

Application Note

设计适用于医疗系统的 LED 驱动器



Rayna Feng, Bill Xu

Systems Engineering and Marketing

摘要

发光二极管 (LED) 作为荧光灯的替代品，在全球消费市场和汽车市场得到广泛应用。这一趋势已渗透到医疗领域，LED 现已广泛用于体外诊断 (IVD) 系统、内窥镜、外科手术室等医疗设备。在消费类和汽车应用中，调光 LED 通常使用脉宽调制 (PWM) 模式来节省能源，并提供令人眼舒适的照明效果。市场上有无数的 LED 驱动器都具有 PWM 调光功能，可满足各种市场要求。但是，与消费类和汽车应用不同，医疗应用通常需要模拟调光设计来避免出现条纹效应和频闪效应。第二个问题是医疗应用可能需要高输出电流 (约 40A) 来驱动大容量 LED，但市面上的大多数 LED 驱动器无法输出大电流。本应用手册介绍了使用 TI 产品驱动 LED 以满足医疗应用要求的几种方法。

内容

1 简介.....	2
1.1 医疗系统中的 LED 照明.....	2
1.2 医疗应用中 LED 驱动器的主要挑战.....	2
2 具有模拟调光功能的 LED 驱动推荐设计.....	3
2.1 使用线性恒流源驱动 LED.....	3
2.2 使用直流/直流稳压器驱动 LED.....	5
2.3 使用 TPS92640 或 TPS92641 驱动 LED.....	6
3 总结.....	7
4 参考资料.....	7

插图清单

图 2-1. 使用可调恒流吸收器实现 LED 模拟调光.....	3
图 2-2. 大电流 LED 模拟调光.....	4
图 2-3. 使用具有调光功能的降压稳压器驱动 LED.....	5
图 2-4. 简单函数实现调光 LED.....	5
图 2-5. 使用 TPS92640 或 TPS92641 (具有模拟调光功能) 驱动 LED.....	6

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

LED 作为荧光灯的替代品，在全球消费市场和汽车市场得到广泛应用。为达到节省能源并提供人眼舒适的灯光等效果，LED 照明始终有调光要求。目前，可以通过两种方法来调节 LED 的亮度：一种称为模拟调光，另一种称为 PWM 调光。在模拟调光方法中，通过 LED 的电流由输入控制电压进行调节。PWM 调光通过快速打开和关闭 LED（频率高于 100Hz）来利用人眼反应慢的特性，而不会在开启期间改变流过的 LED 电流。由于人眼对任何高于 30Hz 的频率都没有反应，因此亮度似乎根据 PWM 信号的占空比呈线性变化。

PWM 调光的缺点在于光线质量以及对不同物体的影响。PWM 调光涉及到频率。低频调光范围为 100Hz 至 2kHz，该范围是人可以（轻微）察觉的，因此调光会引起眼睛疲劳。在拍摄照片或录制视频时，如果调光频率处于这种范围内，则可能会产生条纹效应。PWM 调光还会产生频闪效果，即移动物体或旋转物体看起来是静止的。简而言之，要使用 PWM 调光并避免任何缺点，请将 PWM 调光频率设置为高于 2kHz。

为了实现高频调光，大多数 LED 驱动器都有一个 PWM 调光输入。但是，LED 驱动器的带宽会限制调光频率和对比度。对于使用直流/直流转换架构的固定频率开关模式电源类型 LED 驱动器，环路带宽通常设计为 50kHz 或以下。在 2kHz PWM 调光频率下，这会向对比度施加约 25:1 的限制。为了实现更佳的对比度，请使用较低的 PWM 调光频率或尝试进一步增加环路带宽。

1.1 医疗系统中的 LED 照明

如上文所述，LED 照明现在广泛用于医疗系统。在 IVD 系统中，LED 用于照射样本，然后将接收到的光学信息转换为电压信号，以在接收端进行光学频谱分析。在内窥镜系统中，LED 用于使用光纤照亮人体内部，从而为摄像机提供光，帮助医生获取清晰的图像。在手术室中，LED 用于照明而不会产生阴影。在血氧饱和度 (SpO₂) 系统中，LED 用于照亮人的手指以进行氧气分析。在大多数情况下，所有这些应用均使用模拟调光来提供适当的照明。

1.2 医疗应用中 LED 驱动器的主要挑战

医疗应用中 LED 照明的第一个关键挑战在于 LED 正向电流较大，以及可输出大电流以满足市场要求的 LED 驱动器数量有限。例如，在内窥镜应用中，某项设计可能需要一个 LED 驱动器来输出高电流（高达 40A），以补偿光纤造成的光衰减。第二个挑战是 LED 电流的高线性度和无纹波电流，尤其是在 LED 电流较小的情况下。对于 IVD 应用尤其如此。第三个挑战是满足手术室的要求，即采用高 PWM 频率（可能高于 10kHz），在不产生条纹效应的情况下对 LED 调光。

2 具有模拟调光功能的 LED 驱动推荐设计

节 2.1 至 节 2.3 展示了 TI 目前提出的使用模拟调光功能驱动 LED 的三种场景。每种设计都有各自的优缺点。设计人员可以根据性能、成本和封装，从建议中选择最佳设计来满足特定应用的要求。

2.1 使用线性恒流源驱动 LED

第一种通过模拟调光功能驱动 LED 的方法是使用可调恒流源。图 2-1 展示了原理图。MOSFET (CSD19536KTT)、放大器 (OPA863A) 和数模转换器 (DAC) (DAC60501) 包含一个可调节的恒流吸收器。LED 电流等于 CSD19536 的 D 极电流，因为 R_1 和 R_2 的总和比感应电阻器 (R_S) 大得多。方程式 1 显示了 DAC60501 的输出电压和 LED 电流之间的函数。

$$I_{LED} = \frac{V_{DAC} \times (R_1 + R_2)}{R_2 \times R_S} \quad (1)$$

其中

- R_S 是检测电阻
- V_{DAC} 是 DAC 的输出电压
- R_1 和 R_2 是分压电阻

MOSFET 在线性范围内运行，可能会消耗大量功率，从而导致系统效率较低。要解决该问题，设计人员需要使用另一个 DAC60501 来调节降压稳压器 (TLVM13610) 的输出电压，使 MOSFET 保持线性模式运行，但要关闭导通模式 (比导通压降大约高 100mV 至 200mV)。在这些条件下，设计人员能够以低功耗保持系统高效率，从而实现低温升。方程式 2 展示了降压稳压器的输出电压与 DAC60501 的输出电压之间的函数。

$$V_{Buck_regulator_output} = \left(1 + \frac{R_T}{R_B} + \frac{R_T}{R_C}\right) \times V_{REF} - \frac{R_T}{R_C} \times V_{DAC} \quad (2)$$

其中

- R_T 是顶部电阻
- R_B 是底部电阻
- R_C 是与 DAC 串联的电阻
- V_{REF} 是降压稳压器的基准电压
- V_{DAC} 是 DAC 输出电压

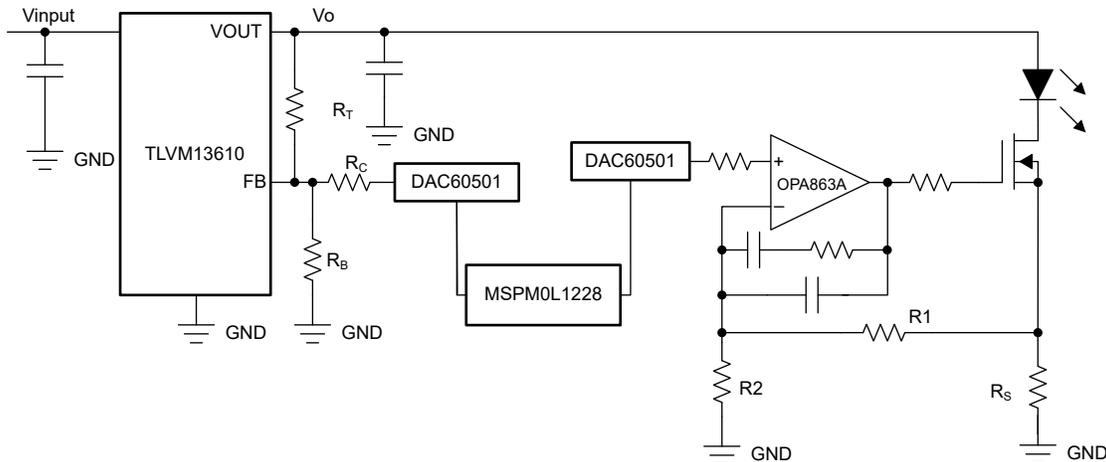


图 2-1. 使用可调恒流吸收器实现 LED 模拟调光

有时，LED 电流非常大，DAC 只能使用部分范围。例如，假设最大 LED 电流为 20A，检测电阻为 20mΩ。检测电压则为 0.4V，设计人员需要使用 8W 检测电阻。这会导致 DAC 的最大输出为 0.4V；因此，DAC 只能使用部分范围，从而导致分辨率较低。第二个问题是检测电阻的功耗较大，并且封装尺寸较大。

要解决大电流 LED 应用中的这两个问题，请考虑进行以下更改：

- 使用较小的检测电阻（例如 $2\text{m}\Omega$ 的较小电阻值），功耗将变为 0.8W ，最大检测电压为 0.04V 。
- 要扩展 DAC 输出范围，插入一个增益为 100 的电流检测放大器（例如 **INA241A**）（请参阅图 2-2）。这会将 DAC 输出从 0.04V 扩展到 4V 并提高系统分辨率，因为 **INA241A** 是一款失调电压为 $10\mu\text{V}$ 的精密电流检测放大器，是该应用的理想选择。
- 使用 **MSPM0L1228** 作为控制器来配置两个 **DAC60501** 器件，使其具有 SPI 或 IIC 接口
- 使用具有最大 40A 输出电流的 **TPS548D26** 降压稳压器。

通过上文提到的方案，设计人员可以轻松获得具有 DAC 输出电压的 LED 电流，如方程式 3 所示。

$$I_{\text{LED}} = \frac{V_{\text{DAC}} \times (R_1 + R_2)}{R_2 \times R_S \times G_{\text{INA241A}}} \quad (3)$$

其中

- G_{INA241A} 是 **INA241** 的增益
- R_S 是检测电阻
- R_1 和 R_2 是分压电阻

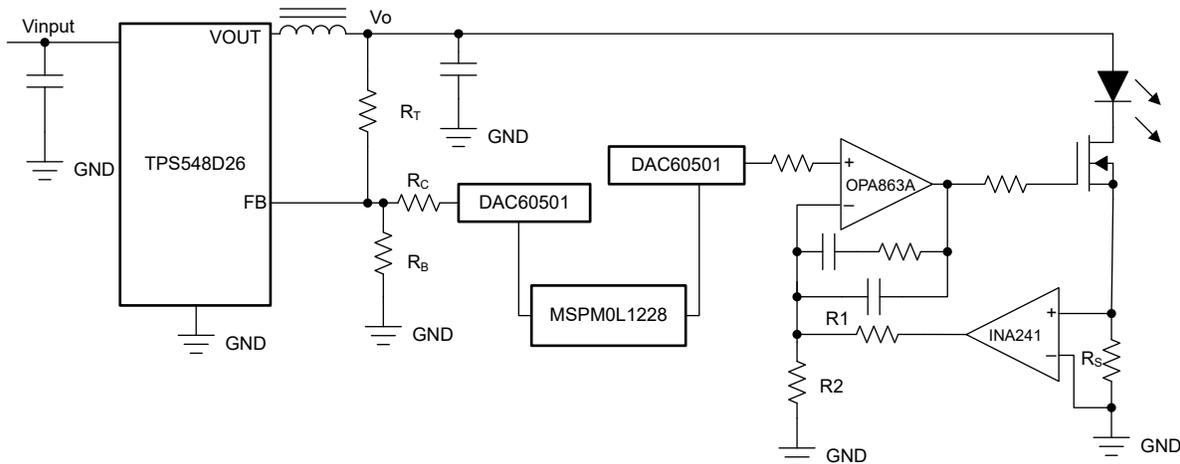


图 2-2. 大电流 LED 模拟调光

此设计受益于以下事实：可以使用模拟方法或在 PWM 模式下降低 LED 亮度。在模拟调光模式下，此设计具有优异的线性度。在 PWM 调光模式下，如果设计人员用高速放大器和高速 DAC 替换 **OPA863A**，则可以通过高 PWM 频率将该设计调光到若干 MHz。实际上，该方案可以生成任何所需的 LED 驱动电流波形。缺点包括成本增加和 PCB 占用空间较大。

2.2 使用直流/直流稳压器驱动 LED

图 2-3 展示了设计人员如何使用降压稳压器或降压模块构建具有模拟调光功能的 LED 驱动器。齐纳二极管用于在 LED 开路时将输出电压钳位到 $V_Z + V_{REF}$ 。齐纳二极管可拆卸，因为在最坏的降压稳压器情况下，最大输出电压等于输入电压；因此，在大多数情况下不会对人类造成危险。假设 DAC 的输出为 V_{DAC} ，降压稳压器的基准电压为 V_{REF} 。然后，设计人员可以确定 LED 和 DAC 之间的函数，如 方程式 4 所示。

$$I_{LED} = \left(1 + \frac{R_T}{R_B} + \frac{R_T}{R_C}\right) \times \frac{V_{REF}}{R_S \times G} - \frac{R_T \times V_{DAC}}{R_C \times R_S \times G} \quad (4)$$

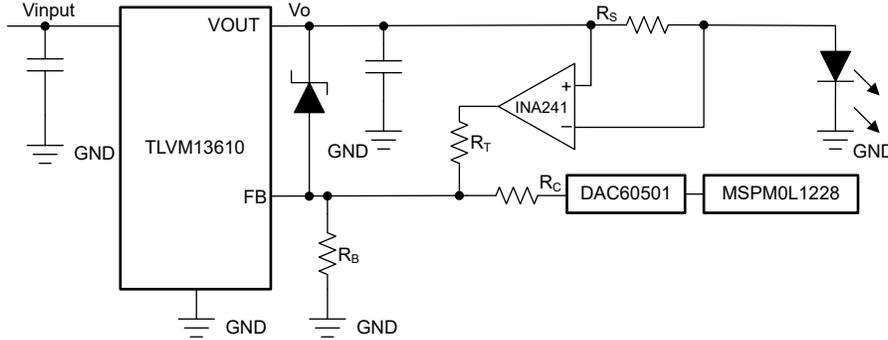


图 2-3. 使用具有调光功能的降压稳压器驱动 LED

方程式 4 很复杂，LED 的电流与 DAC 电压成反比。为了简化 DAC 电压和 LED 电流之间的函数，设计人员可以使用外部误差放大器（例如 OPA863A），如 图 2-4 所示。LED 电流和 DAC 电压现在可以遵循 方程式 5，这非常简单。本参考设计中的二极管可拆卸，其功能是阻止齐纳二极管上的电流。

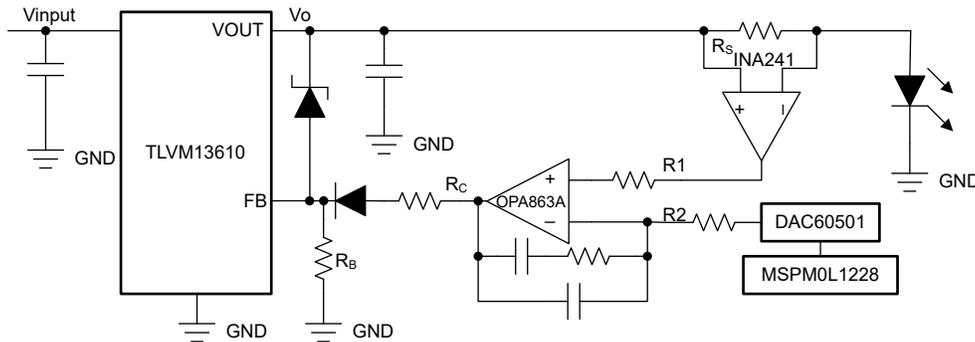


图 2-4. 简单函数实现调光 LED

$$I_{LED} = \frac{V_{DAC}}{R_S \times G_{INA241}} \quad (5)$$

此设计的成本高于 节 2.3 中的设计。此外，该设计无法进行快速 PWM 调光。瞬态响应不比 节 2.3 中的设计快，因为降压稳压器在大多数情况下带宽较低。在最坏情况下，设计人员还必须将降压稳压器的最小输出电压保持在低于 LED 照明关闭模式下的 LED 正向电压。在这种情况下，由于大多数降压稳压器具有最短的导通时间，LED 没有电流，降压稳压器输出最小电压。设计人员需要在这种情况下保持输出电压小于 LED 正向电压。否则，LED 具有正向电流并失控。

2.3 使用 TPS92640 或 TPS92641 驱动 LED

TI 还提供具有模拟和 PWM 调光能力的单芯片 **TPS92640** 和 **TPS92641** LED 驱动器。TPS92640 和 TPS92641 的区别在于，TPS92641 器件包含一个分流 FET 调光输入和一个用于高分辨率 PWM 调光的 MOSFET 驱动器。两款器件均具有 500:1 模拟调光能力。借助集成的 $2\ \Omega$ 、 $1A_{peak}$ MOSFET 栅极驱动器，设计人员理论上可选择一个好的外部 MOSFET，从而以预期的电流容量驱动 LED。外部 DAC60501 可连接到模拟调光端子 I_{ADJ} 以调节 LED 电流，如 [方程式 6](#) 所示。 I_{ADJ} 可以设置为 2.54V 及以下的任何值。

$$I_{LED} = \frac{V_{DAC}}{10 \times R_{CS}} \quad (6)$$

这种单芯片设计的成本最低，但分辨率低于上文提到的方案。

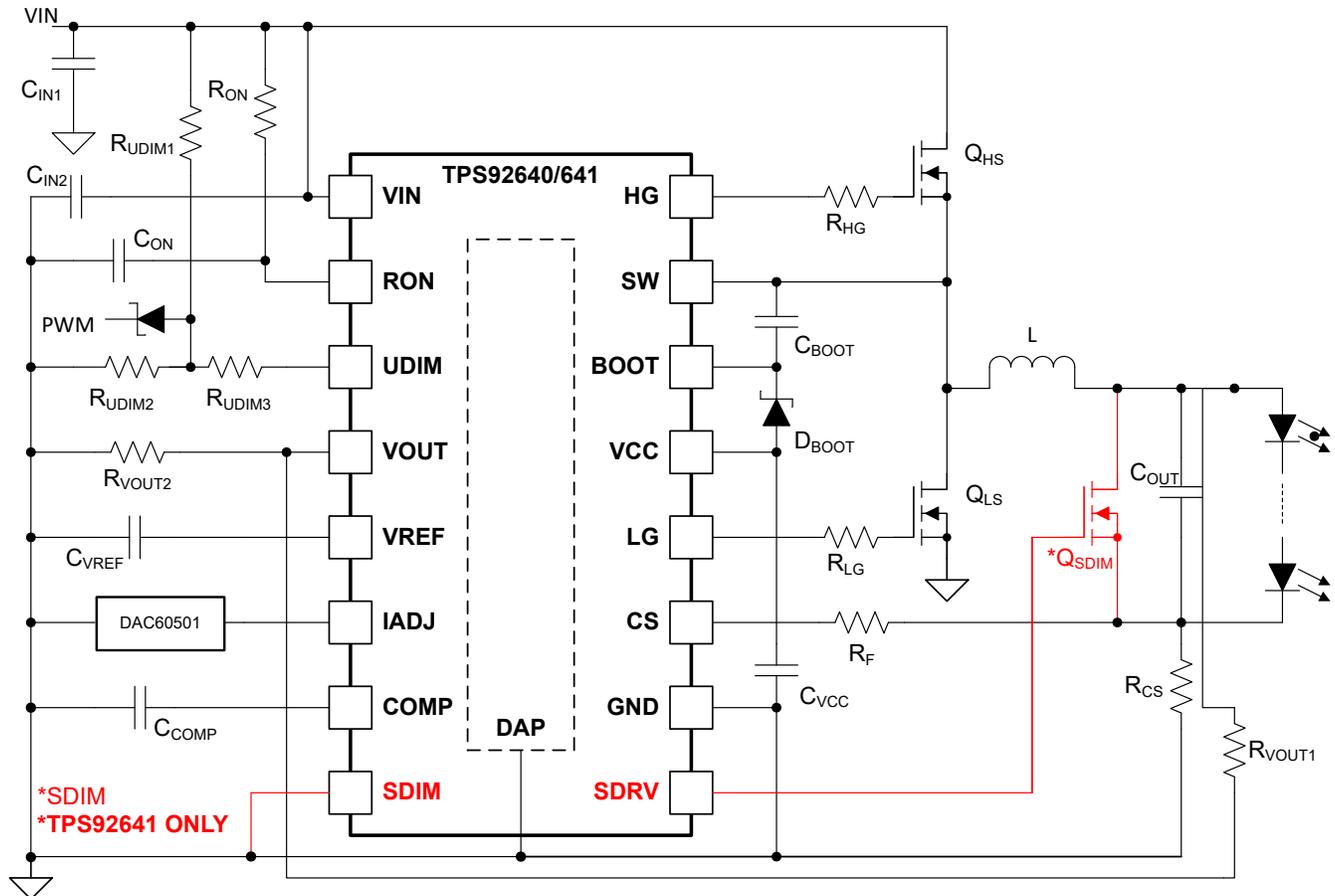


图 2-5. 使用 TPS92640 或 TPS92641 (具有模拟调光功能) 驱动 LED

3 总结

上文讨论的 LED 驱动设计可以满足大多数医疗应用要求。在实际设计中，设计人员可以选择上述设计之一来满足所有特定要求，并在性能、成本、封装等方面进行权衡。

4 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [常见 LED 函数和 LED 驱动器设计注意事项市场营销白皮书](#)
2. 德州仪器 (TI), [OPAx863A 105MHz 轨到轨输入/输出高精度放大器数据表](#)
3. 德州仪器 (TI), [DACx0501 具有精密内部基准的 16 位、14 位和 12 位 1-LSB INL 电压输出 DAC 数据表](#)
4. 德州仪器 (TI), [CSD19536KTT 100V N 沟道 NexFET™ 功率 MOSFET 数据表](#)
5. 德州仪器 (TI), [TLVM13610 采用增强型 HotRod™ QFN 封装的高密度 3V 至 36V 输入、1V 至 10V 输出、8A \(10A 峰值\) 同步直流/直流降压电源模块数据表](#)
6. 德州仪器 (TI), [TPS548D26 具有差分遥感功能的 4V 至 16V 输入、40A 同步降压转换器数据表](#)
7. 德州仪器 (TI), [INA241x 具有增强型 PWM 抑制功能的 -5V 至 110V、双向、超精密电流检测放大器数据表](#)
8. 德州仪器 (TI), [TPS9264x 用于精密调光 LED 驱动器的同步降压控制器数据表](#)
9. 德州仪器 (TI), [MSPM0L222x、MSPM0L122x 混合信号微控制器数据表](#)
10. 德州仪器 (TI), Issac Hsu, [LED 亮度调节：高频 PWM 调光技术文章](#)
11. 德州仪器 (TI), [具有 MOSFET 的电压到电流 \(V-I\) 转换器电路，模拟工程师电路](#)

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、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。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司