

# 增强型 HotRod™ QFN 封装：在业界超小的 4A 转换器中实现低 EMI 性能



Ankit Gupta and Katelyn Wiggernhorn

## 摘要

对于电源设计人员来说，在直流/直流稳压器中平衡尺寸、效率、热量和噪音水平是一场持久战。这种平衡在很大程度上取决于电源转换器或电源模块构造所使用的封装技术。增强型 HotRod™ (HR) QFN 封装技术解决了多种设计挑战，使电源转换器和模块制造商在封装尺寸、效率、散热能力和噪声性能方面突破行业限制。

德州仪器 (TI) 的增强型 HotRod QFN 封装将倒装芯片引线框 (FCOL) 封装具有的噪声优势与标准 QFN 封装上的接地 DAP 具有的热优势融为一体。通过利用 FCOL 封装技术，增强型 HotRod QFN 封装去除了封装引线键合并实现了出色的 EMI 性能 (节 2)，通过利用标准 QFN 封装技术，增强型 HotRod QFN 封装使用中心 PowerPad™ IC 封装实现散热并在 85°C 的环境温度下实现 4A (节 4)。LM60440、LM60430、LM60440 和 LM60430-Q1 是 TI 较早推出的采用增强型 HotRod QFN 封装技术的直流/直流转换器，本应用手册对其性能进行了评估。

## 内容

1 引言.....	2
2 增强型 HotRod QFN - 经过优化的 EMI 性能.....	3
3 增强型 HotRod QFN - 针对制造进行了优化.....	7
4 增强型 HotRod QFN - 针对热性能进行了优化.....	8
5 总结.....	10
6 参考文献.....	11
7 Revision History.....	11

## 插图清单

图 1-1. 德州仪器 (TI) 封装的演变.....	2
图 1-2. 增强型 HotRod QFN 的功能集.....	2
图 2-1. 标准 QFN 封装图示.....	3
图 2-2. 开关节点波形 (标准 QFN 封装).....	3
图 2-3. FCOL 封装图示.....	4
图 2-4. 开关节点波形 (FCOL 封装).....	4
图 2-5. LM60440 封装.....	4
图 2-6. LM60440 开关节点.....	4
图 2-7. LM604x0 引脚排列.....	5
图 2-8. 具有并行输入环路的 LM604x0 布局.....	5
图 2-9. LM60440AQEVM 解决方案尺寸.....	5
图 2-10. 传导 EMI 低频.....	6
图 2-11. 传导 EMI 高频.....	6
图 3-1. 带有阶梯式切口图示的 LM604x0 封装图纸.....	7
图 3-2. 可湿性侧面焊接连接.....	7
图 4-1. LM60440AQEVM 布局.....	8
图 4-2. LM60440AQEVM 热像图 ( $V_{IN} = 12V$ , $V_{OUT} = 5V$ , $I_{OUT} = 4A$ ).....	9
图 4-3. LM60440 效率与输出电流间的关系 ( $V_{IN} = 12V$ , $V_{OUT} = 5V$ , $I_{OUT} = 4A$ ).....	9
图 4-4. LMR33630 热像图.....	9
图 4-5. 最高电流与环境温度间的关系.....	10

## 商标

HotRod™ are trademarks of Texas Instruments.

PowerPad™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

增强型 HotRod QFN 是一种全新的先进半导体封装，可实现业界超小型 4A、36V 降压转换器。图 1-1 所示为高功率密度降压转换器所用半导体封装技术的演变。LM43603 采用引线式 HTSSOP 封装，该封装使用接地 DAP 通过封装底部实现充分散热。之后发布的 LMR23630 采用标准 QFN 封装，去除了外部引线，同时仍具有热 DAP。因此，与上一代转换器相比，LMR23630 的封装尺寸减小了 73%。后来，引线框上倒装芯片 (FCOL) 技术进一步提高了封装裸片比，并去除了连接裸片和引线框的封装键合线，从而提供出色的噪声性能。增强型 HotRod QFN 封装结合了 FCOL 封装在噪声方面的改进 (节 2) 以及标准 QFN 封装的散热优势 (节 4)。图 1-2 突出显示了“增强型”QFN 与 FCOL 和标准 QFN 封装相比所具有的增强性能。LM60440 是采用增强型 HotRod QFN 封装技术开发的全新 TI 器件，它支持 4A 输出电流，采用超小型 3mm × 2mm 封装。

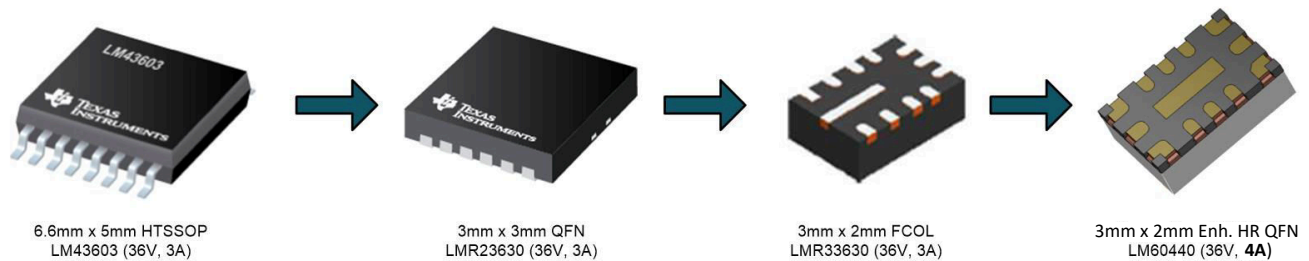


图 1-1. 德州仪器 (TI) 封装的演变

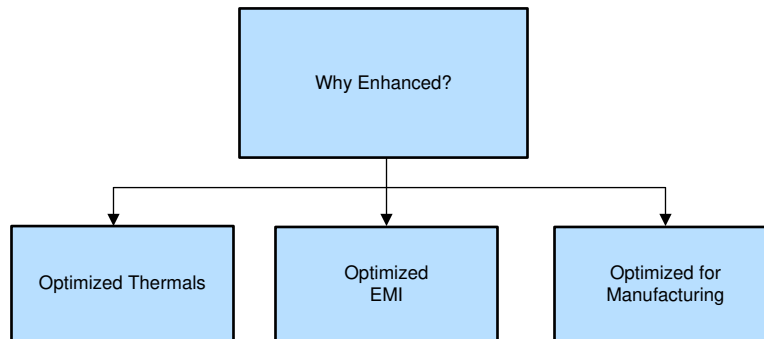


图 1-2. 增强型 HotRod QFN 的功能集

## 2 增强型 HotRod QFN - 经过优化的 EMI 性能

### 2.1 引言

用于宽输入直流/直流转换器的 MOSFET 技术可支持快速开关和高效电源系统的设计。因此，新型直流/直流转换器可实现快速开关电压压摆率 (dv/dt) 和高电流压摆率 (di/dt)，这会加剧开关模式电源的 EMI 辐射，并会导致外围模块出现问题。更多有关直流/直流转换器中 EMI 产生根源的详细信息，请参阅 [EMI 指南技术文章系列](#)。EMI 滤波器不可避免地成为电力电子系统的一部分，但滤波会导致不必要的尺寸和成本的增加，因此设计人员需要寻找所有可能的途径，包括用于降低和减轻 EMI 噪声的封装技术。遵从电磁兼容性 (EMC) 标准法规 (例如针对多媒体设备的 CISPR 32 和针对汽车应用的 CISPR 25) 至关重要，原因在于为实现合规性所需做的工作会影响产品开发成本和上市时间。CISPR-25 是有关车辆和器件无线电干扰特性的超严苛排放标准之一。这些限制和测量方法旨在保护机载接收器免受元件产生的干扰，例如电源设计中的开关稳压器。如需更深入地了解 CISPR 和其他排放标准，请参阅 [《电源的传导 EMI 规格概述》](#) 和 [《电源的辐射 EMI 规格概述》](#) 白皮书。

低 EMI 开关稳压器利用封装技术、经过优化的引脚排列和布局指南来最大限度地减少直流/直流转换器产生的传导和辐射噪声，从而提高电源系统的性能以满足严格的 EMI 标准。TI 的新型转换器 LM60440 采用全新的增强型 HotRod QFN 技术，而 LM60440 稳压器的引脚排列和封装已经过精心优化，可最大限度地减少开关环路的寄生电感，从而实现非同凡响的低噪声性能。

### 2.2 增强型 HotRod QFN 封装

正如节 1 中所述，增强型 HotRod QFN 封装由标准 QFN 封装和 FCOL 封装演变而来。在深入研究全新封装技术之前，了解其每个父封装结构的优点很重要。

标准 QFN 封装具有将器件连接到引线框的引线键合 (图 2-1)。这些引线键合的电感量级为 2nH，在开关事件期间，其换向电流可约为 2A/ns，这会使开关节点上的电压过冲高达 4 - 5V。此外，器件封装引线键合对电源环路的寄生电感影响很大，在这种环路中，快速开关 (电流和电压) 边沿 (以及与体二极管反向恢复和 MOSFET COSS 充电相关的可能前沿振铃) 谐波含量很高。相应的开关节点振铃会对 H 场和 E 场耦合造成严重威胁，从而增加传导和辐射发射 (图 2-2)。

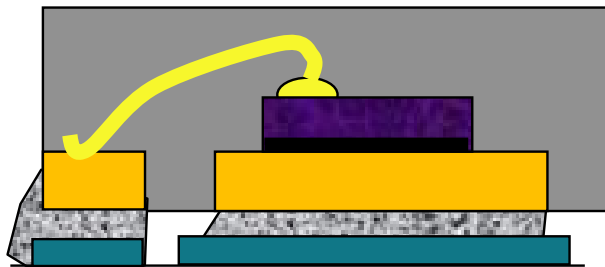


图 2-1. 标准 QFN 封装图示

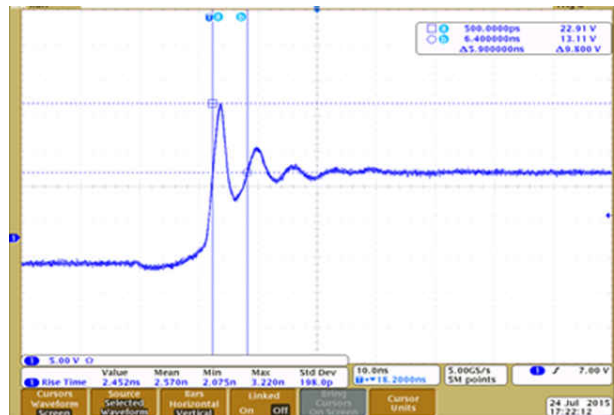


图 2-2. 开关节点波形 (标准 QFN 封装)

LMR33630 采用 FCOL 封装技术 (如图 2-3 所示)，通过翻转引线框上的裸片来消除引线键合，从而实现卓越的 EMI 性能。开关节点波形如图 2-4 所示，消除了振铃。这种技术的代价是需要通过封装的所有引脚散发热量。每个引脚的物理尺寸受限，而且没有用于散热的专用接地 DAP，因此与标准 QFN 封装相比，FCOL 封装的散热性能有限。节 4 中对该观察结果进行了更为详细的论述。

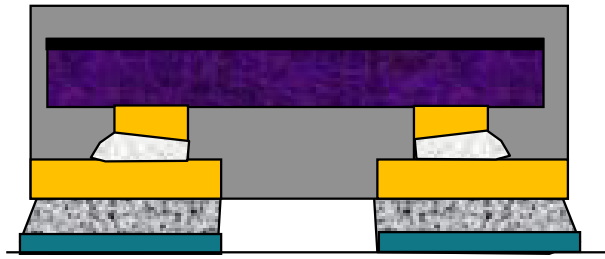


图 2-3. FCOL 封装图示

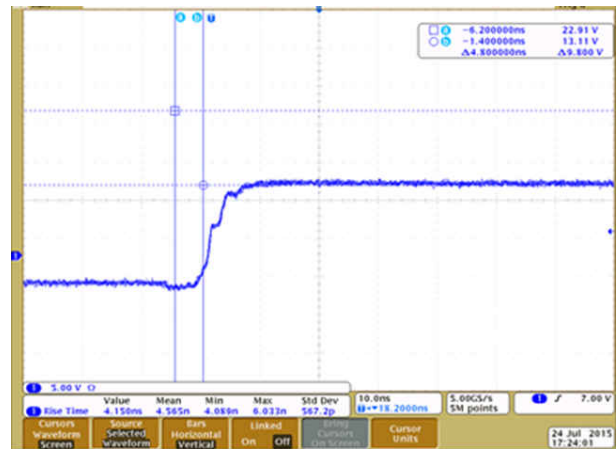


图 2-4. 开关节点波形 (FCOL 封装)

TI 全新的增强型 HotRod QFN 封装提供了下一代技术，可在标准 QFN 引脚排列中提供低 EMI、高功率密度解决方案，以提高设计的熟悉度和灵活性。LM60440 和 LM60440-Q1 器件是宽输入电压同步降压转换器，专为低噪声和 EMI 而设计。LM60440 器件具有 3.8V 至 36V 的输入电压范围，可提供高达 4A 的负载电流。LM60440 器件具有相同的 FCOL 技术以去除引线键合（预期可获得相同的 EMI 性能），但使用与标准 QFN 封装相一致的 PowerPad（引脚 13），以实现更好的散热和性能。总之，增强型 HotRod QFN 封装技术可提供优良 EMI 性能和良好热性能（详见节 4）。以下部分更详细地介绍了增强型 HotRod QFN 引脚排列（图 2-5）。

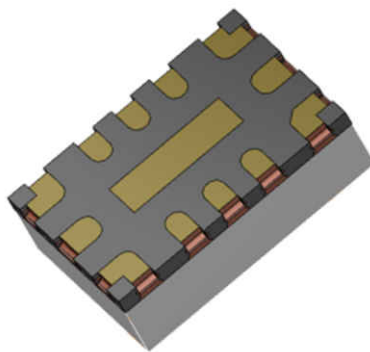


图 2-5. LM60440 封装

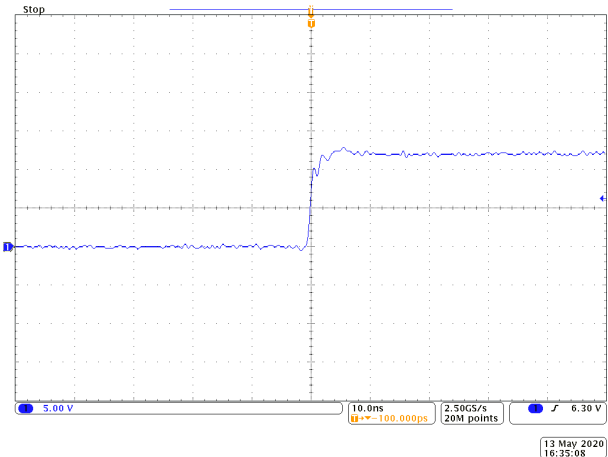


图 2-6. LM60440 开关节点

### 2.3 增强型 HotRod QFN 引脚排列

最佳 EMI 性能的另一个关键特性是优化引脚排列的能力。LM60440 器件经过优化的引脚排列如图 2-5 中所示。LM60440 具有用于输入电源的并行引脚以及 GND 引脚，可实现高频输入电容器的对称放置，并将两个相等的并联电感的等效寄生环路电感减半。因此，循环输入电流会产生反向磁场，从而消除 H 场并减少辐射发射。此外，通过执行高 di/dt 输入环路的对称布局，产生的（反向）磁场可以相互抵消。为了进一步降低寄生电感，请在 PCB 第 2 层的 L1 和 L2 环路下方（顶层电源电路正下方）放置一个连续的接地平面，用于返回电流（图 2-8）。此外，LM60440 器件能方便地在内部路由由开关节点引脚。第二个开关节点引脚与 BOOT 引脚（内部高侧驱动器的自举电源电压）紧邻放置。这简化了启动电容器的布线并减小了 SW 面积。启动电容器和 VCC 电容器的紧邻放置降低了栅极驱动器电路和在 MOSFET 开关期间承载高频电流的换向电源环路的寄生电感，最终减少了传导和辐射发射。

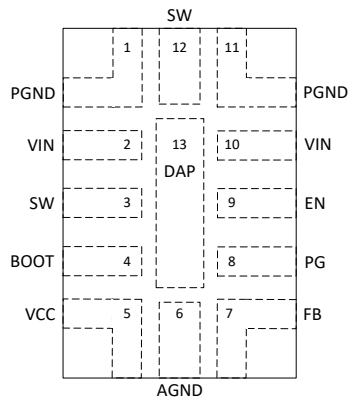


图 2-7. LM604x0 引脚排列

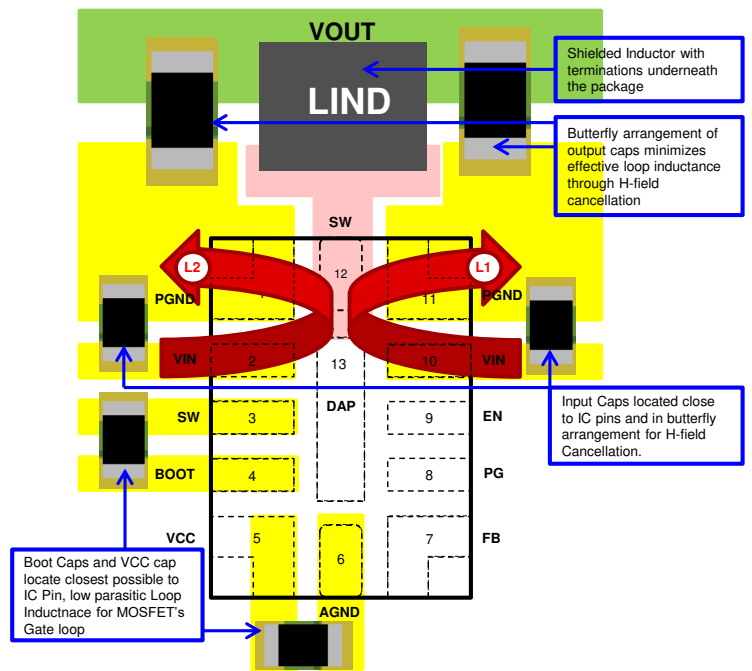


图 2-8. 具有并行输入环路的 LM604x0 布局

LM60440 经过优化的引脚排列可实现密集布局和紧凑型整体解决方案尺寸 (图 2-9)。

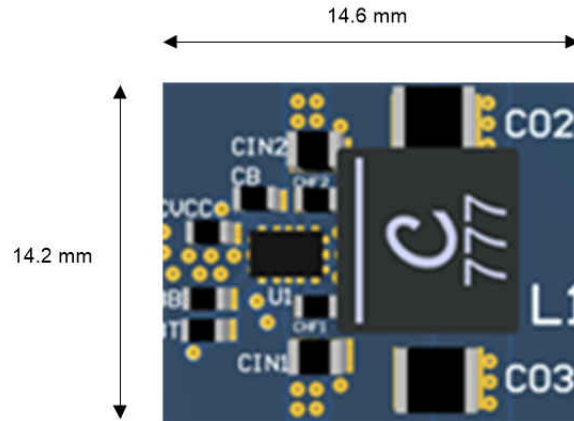


图 2-9. LM60440AQEVM 解决方案尺寸

## 2.4 FCOL 封装与增强型 HotRod QFN 封装的 EMI 结果对比分析

专门开发了 PCB 电路板来比较 LMR33630 和 LM60440 器件在具有相同 EMI 输入滤波器和 PCB 布局的情况下的 EMI 结果。图 2-10 和图 2-11 显示了比较结果。结果显示，在高频区域中的 EMI 性能几乎相同。因此，取消 FCOL 封装和增强型 HotRod QFN 封装中的引线键合可在整个高频范围内实现至少 10dB 的裕度。

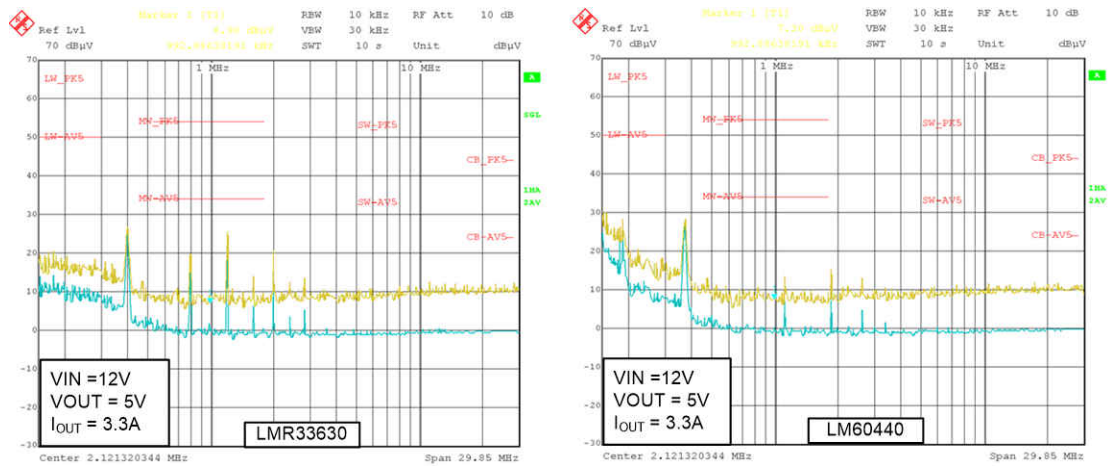


图 2-10. 传导 EMI 低频

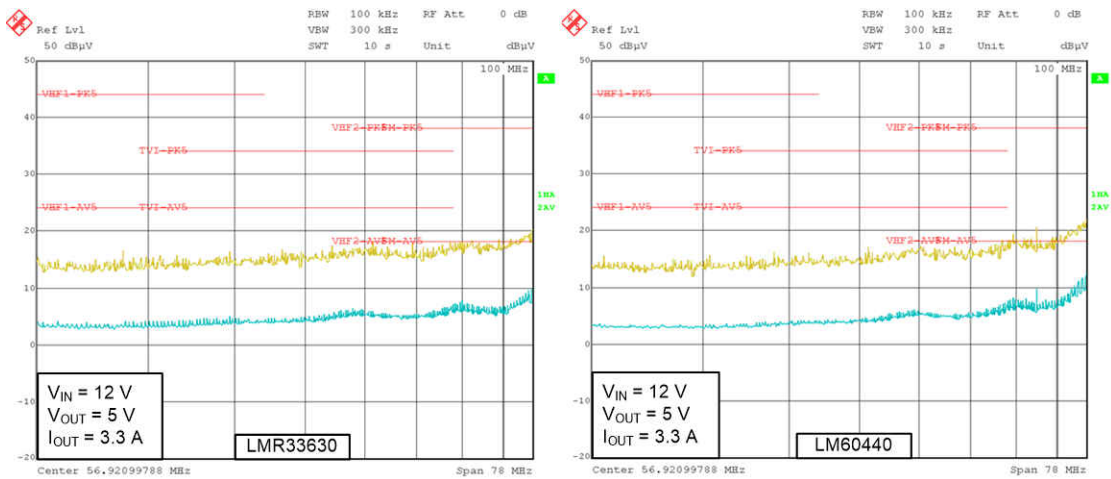


图 2-11. 传导 EMI 高频

### 3 增强型 HotRod QFN - 针对制造进行了优化

封装的结构针对制造进行了优化，添加了使用阶梯切割技术的可湿性侧面。可湿性侧面可确保良好焊点处的侧面润湿可见，并在使用增强型 HotRod QFN 封装时实现 100% 目视检查。在图 3-1 中的封装引脚排列上可以看到可湿性侧面阶梯式切口。图 3-2 所示为焊点的侧视图。

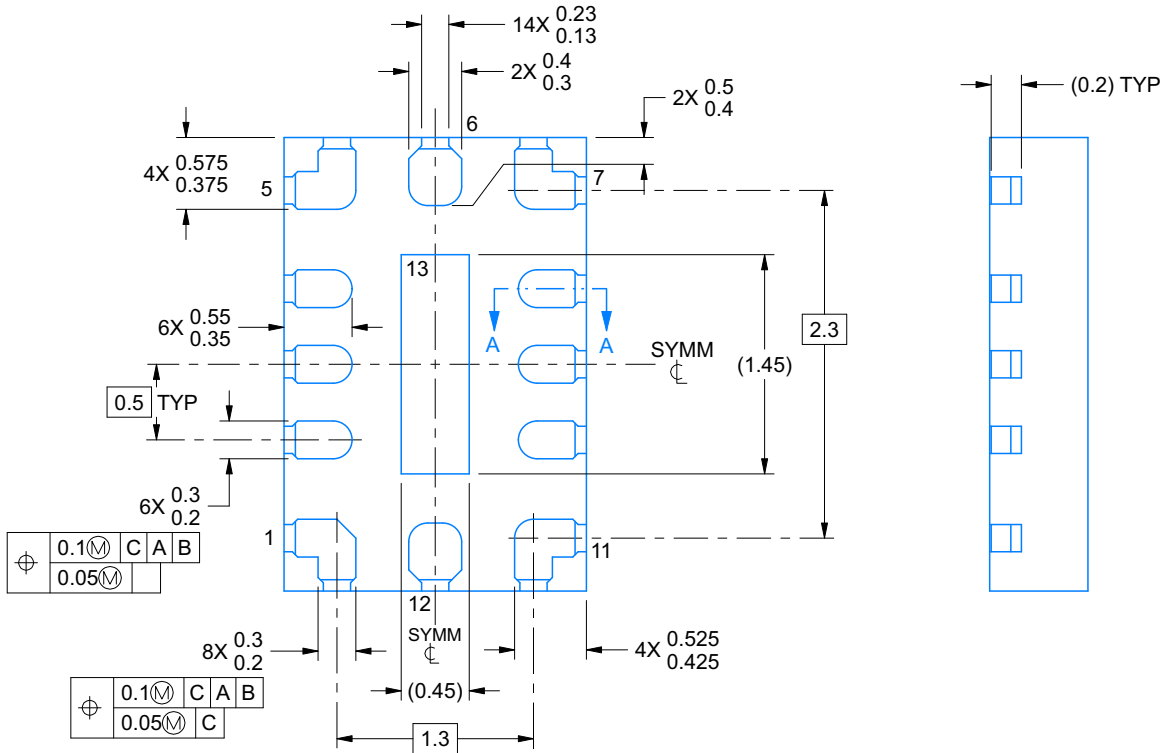


图 3-1. 带有阶梯式切口图示的 LM604x0 封装图纸

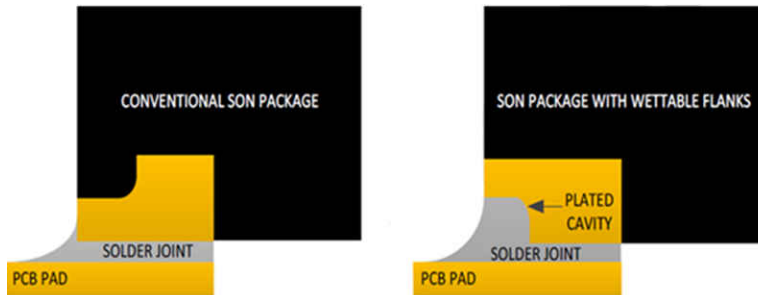


图 3-2. 可湿性侧面焊接连接

## 4 增强型 HotRod QFN - 针对热性能进行了优化

### 4.1 引言

正如本应用手册所述，QFN 封装技术和 FCOL 封装技术之间的一个权衡因素是热性能。增强型 HotRod QFN 封装利用 PowerPad 并通过此接地连接来增加散热。节 4.2 将通过 LM60440 量化 PowerPAD 的散热优势。

### 4.2 增强型 HotRod QFN 热性能

LM60440 器件是业界超小的 4A、36V 转换器，封装尺寸为 3mm × 2mm。该封装尺寸可通过 QFN 封装技术和 PowerPad 实现。PowerPad 是 IC 中间的接地连接，用于改善散热 (图 2-7)。

对称 QFN 引脚排列简化了布局，特别是用于实现经过优化的热设计。图 4-1 展示了 LM60440AQEVM 布局。蓝色轮廓代表 LM60440 IC 的位置。三个散热通孔位于 IC 下方，从 PowerPad 到接地平面。然后，PowerPad 通过 AGND 引脚 (引脚 6) 连接到更大的接地平面。此外，还使用顶角接地引脚从 IC 中散热。

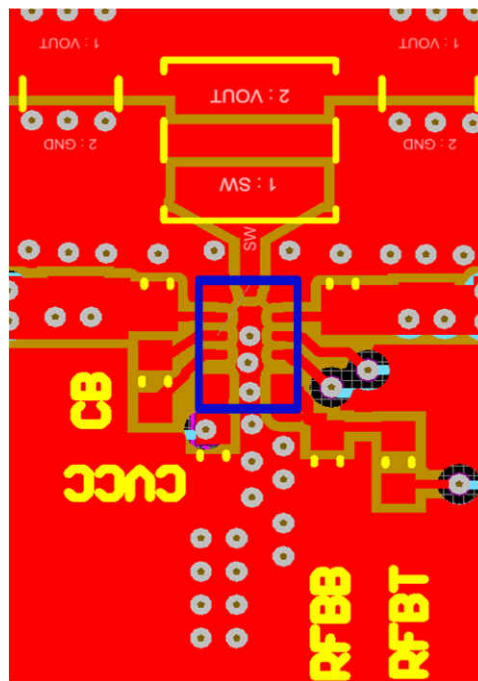


图 4-1. LM60440AQEVM 布局

图 4-2 展示了 LM60440AQEVM 的热像图。在 12V 输入、5V 输出、4A 负载下，IC 温度上升约 60°C。LM60440 和 LM60430 器件的最高运行结温为 150°C。在  $V_{IN} = 12V$ 、 $V_{OUT} = 5V$ 、 $I_{OUT} = 4A$  的运行条件下，LM60440 器件在 87°C 时的效率将为 89% (图 4-3)。



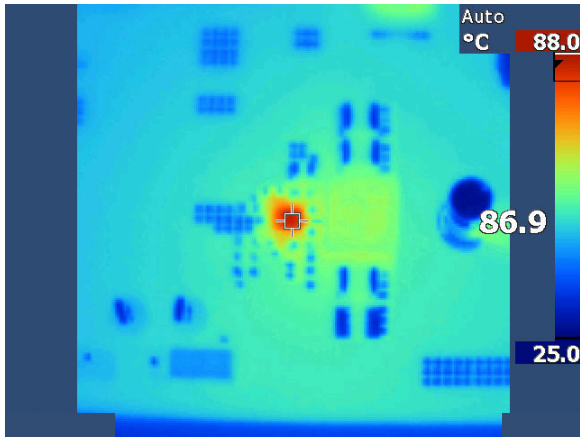


图 4-2. LM60440AQEVM 热像图 (  $V_{IN} = 12V$ ,  $V_{OUT} = 5V$ ,  $I_{OUT} = 4A$  )

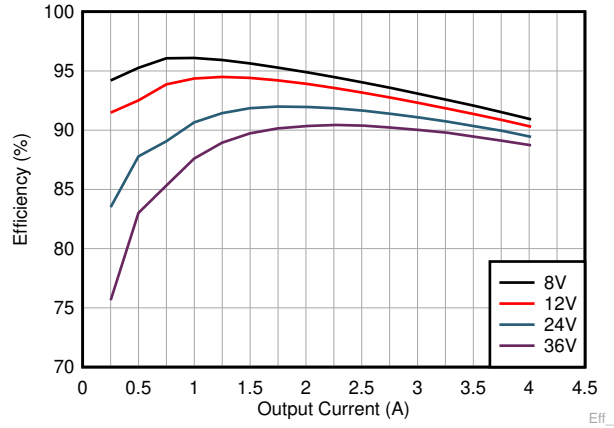


图 4-3. LM60440 效率与输出电流间的关系 (  $V_{IN} = 12V$ ,  $V_{OUT} = 5V$ ,  $I_{OUT} = 4A$  )

总功率耗散为 2.2W。使用的电感器是 XAL6060-682MEB，其 DCR 为  $20.8m\Omega$ 。为了准确计算 IC 的温度特性，必须按照方程式 1 和方程式 2 单独计算 IC 的功率耗散。

$$P_{Diss\_IND} = DCR \times I_{OUT}^2 = 20.8m\Omega \times 4^2 = 332.8mW \quad (1)$$

$$P_{Diss\_IC} = P_{Diss\_Total} - P_{Diss\_IND} = 2.2W - 332.8mW = 1.87W \quad (2)$$

IC 损耗为 1.87W。然后 PCB 的特征  $\theta_{JA}$  可以按照方程式 3 进行计算。

$$\theta_{JA} = T_{Rise} \div P_{Diss\_IC} = 61.9^\circ C \div 1.87W = 33^\circ C/W \quad (3)$$

LMR33630 和 LM60440 器件均采用  $3mm \times 2mm$  封装。为了便于比较，针对 LMR33630 器件完成了类似的过程，图 4-4 显示了热像图。

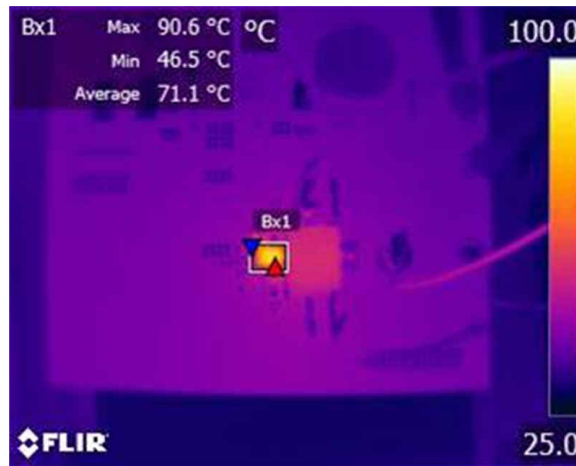


图 4-4. LMR33630 热像图

经发现 LMR33630  $\theta_{JA}$  为  $38.6^\circ C/W$ 。与 FCOL 封装技术相比，增强型 HotRod QFN 封装的散热性能提高了大约 13%。图 4-5 显示了 LM60440 和 LM60430 最高负载电流与环境温度间的关系曲线。LM60440 器件能够在  $85^\circ C$  下以满载电流运行，而 LM60430 器件能够在  $100^\circ C$  下以满载电流运行。

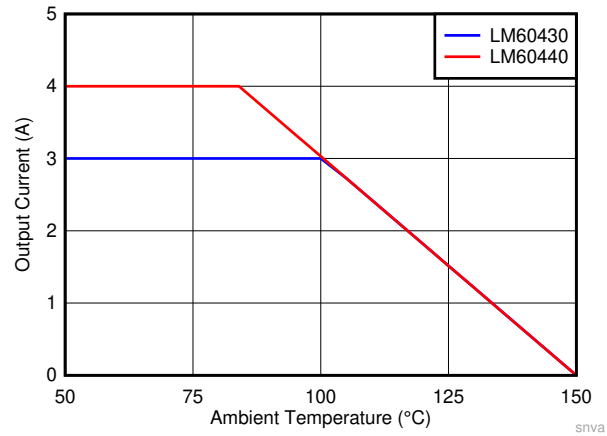


图 4-5. 最高电流与环境温度间的关系

## 5 总结

德州仪器 (TI) 的增强型 HotRod QFN 封装技术结合了 FCOL 封装具有的低噪声性能与带有热 DAP 的标准 QFN 封装具有的热优势。LM60440、LM60430、LM60440-Q1 和 LM60430-Q1 是 TI 采用增强型 HotRod QFN 封装的先进直流/直流转换器，如应用手册通篇所述，LM60440 产品系列实现了出色的 EMI 性能并突破了极其严苛的 CISPR 25 5 类限制。此外，LM60440 和 LM60440-Q1 的散热焊盘可在超小型 3mm × 2mm 增强型 HotRod QFN 封装中实现 4A 输出电流能力。最终，增强型 HotRod QFN 封装利用 FCOL 技术具有的低噪声性能和标准 QFN 封装具有的热增强功能，可在业界超小型 4A 转换器 LM60440 中实现非常低的 EMI。

更多有关 LM60440 产品系列的信息，请访问 [LM60440](#)、[LM60440-Q1](#)、[LM60430](#) 和 [LM60430-Q1](#) 产品文件夹。

## 6 参考文献

- 德州仪器 (TI), 《[电源传导 EMI 规格概述](#)》白皮书
- 德州仪器 (TI), 《[电源辐射 EMI 规格概述](#)》白皮书
- 德州仪器 (TI), [EMI : 基础知识](#)
- 《[有关直流/直流转换器 EMI 的工程师指南](#)》
- 德州仪器 (TI), 《[减少传导 EMI 的方式比您想象的要多](#)》
- 德州仪器 (TI), 《[直流/直流转换器封装和引脚排列设计如何提高汽车 EMI 性能](#)》

## 7 Revision History

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

<b>Changes from Revision * (June 2020) to Revision A (July 2021)</b>	<b>Page</b>
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	<b>1</b>

## 重要声明和免责声明

TI 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安全、安保或其他要求。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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.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。

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

## 重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司