

将降压调节器转换为智能可调光 LED 驱动器

作者: Jon Kraft

凭借使用寿命长和功耗低的优势, LED 有望改变整个照明行业, 但它的快速采用面临的主要障碍是 LED 本身的成本居高不下。LED 灯具 (完整电力照明设备) 的成本各不相同, 但 LED 的成本通常占据了整个灯具成本的大约 25% 至 40%, 而且预期在今后多年内仍会占据很高比例 (图 1)。

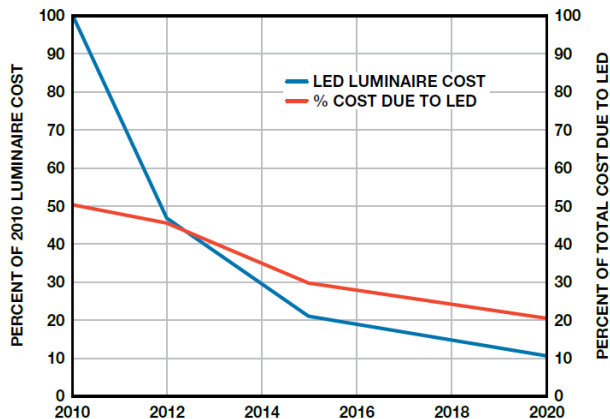


图 1. LED 灯具成本的细分。¹

降低整体灯具成本的一种方法是在产品规格允许的范围内, 在可能最高的直流电流下驱动 LED。此电流可能远高于其“分档电流”。如果正常驱动, 这样可能产生更高的流明/成本比率。

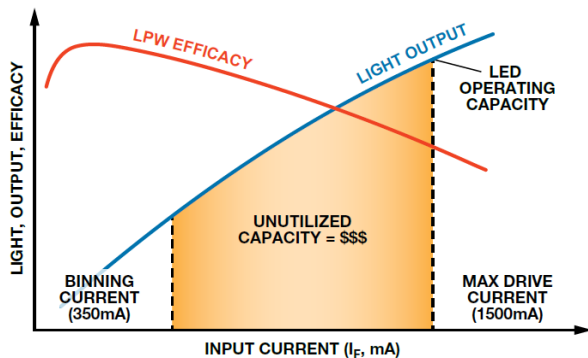


图 2. LED 光输出和效率与驱动电流。²

但是, 这种做法需要更高电流驱动器。很多解决方案在低电流下 (<500 mA) 驱动 LED, 但很少有高电流 (700 mA 至 4 A) 的选择方案。这一现象似乎令人惊讶, 因为半导体行业有大量的容量达到 4 A 的 DC-DC 解决方案, 但它们的设计目的是控制电压, 而不是控制 LED 电流。本文将探讨将现成 DC-DC 降压稳压器转换为智能 LED 驱动器的一些简单技巧。

降压稳压器对输入电压进行斩波, 并通过 LC 滤波器传送, 以提供稳定的输出, 如图 3 所示。它使用两个有源元件和两个无源元件。有源元件是从输入到电感的开关“A”, 以及从地面到

电感的开关 (或二极管) “B”。无源元件是电感 (L) 和输出电容 (C_{OUT})。它们形成 LC 滤波器, 可以减小由有源元件产生的纹波。

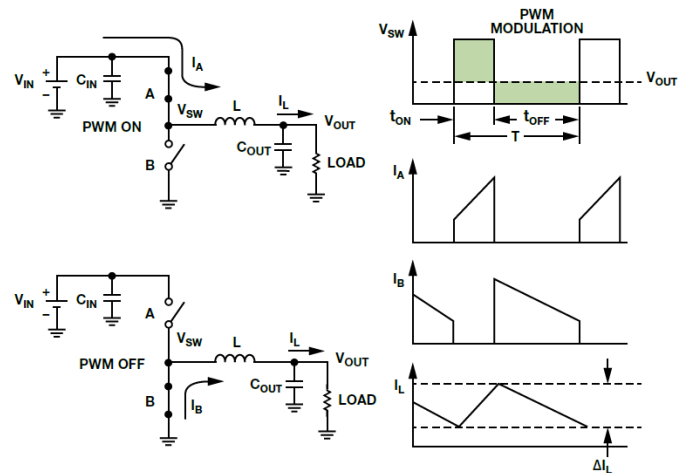


图 3. 基本降压方案。³

如果开关是内部的, 则降压器称为 **稳压器**, 如果开关是外部的, 则称为 **控制器**。如果两个开关都是晶体管 (MOSFET 或 BJT), 则它是 **同步** 的, 如果底部的开关是使用二极管实施的, 则它是 **异步** 的。这些类型的降压电路各有优劣, 但同步降压稳压器通常可以优化效率、器件数量、解决方案成本和电路板面积。遗憾的是, 用于驱动高电流 LED (高达 4 A) 的同步降压稳压器很少, 而且成本昂贵。本文以 ADP2384 为例, 展示如何修改标准同步降压稳压器的连接以调节 LED 电流。

ADP2384 高效同步降压稳压器指定最高 4 A 的输出电流, 具有最高 20 V 的输入电压。图 4 显示了用于调节输出电压的正常连接。

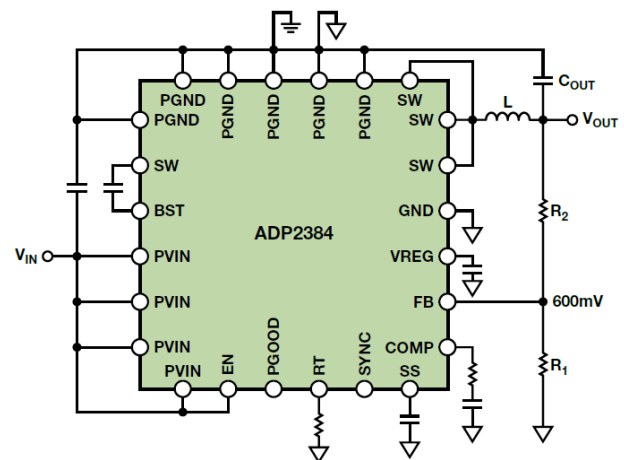


图 4. 连接用于调节输出电压的 ADP2384。

在工作中, 经过分压的输出电压连接到 FB 引脚, 与内部 600 mV 基准进行比较, 用于生成开关的适当占空比。在稳态下, FB 引脚保持在 600 mV, 因此 V_{OUT} 调节至 600 mV 乘以分频比。如果上方的电阻被 LED 取代 (图 5), 则输出电压必须是需要

的任何值（在额定值范围内），将 FB 维持在 600 mV；因此，通过 LED 的电流被控制在 $600 \text{ mV}/R_{\text{SENSE}}$ 。

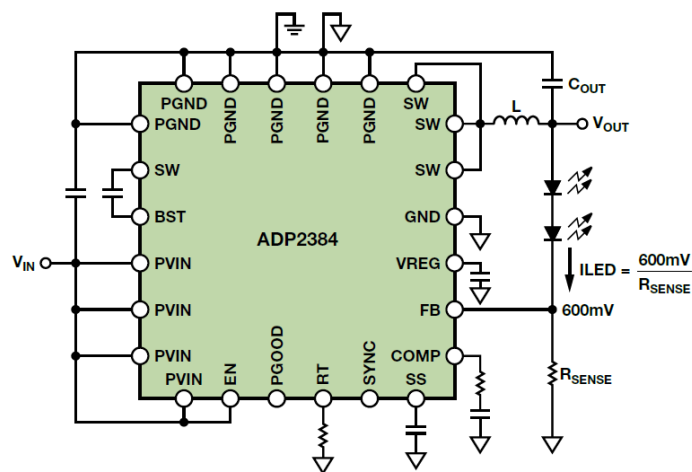


图 5. 基本（但不高效）的 LED 驱动器。

当从 FB 到地面的精密电阻设置 LED 电流时，此电路使用效果很好，但电阻消耗了很多功率： $P = 600 \text{ mV} \times I_{\text{LED}}$ 。对于低 LED 电流，这不是大问题，但在高 LED 电流下，低效率会大幅增加灯具散发的热量（ $600 \text{ mV} \times 4 \text{ A} = 2.4 \text{ W}$ ）。降低 FB 基准电压可以成比例降低功耗，但大多数 DC-DC 稳压器没有调节此基准的方式。幸运的是，两个技巧可降低大多数降压稳压器的基准电压：使用 SS/TRK 引脚—或偏移 R_{SENSE} 电压。

很多通用降压 IC 包括软启动(SS)或跟踪(TRK)引脚。SS 引脚可缓慢增加启动时的开关占空比，从而最大程度地减小启动瞬变。TRK 引脚让降压稳压器能够遵循独立电压。这些功能通常结合到单个 SS/TRK 引脚上。大多数情况下，误差放大器将 SS、TRK 和 FB 电压中的最小值与基准进行比较，如图 6 所示。

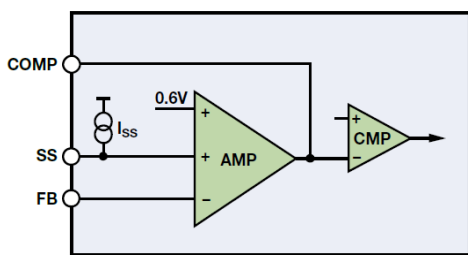


图 6. 使用 ADP2384 的软启动引脚工作。

对于灯具应用，将 SS/TRK 引脚设置为固定电压，并将其用作新的 FB 基准。恒压分压器充当基准电压源非常有效。例如，很多降压稳压器 IC 包括受控低压输出—如 ADP2384 上的 V_{REG} 引脚。为了达到更高精度，可以使用简单的 2 引脚外部精密基准电压源，例如 ADR5040。在任何情况下，从该电源到 SS/TRK 引脚的电阻分压器形成新的基准电压源。将此电压设置在 100 mV 和 200 mV 之间，通常可以提供功耗和 LED 电流精度之间的最佳平衡。用户选择的基准电压的另一个优点是 R_{SENSE} 可以选择方便的标准值，从而避免指定或分配任意精密电阻值来设置 LED 电流的开支和不精确性。

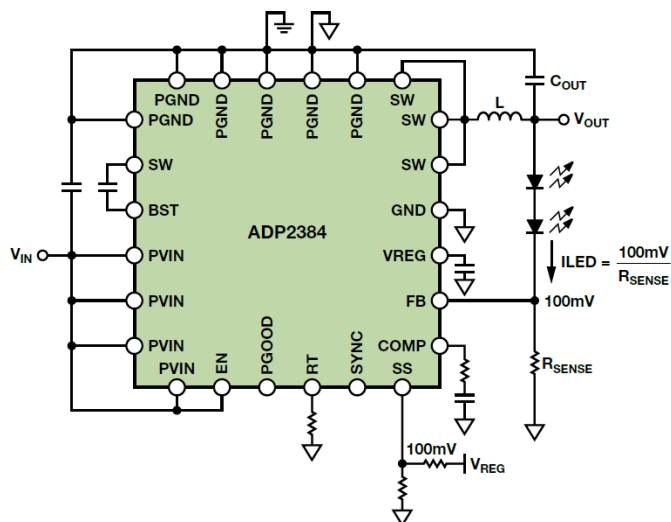


图 7. 使用 SS/TRK 引脚以降低 FB 基准电压。

使用 SS 或 TRK 引脚方法并非对于所有降压稳压器都是可行的，因为有些 IC 没有这些引脚。另外，对于某些降压 IC，SS 引脚会改变峰值电感电流，而不是 FB 基准，因此必须仔细查看产品数据手册。作为一种替代方法，可以产生 R_{SENSE} 电压偏移。例如，精密电压源和 R_{SENSE} 之间的电阻分压器提供从 R_{SENSE} 到 FB 引脚的相当恒定的偏移电压（图 8）。

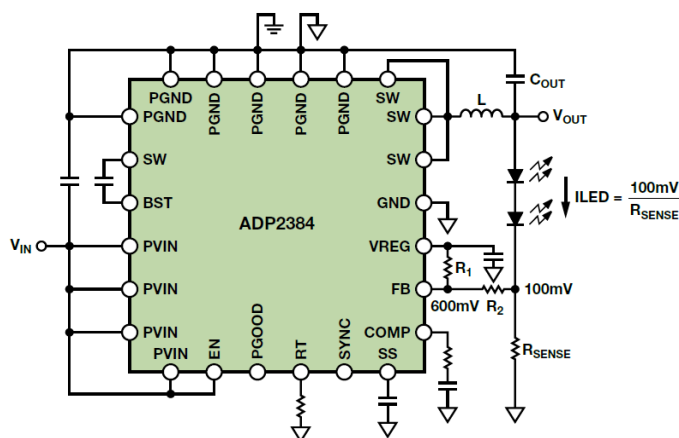


图 8. 产生 R_{SENSE} 电压偏移。

电阻分压器的必需值可以使用公式 1 计算，其中 V_{SUP} 是辅助调节电压， $FB_{\text{REF(NEW)}}$ 是 R_{SENSE} 两端的目标电压。

$$R1 = R2 \times \frac{V_{\text{SUP}} - FB_{\text{REF}}}{FB_{\text{REF}} - FB_{\text{REF(NEW)}}}$$

因此，可使用以下公式获取 150 mV 的有效反馈基准，其中 $R2 = 1 \text{ k}\Omega$ ， $V_{\text{SUP}} = 5 \text{ V}$ ：

$$R1 = 1 \text{ k}\Omega \times \frac{5.0 \text{ V} - 0.6 \text{ V}}{0.6 \text{ V} - 0.15 \text{ V}} = 9.78 \text{ k}\Omega$$

LED 电流为：

$$I_{\text{LED}} = \frac{FB_{\text{REF(NEW)}}}{R_{\text{SENSE}}}$$

这种方法不需要 SS 或 TRK 引脚。FB 引脚仍然调节至 600 mV（但 R_{SENSE} 的电压调节至 $FB_{REF(NEW)}$ ）。这意味着芯片的其他功能（包括软启动、跟踪和电源良好指示）仍将正常运行。

这种方法的缺点是 R_{SENSE} 和 FB 之间的偏移受到电源精度的严重影响。使用 ADR5040 等精密基准电压源可能是理想的，但不太精确的 $\pm 5\%$ 基准容差可能在 LED 电流上产生 $\pm 12\%$ 的变化。表 1 显示了比较结果：

表 1. SS/TRK 和偏移 R_{SENSE} 的比较

选择 1: 使用 SS/TRK 降低 FB 基准	选择 2: 偏移 R_{SENSE} 电压
$\pm 5\%$ 的电源电压变化在 I_{LED} 上产生 $\pm 5\%$ 的误差。这不会受到 V_{SENSE} 电压的影响；因此，这种方法具有最低的 R_{SENSE} 功耗。	$\pm 5\%$ 的电源电压变化在 I_{LED} 上产生 $\pm 12\%$ 的误差。更高 V_{SENSE} 电压可以改进这种状况。
很好的开路/短路 LED 保护。FB_OVP 不会对间歇开路保护起作用。LED 电流受到电感和控制环路速度的限制。	很好的开路/短路 LED 保护。此外，有些 IC 具有另一个 FB 基准 (FB_OVP)，当 FB 升高 50 mV 至 100 mV 超出正常水平时，它会立即禁用开关。这样可以保证间歇性故障期间的最大 LED 过流。
PGOOD 将始终保持低。	由于 FB 引脚仍然调节至 600 mV，PGOOD 引脚正常工作。
通过保持 SS/TRK 引脚低于正常值，某些故障模式可能无法正常工作。	所有故障模式正常工作。

精确电流调节的另一个关键是适当布局连接至检测电阻。4 引脚检测电阻是理想之选，但可能成本比较昂贵。借助良好的布局技术，我们可以使用传统的 2 引脚电阻实现高精度，如图 9 所示。⁴

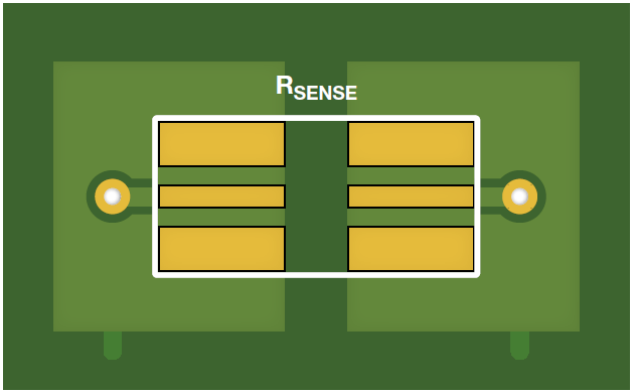


图 9. R_{SENSE} 的建议 PCB 走线路径。

除调节之外的功能

使用现成的降压稳压器调节 LED 电流非常简单。此处的示例采用了 ADP2384。更加详尽的[论文](#)还包括使用 ADP2441 的示例，该器件的引脚较少，具有 36 V 输入电压范围。该文显示了一些示例，展示如何实施专用 LED 降压稳压器提供的很多“智能”功能，例如 LED 短路/开路故障保护、 R_{SENSE} 开路/短路故障保护、PWM 调光、模拟调光和电流折返热保护。我们在本文中 will 使用上例中的 ADP2384，讨论 PWM 和模拟调光、电流折返。

使用 PWM 和模拟控制进行调光

“智能”LED 驱动器的一个关键要求是使用调光控制来调节 LED 亮度，采用以下两种方法之一：PWM 和模拟。PWM 调光通过调节脉冲占空比来控制 LED 电流。如果频率高于 120 Hz，人眼会均衡这些脉冲，以产生可感知的平均光度。模拟调光可在恒定直流值下调节 LED 电流。

可通过打开和关闭与 R_{SENSE} 串联插入的 NMOS 开关，实施 PWM 调光。这些电流水平可能需要功率器件，但添加功率器件会抵消通过使用包含自身电源开关的降压稳压器获得的大小和成本益处。或者，可以通过快速打开和关闭稳压器来执行 PWM 调光。在低 PWM 频率下 (< 1 kHz)，这样仍然可以提供良好的精度（图 10）。

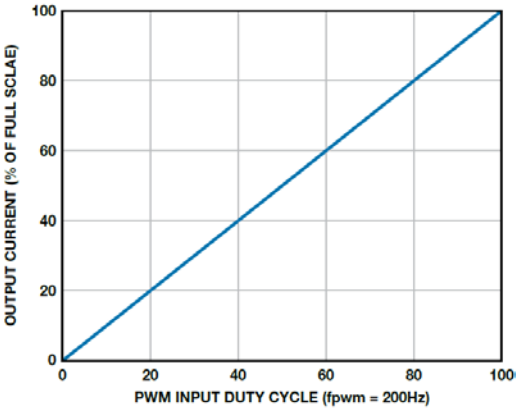


图 10. ADP2384 PWM 调光线性度——200 Hz 下的输出电流与占空比。

与所有通用降压稳压器相同，ADP2384 没有引脚来应用 PWM 调光输入，但可以操控 FB 引脚以启用和禁用开关。如果 FB 变为高电平，则误差放大器变为低电平，降压开关停止。如果 FB 重新连接到 R_{SENSE} ，则它将恢复正常调节。这可以通过低电流 NMOS 晶体管或通用二极管实现。在图 11 中，高 PWM 信号将 R_{SENSE} 连接到 FB，实现 LED 调节。低 PWM 信号关闭 NMOS，有一个上拉电阻将 FB 电平变为高电平。

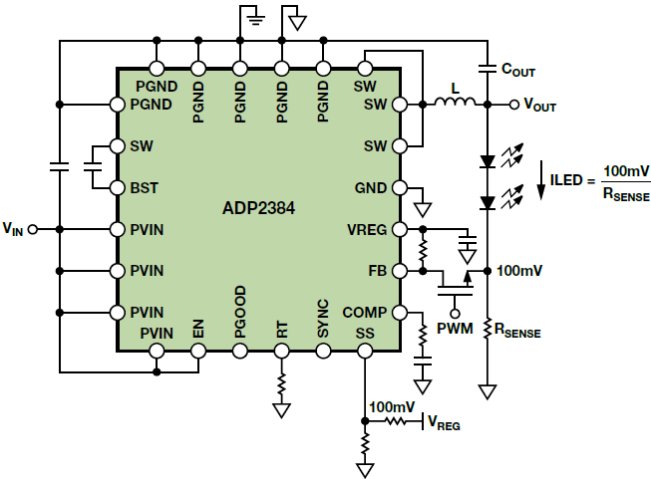


图 11. 使用 ADP2384 进行 PWM 调光。

虽然 PWM 调光非常流行，但有时我们需要无噪声的“模拟”调光。模拟调光只是调节恒定 LED 电流，而 PWM 调光则进行斩波。如果使用两个调光输入，则需要模拟调光，因为多个 PWM 调光信号可能产生拍频，导致闪烁或声频噪声。但是，可将 PWM 用于一个调光控制，而将模拟用于另一个调光控制。使用通用降压稳压器，实施模拟调光的最简单方法是通过调节 FB 基准电路的电源，控制 FB 基准，如图 12 所示。

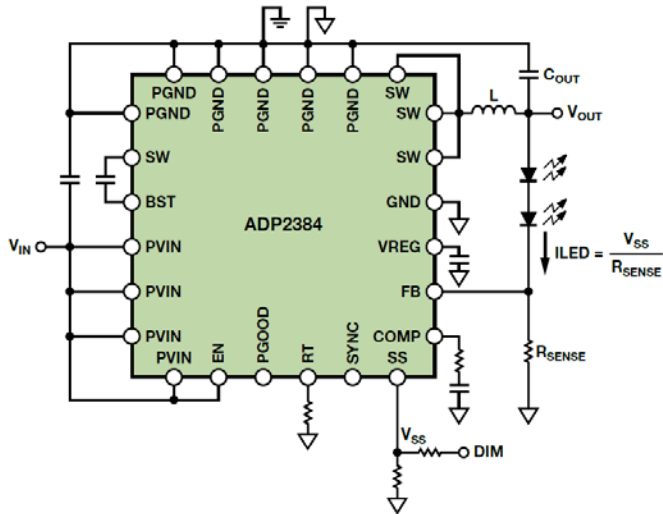


图 12. 模拟调光电路。

热折返

由于 LED 的使用寿命在很大程度上取决于其工作结温，有时必须监控 LED 温度，如果温度过高，必须做出响应。导致异常高温的原因可能是散热器连接不当、周边温度过热或其他一些极端条件。常见解决方案是在当温度超过某个阈值时减小 LED 电流（图 13）。这称为 LED 热折返。

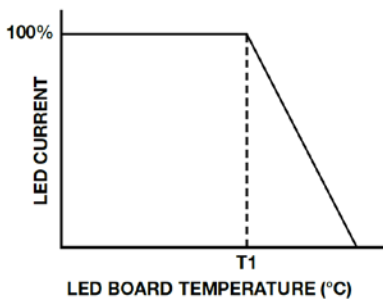


图 13. 需要的 LED 热折返曲线。

在这种类型的调光中，LED 保持在满载电流，直至到达温度阈值(T1)，在这个阈值之上，LED 电流随温度升高开始降低。这样可以限制 LED 的结温，保持它们的使用寿命。低成本 NTC（负温度系数）电阻通常用于测量 LED 的散热器温度。通过对模拟调光方案进行细微修改，NTC 的温度可以轻松控制 LED 电流。如果 SS/TRK 引脚用于控制 FB 基准，则可以使用一种简单方法，将 NTC 与基准电压并联放置（图 14）。

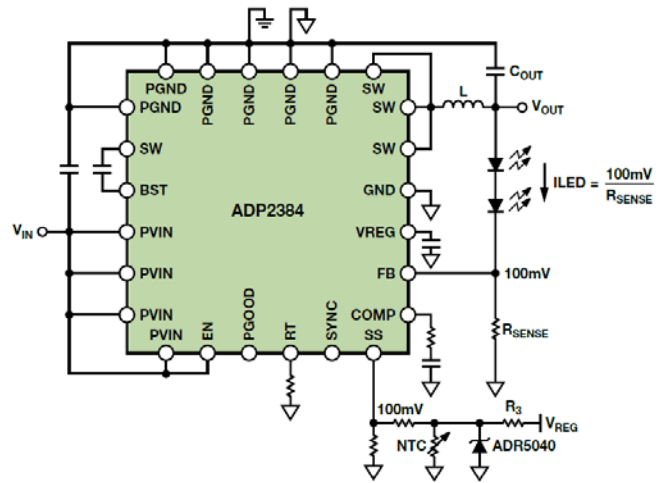


图 14. 使用 SS/TRK 的 LED 热折返。

随着散热器温度升高，NTC 电阻下降。NTC 形成 R3 的分压电阻。如果分压器的电压高于基准电压，则输出最大电流；如果 NTC 电阻电压降低到基准电压之下，然后降低到 FB 基准电压之下，则 LED 电流开始下降。

结论

这些技巧应该作为使用标准降压稳压器实施全面 LED 功能的一般指导准则。但是，由于这些功能有一点超出降压 IC 的目标应用范围，因此您最好联系半导体制造商，确认 IC 能够处理这些工作模式。要获得有关 ADP2384 和其他降压稳压器（例如 ADP2441）的更多信息，或者需要这些 LED 驱动器解决方案的演示板，请访问 www.analog.com/lighting。

参考文献

- ¹ DOE SSL 2011 Manufacturing Roadmap. <http://ssl.energy.gov>.
- ² Cox, David, Don Hirsh, and Michael McClintic. “Are you using all of the lumens that you paid for?” *LED Magazine*, Feb. 2012.
- ³ Marasco, Ken. “How to Apply DC-to-DC Step-Down (Buck) Regulators Successfully.” *Analog Dialogue*, Vol. 45, No. 2 (2011).
- ⁴ O’Sullivan, Marcus. “Optimize High-Current Sensing Accuracy by Improving Pad Layout of Low-Value Shunt Resistors.” *Analog Dialogue*, Vol. 46, No. 2 (2012).

作者简介

Jon Kraft[jon.kraft@analog.com]于 2007 年加入 ADI 公司，在美国科罗拉多州朗蒙特的电源管理设计中心担任应用工程师。他拥有罗斯曼理工学院电子工程学士学位和亚利桑那州立大学电子工程硕士学位；已获四项专利。

