参考文献

Application Note

LLC 控制器在突发模式时的零电流开关问题

Joy Cho

摘要

电视和监视器开关模式电源 (SMPS) 通常采用 LLC 拓扑来实现隔离式 DC/DC 功率转换级。造成这种情况的原因是，可以使用这种谐振拓扑能实现非常高的效率和高的功率密度。任何 LLC 在突发模式下运行时遇到的一大挑战是如何更大限度地降低可听噪声。另一种方法是防止在进入或退出突发模式时发生零电流开关 (ZCS)。这里展示的是一个有关如何使用 UCC256404 完善突发模式运行状况的示例。

内容

1 简介.....2
2 LLC 拓扑设计的原理.....2
3 突发模式工作控制机制.....3
4 退出突发模式时的潜在 ZCS 问题.....4
5 解决突发转换期间 ZCS 问题的外部电路设计.....5
6 解决突发转换期间 ZCS 问题的高精度外部电路设计_（选项）.....6
6.1 解决突发转换期间 ZCS 问题的外部电路测试结果.....7
7 总结.....8
8 参考资料.....8
9 修订历史记录.....9

插图清单

图 2-1. LLC 谐振转换器.....2
图 3-1. UCC256404 的突发模式开关模式.....3
图 3-2. UCC256404 的内部突发模式控制模块.....3
图 4-1. 突发工作条件下的 ZCS 问题机制.....4
图 5-1. 采用 UCC256404 的外部自动待机电路.....5
图 6-1. 采用 UCC256404 的精确外部自动待机电路.....6
图 6-2. 低侧电流波形（无外部电路）.....7
图 6-3. 低侧电流放大波形（无外部电路）.....7
图 6-4. 低侧电流波形（有外部电路）.....7
图 6-5. 低侧电流放大波形（有外部电路）.....7

表格清单

表 6-1. 自动待机输出电流电平.....7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

English Document: SLUAAQ7
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

1 简介

在撰写本应用手册时，为了让电视满足 DoE Vi 级和 CoC 2 级标准，其需要的电流应达到此要求，即在电视关闭时，待机功耗低于 500mW。由于 LLC 拓扑可以实现谐振的频率范围有限，因此在轻负载时，最佳选择是进入突发模式，以更大限度地降低功耗。UCC256404 采用突发模式软输入和软输出，有助于更大限度地降低可听噪声。进入和退出突发模式时须确保在所有情况下均能避免零电流开关 (ZCS)。ZCS 或硬开关是 LLC 不需要的工作模式，其可能会导致电路故障。本应用手册旨在介绍如何动态调整突发模式下的待机功耗性能。

2 LLC 拓扑设计的原理

LLC 谐振转换器基于串联谐振转换器 (SRC)。通过使用变压器的磁化电感，可在较宽的输入电压和负载范围内实现零电压开关。因为 LLC 拓扑在谐振频率下运行，所以其始终以 50% 占空比运行。因此，控制负载电源的唯一方法是改变谐振频率。此频率范围受 Lm，Lr 和 Cr 定义的谐振回路的限制，如图 2-1 所示。LLC 控制器在额定输入电压下以谐振频率工作时，能达到最佳效率。随着开关频率的降低，电压增益会显著增加。这种行为使得该转换器可以在输入电压下降时仍保持电压稳定。例如，如果禁用 PFC，便可进一步将轻负载时的功率降到最小。由于谐振转换器的性质，谐振组件上的所有电压和电流都近似为正弦波。LLC 谐振转换器的增益特性是根据一次谐波近似 (FHA) 进行分析的，这意味着所有电压和电流都被视为正弦波形，其频率与开关频率相同。FHA 将 LLC 功率级建模为驱动有效负载电阻 **RL** 的正弦输入电压(V**S**)，如下面的图 2-1 所示。

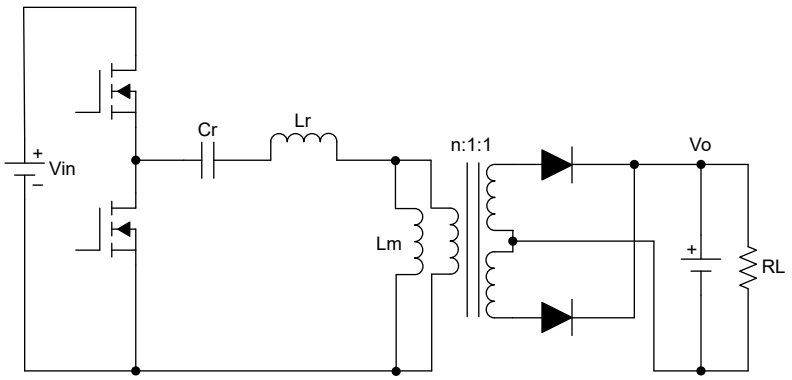

图 2-1. LLC 谐振转换器

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

3 突发模式工作控制机制

与任何电源转换器一样，LLC 转换器功率级的效率随输出功率迅速下降以保持合理的轻负载效率，LLC 转换器在突发模式下工作。在该模式中，LLC 转换器在一个短突发周期内以相对较高的功率运行，然后在一个周期内关闭开关。在突发周期中，过量的电荷转移并储存在输出电容器中。在突发关闭周期中，储存的电荷用来供应负载电流。突发模式运行对于满足严格的待机功耗要求至关重要。突发模式运行带来的一大挑战是如何降低听得见的噪声及优化性能。由于需要在一段时间内停止开关，因此存在一种开关脉冲模式，其频率在 20Hz 至 20kHz 的可闻频率范围内。UCC25640x 的一些器件型号包括突发模式并在前几个和最后几个开关脉冲具有软启动和软关断周期，从而更大限度地降低待机运行期间的可闻噪声。两个突发模式阈值用于控制进入和退出突发模式。BMTL 表示突发模式阈值低，其是进入突发模式的阈值。BMTH 表示突发模式阈值高，其是退出突发模式的阈值。图 3-1 展示了名为 FBreplica 的内部反馈信号与两个阈值进行比较，并决定突发模式运行状况

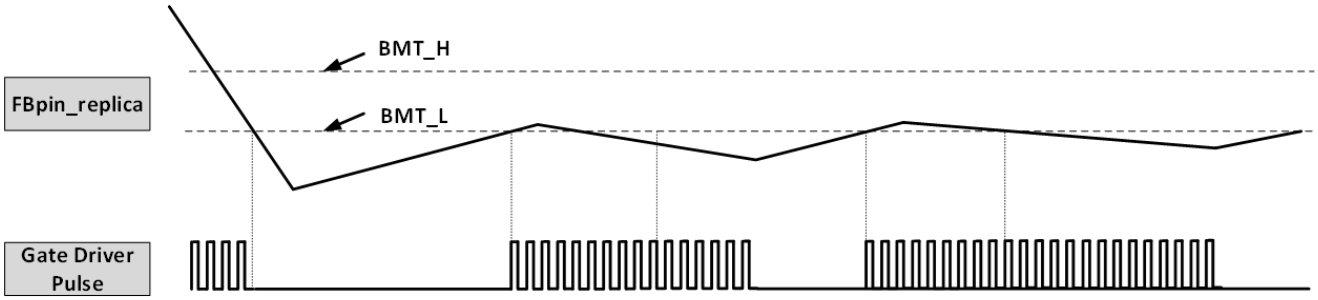

图 3-1. UCC256404 的突发模式开关模式

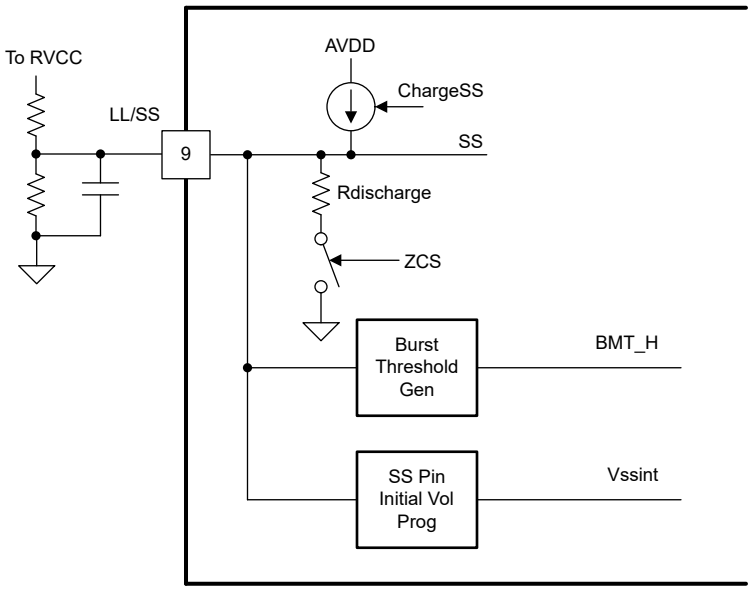

图 3-2. UCC256404 的内部突发模式控制模块

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

4 退出突发模式时的潜在 ZCS 问题

当突发数据包彼此过于接近时，可能会发生 ZCS。这是因为退出突发模式之前的关闭时间较短，并且开关节点仍在运行，这可能导致低侧导通并出现电流尖峰。图 4-1 展示了当突发数据包彼此靠近时 ZCS 问题是如何发生的。

1. 在短突发关闭周期较短时，突发数据包的第一个脉冲在 ZCS 情况下打开
2. 最小突发关闭可设计用于抑制开关节点以及突发数据包的第一个脉冲何时可以在没有 ZCS 的情况下打开

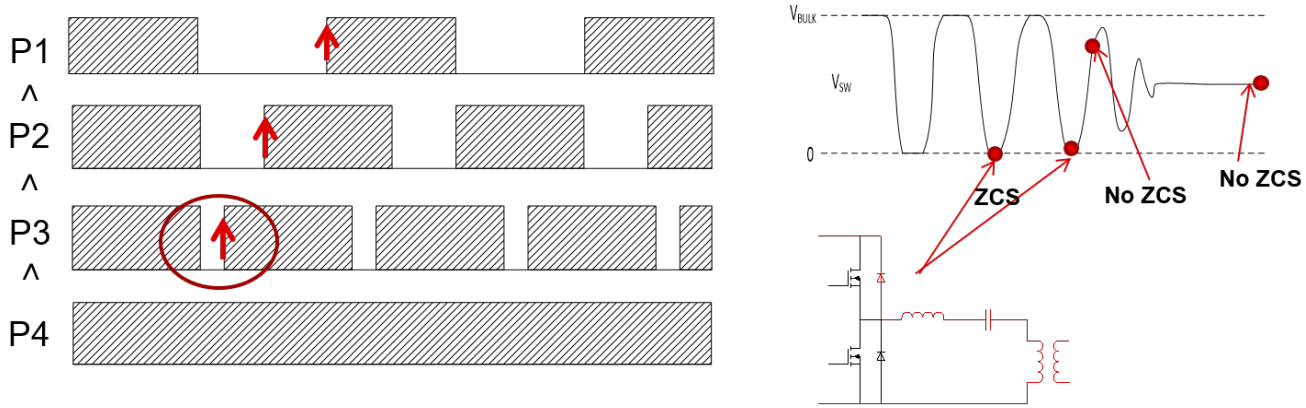

图 4-1. 突发工作条件下的 ZCS 问题机制

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

5 解决突发转换期间 ZCS 问题的外部电路设计

当开关节点受到阻尼且突发数据包的第一个脉冲在没有 ZCS 的情况下打开时，下面的自动待机电路会保持至少 200µs 的突发关闭时间。图 5-1 展示了如何使用自动待机外部电路在突发转换期间将 ZCS 问题降到最少。

以下列表详细介绍了配有 UCC256404 的外部自动待机电路的工作机制。

1. 使用该电路在较高负载条件下自动打开 PFC 并禁用突发模式。
2. INA 对输出电源轨上电流检测两端的电压进行升压
3. 当 INA 输出大于基准电压时，比较器输出为高电平，小 FET 导通会向 LL/SS 引脚的初级侧发送故障信号。
4. 在负载变大时禁用突发模式，以保持突发数据包之间的最短时间

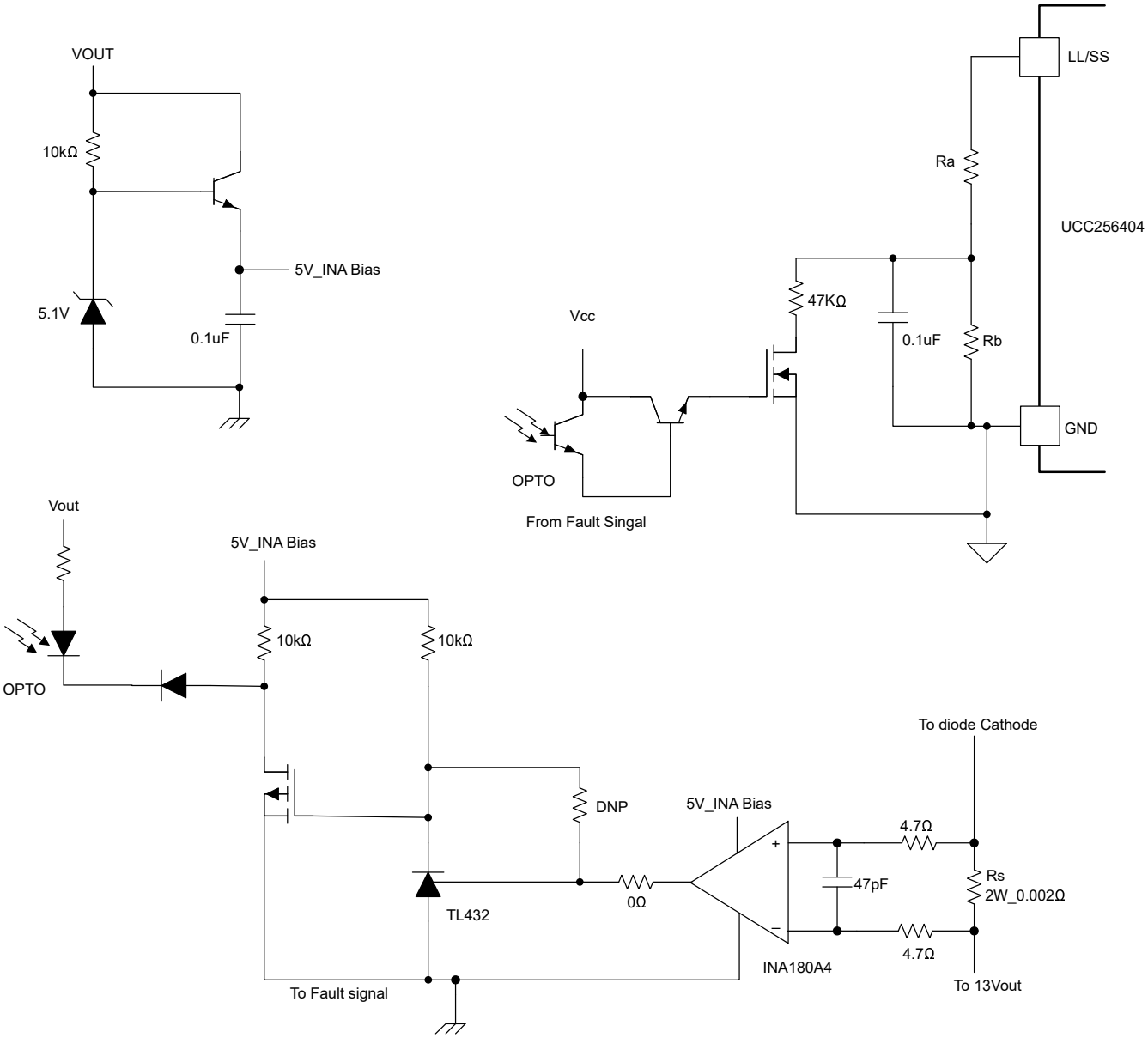

图 5-1. 采用 UCC256404 的外部自动待机电路

English Document: SLUAAQ7
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

6 解决突发转换期间 ZCS 问题的高精度外部电路设计_（选项）

为了使自动待机功能准确地运行，必须更详细地设计外部电路。我们更改了以下电路，以便电路可以在所有交流电压范围条件 (90Vac 至 264Vac) 下精确地运行。如图 6-1 所示，为了改进突发转换期间的 ZCS 运行，这里设计了故障信号输出电路，通过将小信号 FET 和并联稳压器配置更改为运算放大器配置，实现更精确的自动待机运行。

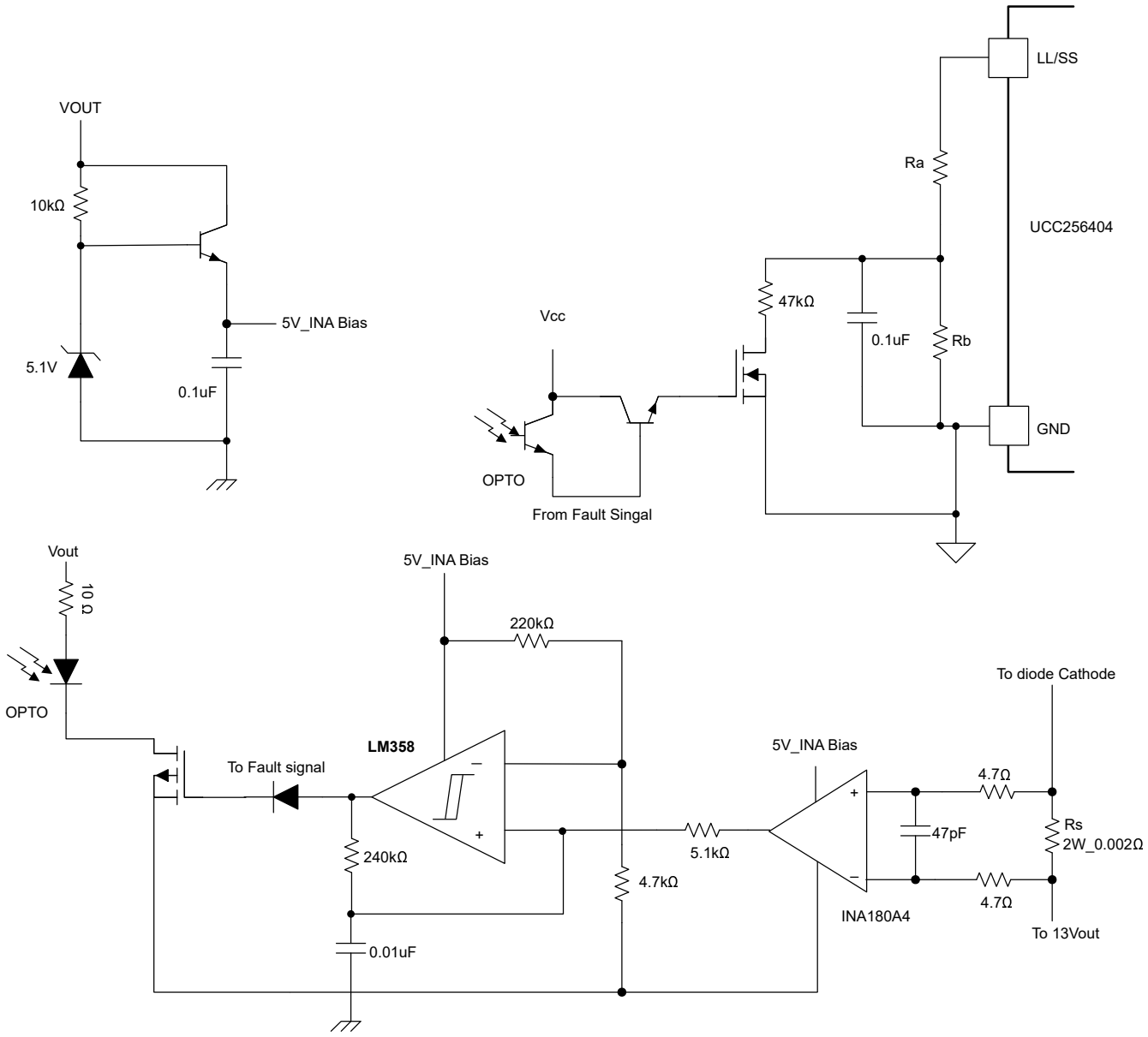

图 6-1. 采用 UCC256404 的精确外部自动待机电路

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

6.1 解决突发转换期间 ZCS 问题的外部电路测试结果

表 6-1 展示了为自动待机输出电流电平而设置的外部电路元件值

表 6-1. 自动待机输出电流电平

负载条件	突发模式设置	突发关闭周期
> 0.25A	无突发	0
< 0.25A	功率高于 0.25A 时出现突发	大

以下波形显示了没有外部自动待机电路和有外部自动待机电路的情况

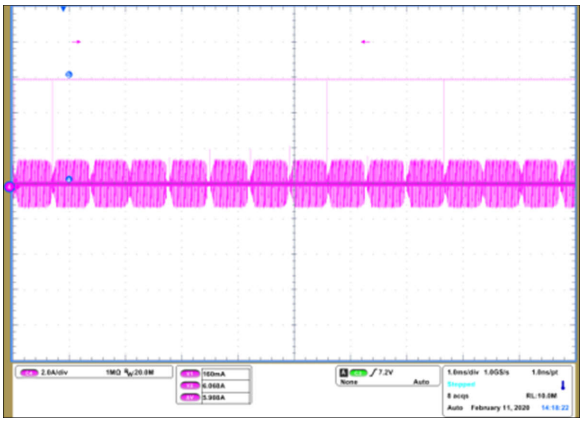

图 6-2. 低侧电流波形（无外部电路）

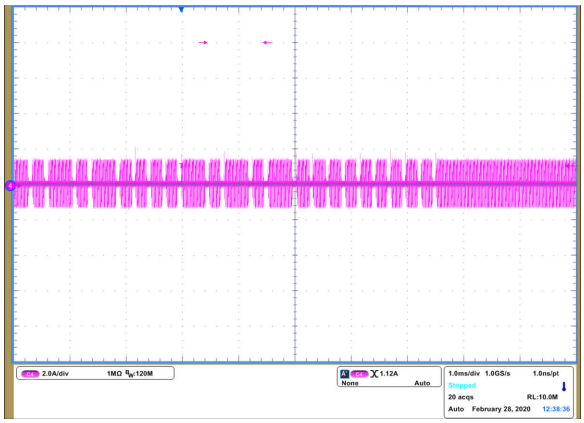

图 6-3. 低侧电流放大波形（无外部电路）

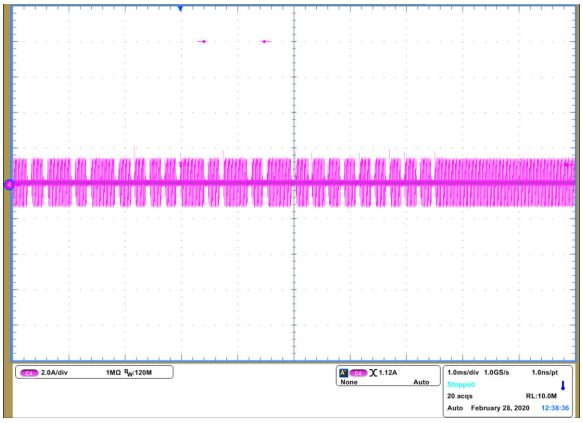

图 6-4. 低侧电流波形（有外部电路）

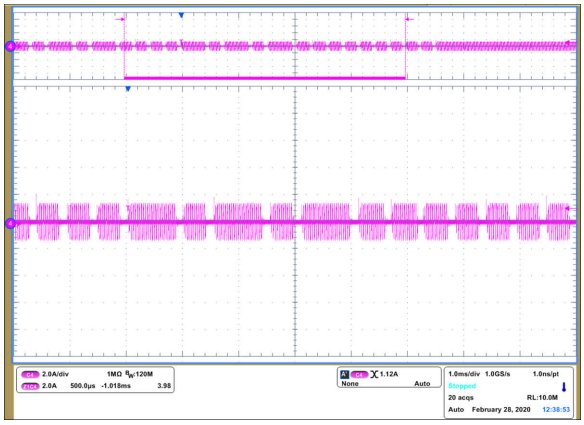

图 6-5. 低侧电流放大波形（有外部电路）

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

7 总结

在采用本文件所述的自动待机外部电路设计后，测试和测量波形所获得结果表明，此电路在运行时不会在突发模式转换期间，在输出电流中出现 ZCS 问题，并且两个开关突发数据包在突发模式转换期间关闭。自动待机电平可根据额定值进行调节。由此可知，在 90Vac 至 264Vac 的所有测试条件下，自动待机外部电路都可以实现正常运行性能。

8 参考资料

- 德州仪器 (TI)，*UCC25640x 具有超低可听噪声和待机功耗的 LLC 谐振控制器*，数据表。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

9 修订历史记录

Changes from Revision * (September 2024) to Revision A (April 2025) **Page**

- 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式 1
- 修改*配有 UCC256404 的外部自动待机电路*图 5
- 修改*配有 UCC256404 的精确外部自动待机电路*图 6

Copyright © 2025 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、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