 频率处于人类可闻范围（20Hz 至 20kHz）内时，可能会出现可闻噪声。但是，在实际实现中，声发射幅度与多种因素相关，包括输出电流、调光模式、PCB 布局和电容器类型。在检测到可闻电容器噪声后，可以实现适度的调光分辨率降低，以将 LED PWM 频率提升到可闻阈值以上。然而，调光分辨率要求通常会对 LED PWM 频率施加上限。后续各部分将介绍 LED PWM 频率限制为固定值的情况下的缓解策略。

表 3-1. LP8866-Q1 上的 LED PWM 频率及调光分辨率

R_PWM_FSET (kΩ)	LED PWM 频率 (Hz)	PWM 调光分辨率（位）
3.92	152	16
4.75	305	16
5.76	610	15
7.87	1221	14
11	2441	13
17.8	4883	12
42.2	9766	11
124	19531	10

LED 驱动器通常会提供多种调光模式。对于 LP8866-Q1，可使用三种工作模式：PWM 调光、模拟调光和混合调光。其中，PWM 调光和混合调光主要用于实际应用。如图 3-1 和图 3-2 所示（其中上迹线表示 PWM 输入信号、下迹线表示 LED 电流波形），可以观察到不同的运行特性。

在 PWM 调光模式下，LED 电流波形严格遵循输入 PWM 占空比，而开关频率由 R_PWM_SET 电阻器配置决定。值得注意的是，在高电流应用中，压电式效应变得更加明显，因此更容易产生可闻噪声。

相反，混合调光按如下方式运行：当输入 PWM 占空比超过 12.5% 时，LED 电流将保持与输入占空比成比例的恒定值。只有当输入占空比低于 12.5% 时，系统才会以最大电流的 12.5% 转换为 PWM 运行模式。这种方法具有双重优势：在大电流下，恒流运行可消除可闻噪声和可见闪烁；在低电流下，受控 PWM 运行可确保一致的 LED 亮度，同时减轻传统 PWM 调光中固有的严重压电式效应。

因此，混合调光的战略性实现解决了 LED 驱动器应用中噪声抑制和调光精度之间的基本权衡。因此，在检测到 PWM 调光运行期间的声学噪声发射时，建议实施混合调光模式作为缓解策略。如果没有其他问题，混合调光是首选。

English Document: SPVA076
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

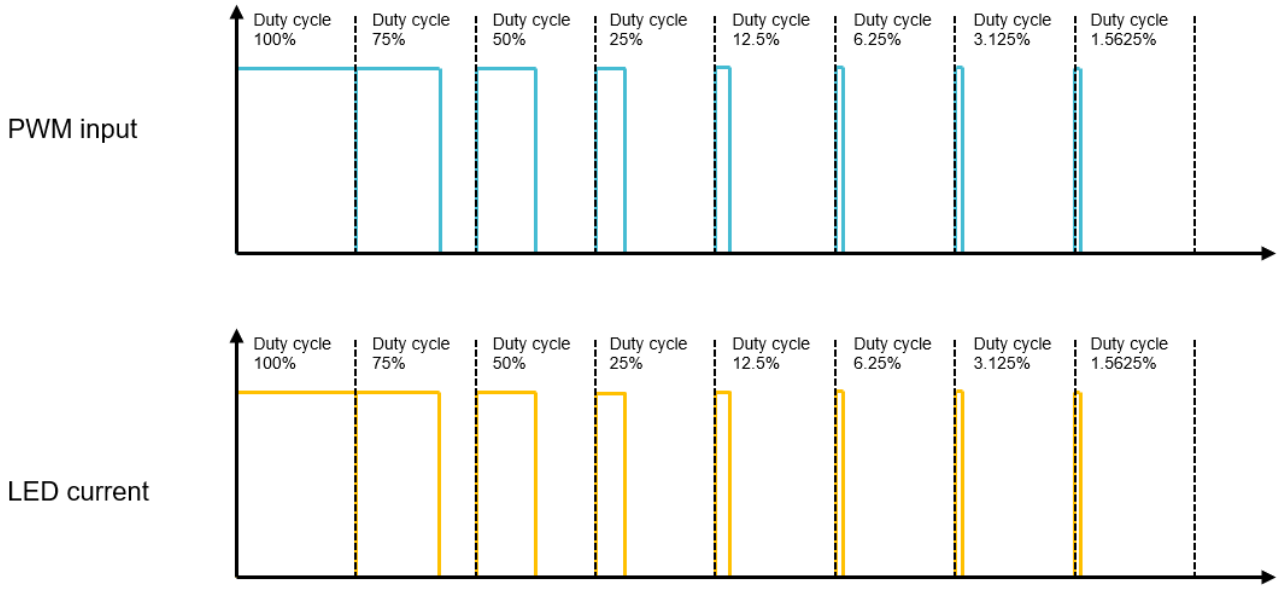


图 3-1. LP8866-Q1 PWM 调光模式

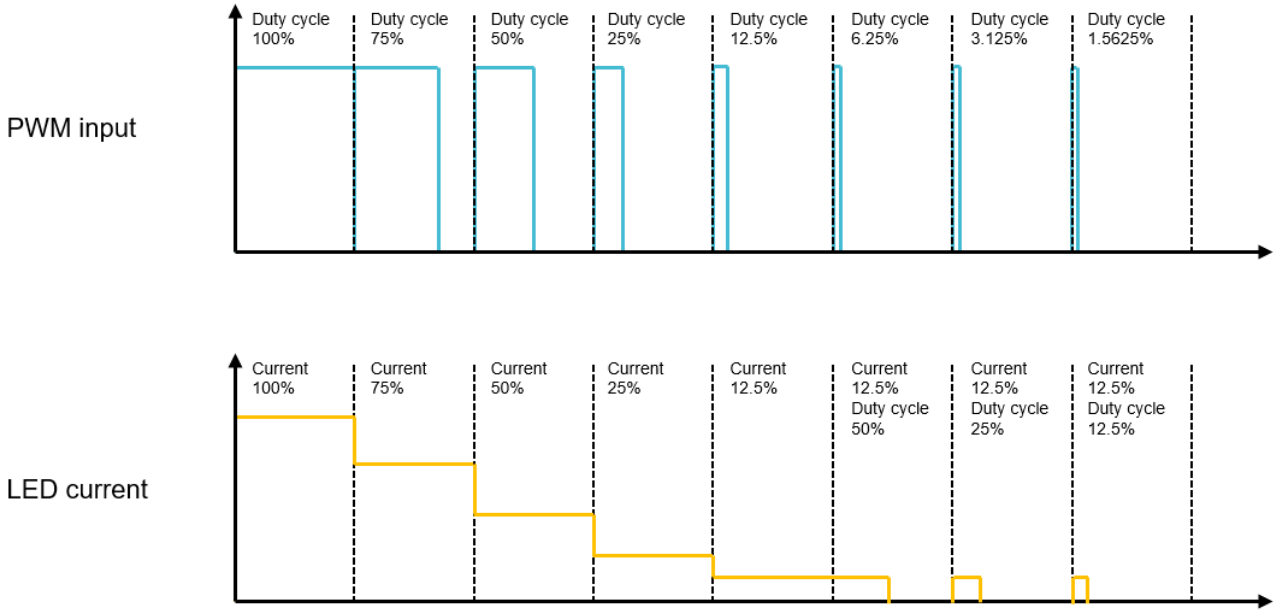


图 3-2. LP8866-Q1 混合调光模式

德州仪器 (TI) 最新的 LP8872-Q1 LED 驱动器采用专有增强型脉宽调制 (EPWM) 算法，该算法专门设计用于在保持固定调光分辨率的同时衰减可闻噪声发射。这种创新通过在器件寄存器配置中配置 EPWM_MODE 位来激活。

除了与调光频率相关的原因外，导致电容器可闻噪声的另一个可能原因是输入电压过高。

升压器件都具有最短导通时间。随着输入和输出之间的电压差降低，每个开关周期的导通时间变短。触发此最短导通时间后，器件会通过降低开关频率来保持输出电压调节。这就是 PFM 的工作方式，如图 3-3 中所示。当降低的开关频率处于人耳的可闻范围内时，会导致可闻噪声。

English Document: SPVA076
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

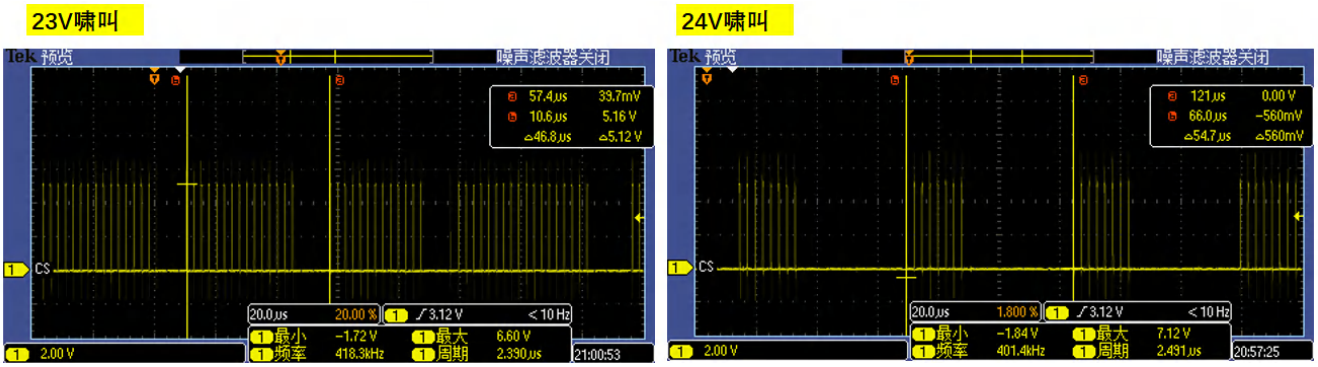


图 3-3. LP8866-Q1 PFM 中的开关频率

在某些应用中，输入电压测试范围为 9V 至 22V。根据数据表，LP8866-Q1 的最短开关时间为 150ns。在 400kHz 的开关频率和 24V 的输出电压下，最大输入电压约为 21V，这无法满足要求。在本例中，可以考虑使用 LP8872-Q1，因为其最短开关时间为 60ns，对应于约 22.5V 的最大输入电压。

除了切换到最小开关时间较短的器件外，也可以通过增大输出电压来解决该问题。以 24V 的输出电压为例，如果需要将输出电压增加 1V，由于 LED 驱动器的输出是电流源，则可以通过确定最大输出电流来选择电阻器。假设每个 LED 通道的最大电流为 90mA，则六个通道的最大 VLED 电流为 540mA，这需要大约两欧姆的电阻器。考虑到高温测试和散热问题，此处选择了三个并联 1206 封装的 6.8Ω 电阻器，如图 3-4 所示。如果您计划使用这种方法，请联系 TI 技术支部门，持并仔细考虑电阻值和封装尺寸。

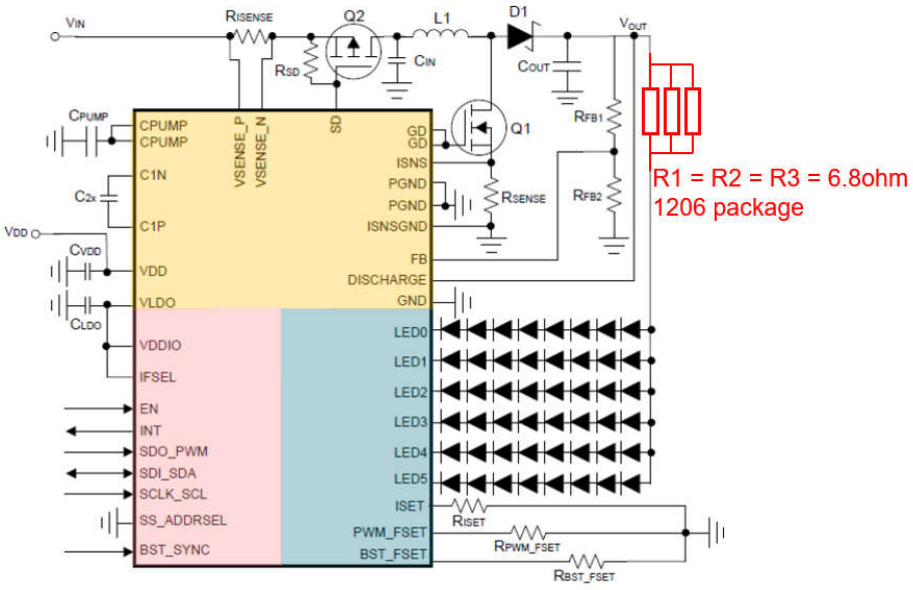


图 3-4. VLED 上的外部电阻器

从布局和电容器选择方面来看，有几种 PCB 布局技术可以有效地降低 LED 驱动器电路中的可闻噪声发射。如图 3-5 所示，通常在驱动器输出级部署多个陶瓷电容器，建议对相邻的 MLCC 采用正交放置配置。具体而言，如果在 90° 相对方向布置两个电容器，则可以通过抵消机械位移来减弱累积的压电式效应。这种几何对策通过在陶瓷电介质层中诱导反向应变矢量来降低净振动振幅，从而抑制人类可闻频率范围内的声发射。

English Document: SPVA076
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

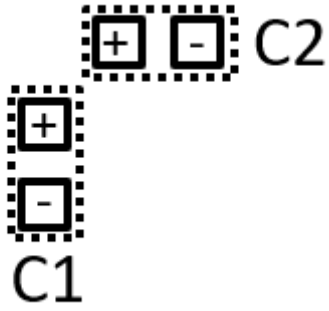


图 3-5. 陶瓷电容器布局

在 PCB 布局设计中，在相反基板表面实现对称电容器放置构成了一种有效的噪声抑制策略。此外，PCB 基板厚度的增强（例如 ≥1.6mm）经过经验验证，可通过结构谐振曲线的质量刚度修改来减少可闻发射。

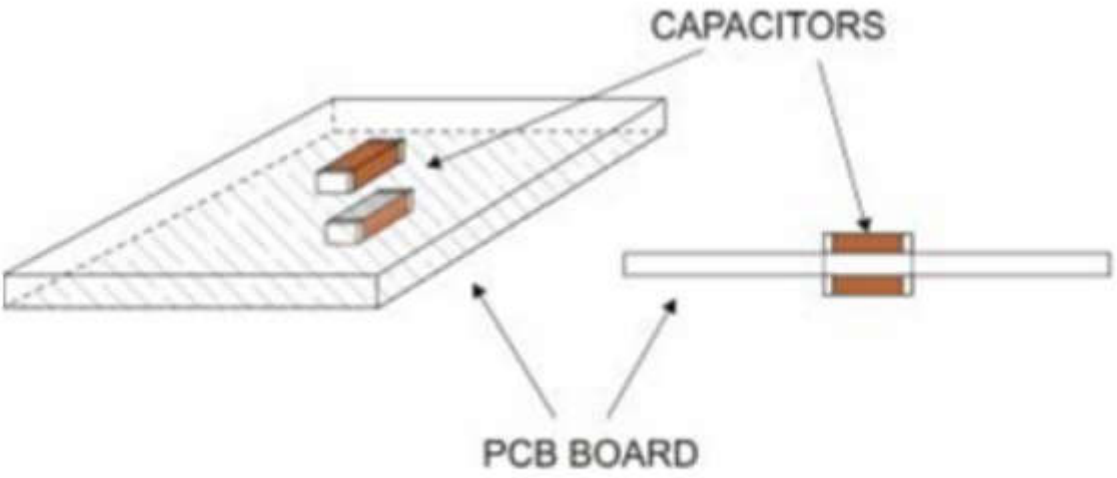


图 3-6. PCB 两侧的电容器

在电容器选择方法中，可通过两种主要方法来实现可闻噪声抑制：用电解电容器替代产品替代陶瓷电容器或实现专用陶瓷电容器设计。如图 3-7 所示，采用机械隔离安装配置的工程多层陶瓷电容器 (MLCC) 表现出显著衰减的压电效应。这种衰减是通过将机械振动与印刷电路板 (PCB) 基板去耦来实现的，因为电容器端子不会与 PCB 表面直接进行物理接触。因此，应变导致声学发射的传输路径被中断，从而显著降低可闻噪声的产生。

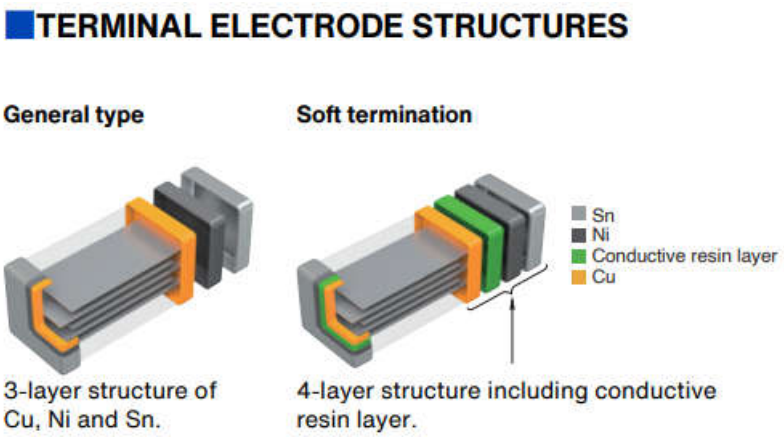


图 3-7. 专用陶瓷电容器

English Document: SPVA076
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

或者，战略性地将陶瓷电容器替换为非关键去耦位置对应的电解电容器，可以完全消除压电式噪声源，但这种方法需要仔细考虑等效串联电阻 (ESR) 特性以及对寿命的影响。必须通过严格分析电路要求、散热限制及声学性能规格来选择这些方法。

4 总结

LED 驱动器中的降噪需要同时关注原理图设计及 PCB 布局优化。主要策略包括选择低噪声元件（例如，铁氧体磁芯、SSFM IC）、实施 EMI 滤波器和缓冲器电路以及优化布局，以最大限度地减小环路面积和热应力。通过集成这些实践，工程师可以实现合规、可靠且安静的 LED 驱动器设计。

5 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，*具有六个 200mA 通道的 LP8866-Q1 汽车级显示 LED 背光驱动器* 数据表。
2. 德州仪器 (TI)，*具有六个 150mA 通道的 LP8872-Q1 汽车级显示 LED 背光驱动器* 数据表。
3. 德州仪器 (TI)，*如何在电源应用中降低 MLCC 的声学噪声*，技术文章。
4. TDK，*TDK - CGA4J1X7R0J106K125AE*，数据表。

English Document: SPVA076
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

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出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