

LM636XX-Q1 使用注意事项关于 PFM 模式下的一种失效分析



Alan Xia

FAE Auto Tier1

摘要

LM636XX-Q1 被广泛应用于汽车座舱、ADAS 及车身等汽车应用中。本应用手册主要帮助用户了解常见的应用中出现的 EOS (Electrical Overstress, 电气过应力) 失效案例，如何通过每一步的分析找到芯片失效的根因，并且通过实验室验证以及量产的设计验证来闭环失效的分析结论，最终促使芯片来优化设计适配更多的应用场景，优化芯片设计，帮助用户设计出更加稳定的系统。

内容

1 简介	2
2 反向电流的产生	3
3 EOS 失效案例	4
4 原因可能性	7
5 EVM 测试	8
6 反向电流的产生与失效过程	10
7 数据验证	13
8 设计建议	14
9 小结	14
10 参考文献 :	14

1 简介

LM636XX-Q1 作为 TI 汽车系统中被广泛使用的一级 Buck 产品，输入电压支持 3.5V-36V，并且支持汽车 12V 电池在抛负载时的电压波动，最大可以承受 42V (WSON 封装)，静态电流低至 23 μ A，支持展频功能，同系列所有电流等级产品引脚兼容 (LM63610-Q1/LM63615-Q1/LM63625-Q1/LM63635-Q1)。在汽车座舱，外置功放音频，ADAS，车身模块等，如下图 1-1 智能座舱架构框图：

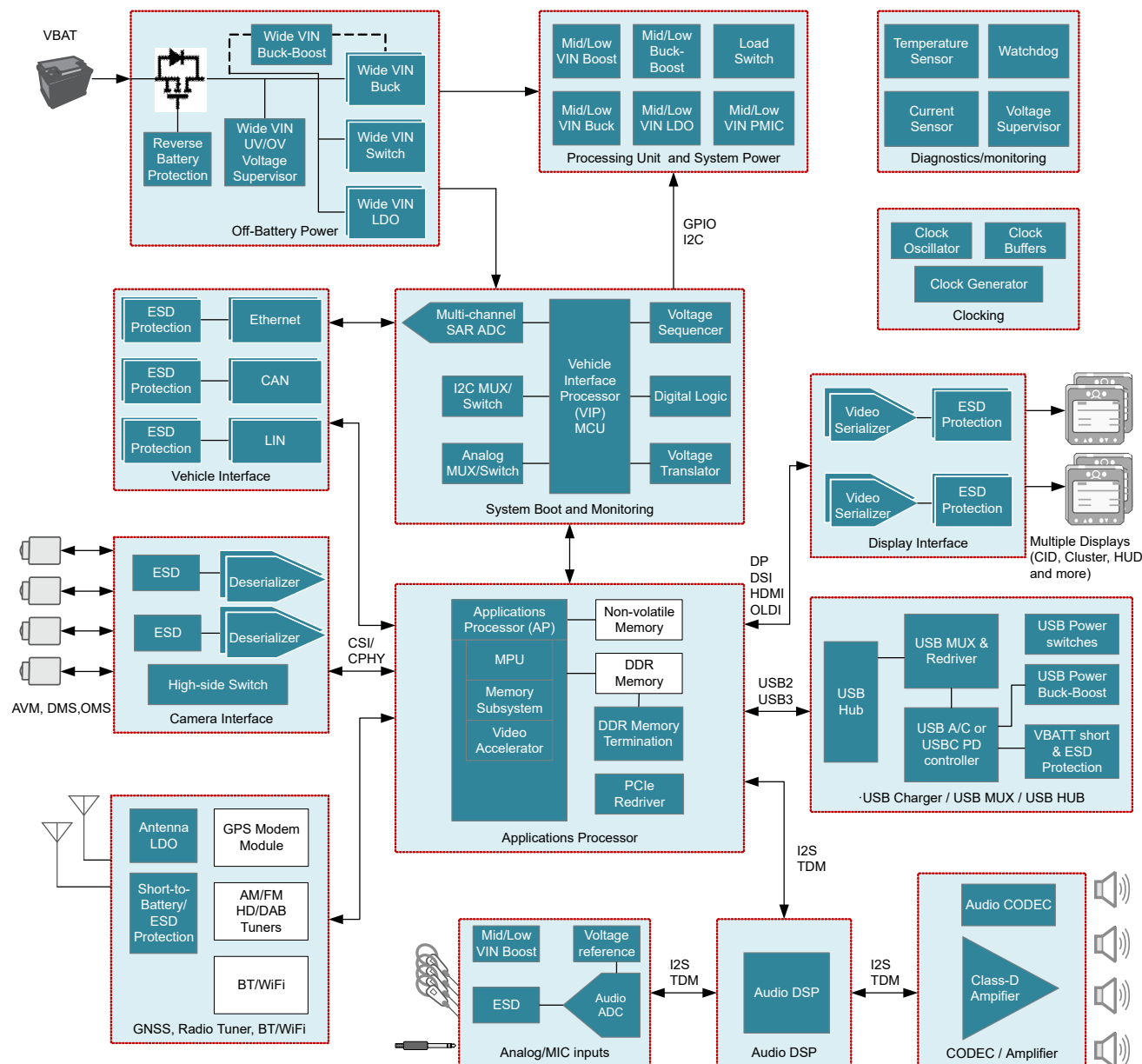


图 1-1. 数字智能座舱系统

座舱中的电源模块承载着整个系统供电，电源芯片不可避免会出现各种各样的失效，如何找出每一个失效的根因，对系统设计或者芯片设计做出优化便显得尤为重要。

2 反向电流的产生

对于 Buck 的拓扑来说，反向电流是比较常见的现象，当在工作中存在较大的反向电流场景时，则会有一定的风险导致 MOSFET 的失效。这种失效我们常称为 EOS 失效，也就是电气过应力（**Electrical Overstress**），是指芯片因承受超出其耐受极限的电压或电流而导致的损坏，通常由持续数微秒至数秒的过载引发。对于芯片的失效分析（**FA, Failure Analysis**），大多数情况 FA 的报告结论可能是 EOS，但是 EOS 是芯片表征的结果，而不是问题的根因。因为导致 EOS 可能的原因有很多，例如使用场景的不合理、原理图/Layout 设计的缺陷、芯片鲁棒性带来的问题以及供电或者负载异常导致的失效，亦或者多种问题复合导致的失效。本章节就一个实际失效案例来帮助理解失效问题的分析过程，导致这个案例失效的罪魁祸首就是反向电流。首先我们需要先理解反向电流是什么，当负载电流减小，电感电流可能降至零以下，此时若下管 MOSFET 未及时关断，输出电压高于开关节点电压，导致电流从输出端反向流回电感，形成负电流。关于反向电流的形成主要有以下几个条件：

- 输出电压较高，或者输入输出压差较小；
- 输出电容过大；
- 输入电压掉电比输出掉电更快；
- 其他负载抽取大电流,导致输入电压降低；
- 长时间处于 PFM 模式工作。

3 EOS 失效案例

应用场景：LM63635-Q1、 V_{in} =BAT(6-16V)、 V_{out} =8V、 I_{out} <1.5A、FSW=2100K、Auto Mode

本章介绍的失效案例来自于汽车智能座舱的应用，负载是汽车 360 环视/行车记录仪等 POC (Power over Coax) 负载供电，属于短时间的高负载，但大部分工作场景处于轻载模式 (PFM) 下的负载。供电的情况如图 3-1 所示：



图 3-1. POC 应用框图

首先对比完好芯片和失效损坏芯片的外观对比，如下图 3-2：

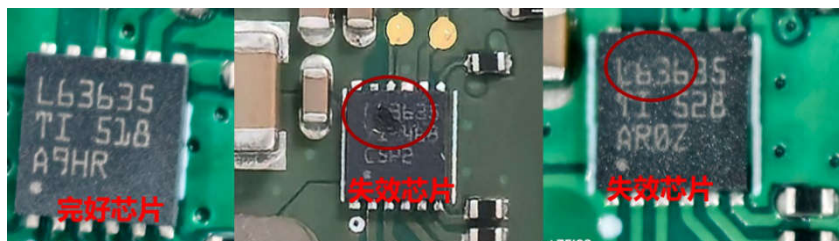


图 3-2. 失效芯片外观对比

从失效的外观我们可以看到，EOS 的失效都在芯片的同一个部位，8D 报告如下图 3-3，从开盖分析发现芯片的失效表现比较雷同，失效集中出现在 PIN1 (SW) Short to GND、PIN3 (VCC) Short to GND、PIN12 (VIN) OPEN，以及小部分出现 PIN2 (BOOT) Short to GND。同时，从失效芯片的外观损坏可以看到的失效来自于 VIN Bonding 线的熔断导致。

• External Package Examination:

External visual inspection with 50x magnification showed blown package in area of pin 12 (VIN).

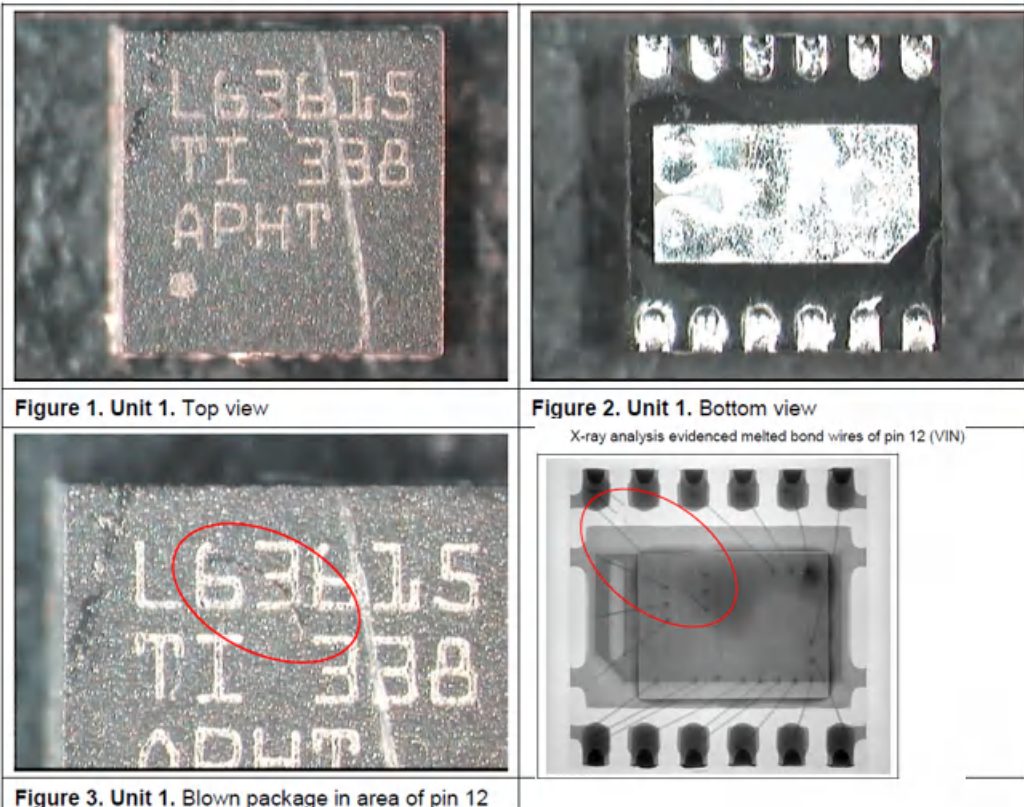


图 3-3. 8D 报告开盖分析

该案例的设计原理图完全遵循数据表的参考应用设计如图 3-4。通过应用的场景及失效的表现来看，分析可能是上下管存在交叉传导，导致交叉传导的原因有很多，例如 VCC 的噪声导致的控制逻辑失效导致的上下 MOSFET 同时导通，反向电流导致应力损坏等，因为只有两管直通才会导致 Bonding 线存在巨大的电流导致熔断。

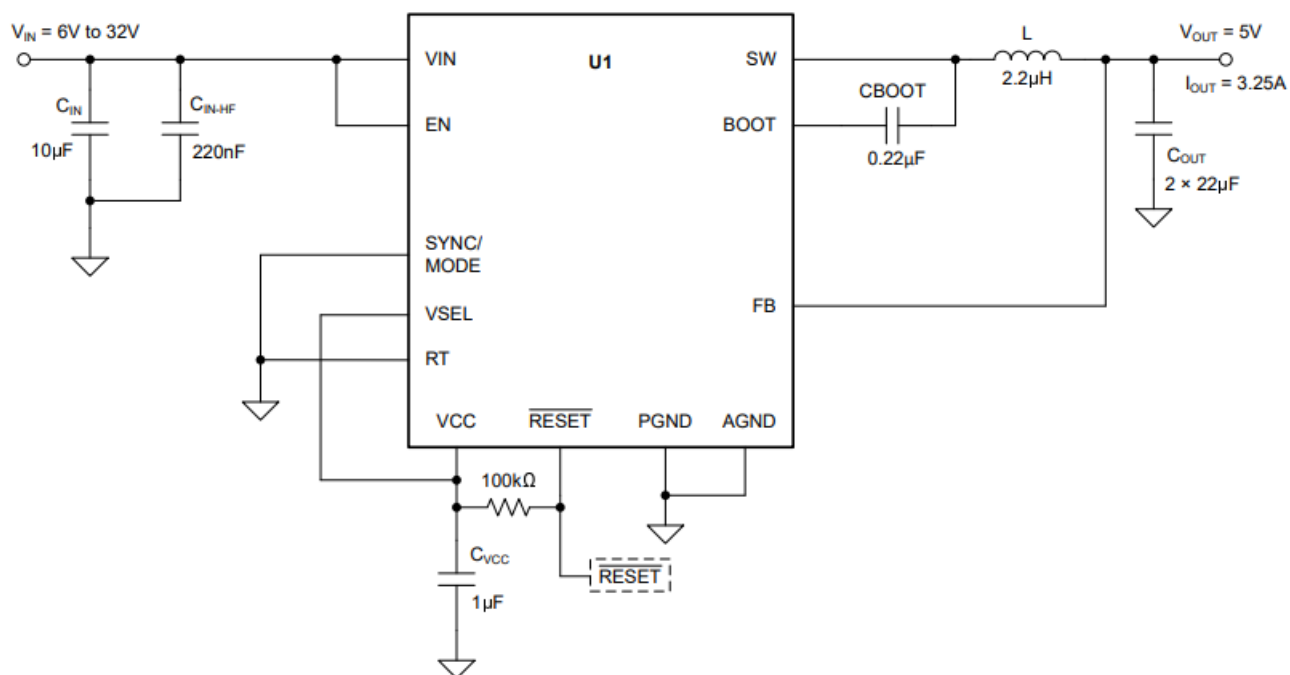
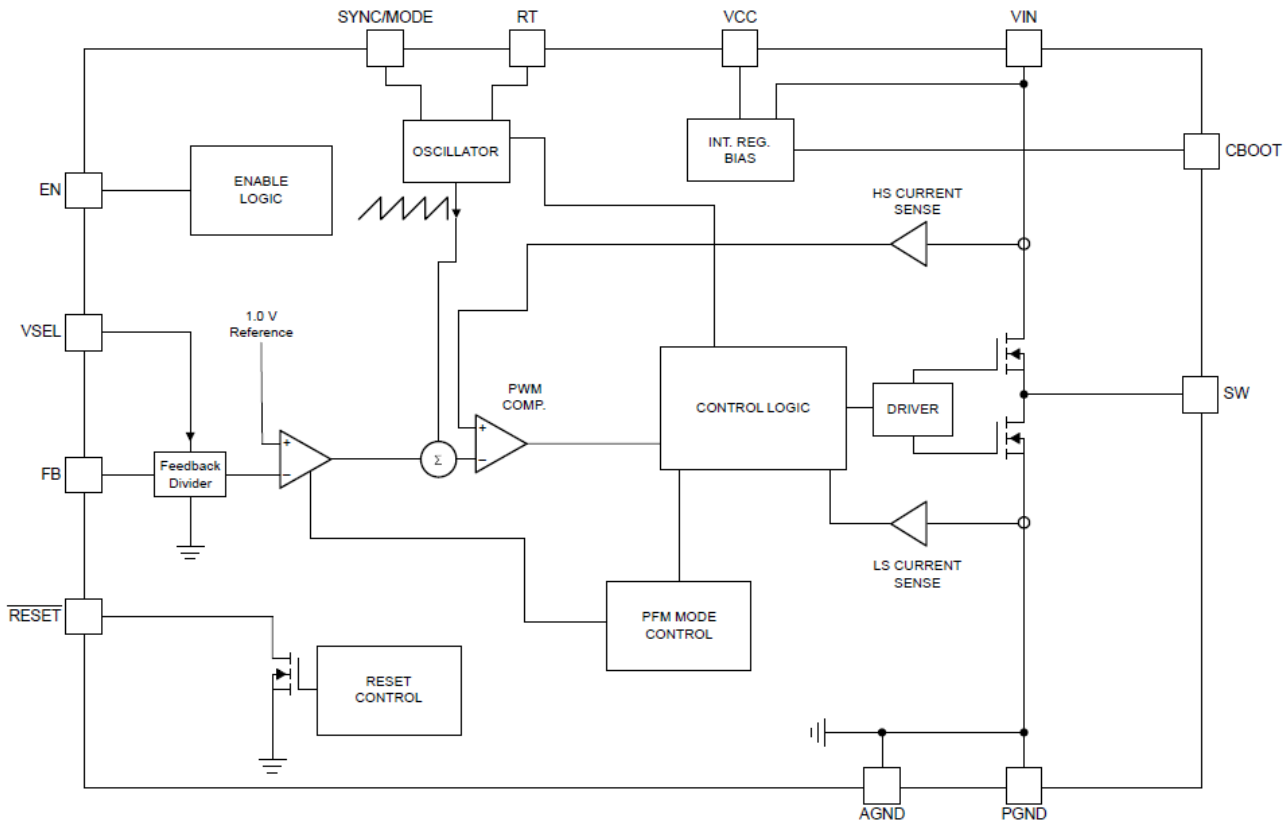


图 8-1. 示例应用电路 $V_{IN} = 12V$ 、 $V_{OUT} = 5V$ 、 $I_{OUT} = 3.25A$ 、 $f_{SW} = 2.1MHz$

图 3-4. LM636XX-Q1 参考设计

VCC 对于芯片的逻辑工作尤为重要，VCC 的设计不合理可能会引入噪声，任何的噪声都可能影响控制的逻辑错误，这就会存在交叉传导的风险。VCC 作为 CBOOT 的充能电容，CBOOT 则为半桥中上管驱动偏置电压，在控制逻辑中起着非常重要的功能。



从图 4-1 可以看到，VCC 取自 VIN 线性降压而来，VIN 的任何噪声都有可能传导至 VCC 处，如图 4-2 TI 建议在 VCC 处不加载任何外部电路的同时，需要添加 1uF 的优质电容用于去耦滤波，建议参考 LM63635-Q1EVM 使用 X7R 的 MLCC 电容。

VCC 引脚是内部 LDO 的输出，用于为稳压器的控制电路供电。该输出需要在 VCC 和 PGND 之间连接一个 $1\mu\text{F}$ 、16V 陶瓷电容器，用于确保正常运行。通常，此输出不得加载任何外部电路。但是，该输出可用于为 $\overline{\text{RESET}}$ 功能提供上拉电阻，并用作器件各种控制输入的逻辑电源。对于 $\overline{\text{RESET}}$ 标志上拉电阻， $100\text{k}\Omega$ 电阻值是不错的选择。VCC 上的标称输出电压为 5V。

在 **Layout** 的设计上, TI 建议在靠近 **VCC** 引脚的位置放置一个 **VCC** 旁路电容器。该电容器必须尽可能靠近器件放置, 并使用短而宽的布线连接到 **VCC** 和 **PGND** 引脚, 不建议在该区域进行散热。

对于这个案例，TI 的产品线对设计的原理图及 **Layout** 进行严格的审查后，该案例的设计完全符合原理图及 **Layout** 的设计要求，基本排除了 **VCC** 的设计不合理导致的控制逻辑异常。所以，接下来将从反向电流的角度来分析该失效。

5 EVM 测试

由于该案例的失效率较低，无法在失效发生时抓取到任何异常的波形，只能尝试从 EVM 的测试来抓取可能存在的反向电流来验证，测试条件场景完全遵循案例来设计。

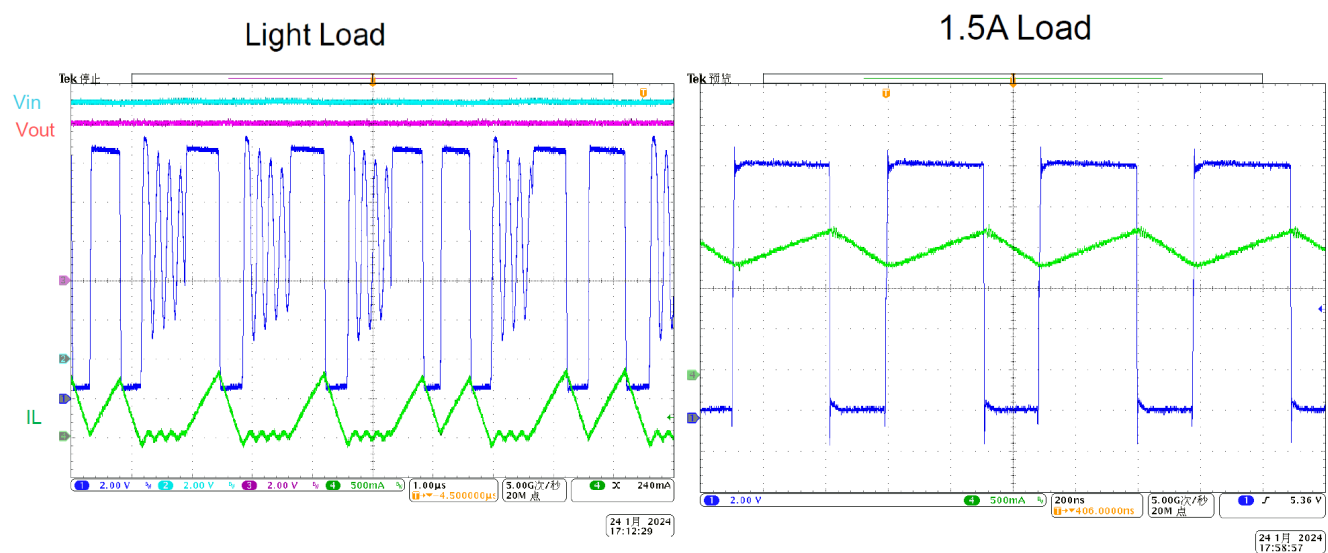


图 5-1. 正常工作波形

从上述图 5-1 可以看到，在轻载下有明显的降频动作，通过降低开关频率来节省轻载下的开关损耗，芯片的工作正常，没有看到任何异常的波形，后续针对反向电流的产生条件，模拟输入电压的快速下电，而输出电压掉电过慢的场景，波形如下图 5-2：

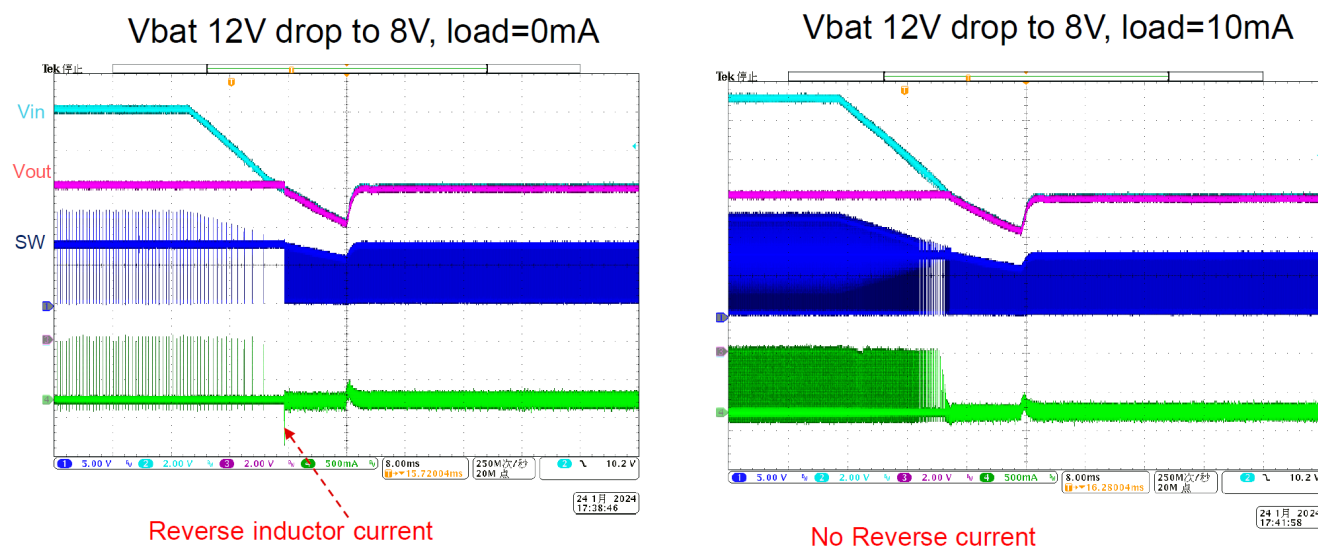


图 5-2. 空载与带载测试波形

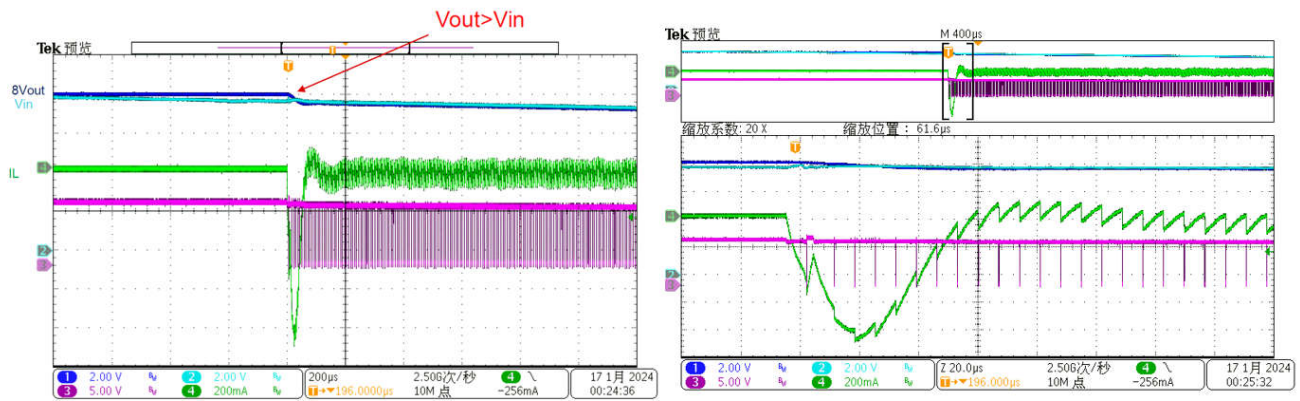


图 5-3. 放大波形

从图 5-2、图 5-3 测试波形结果，可以看到在几乎空载下，输入电压快速掉电，输出电压由于大电容维持输出时，在电感上看到了明显的瞬时反向电流，这个瞬时的电流存在击穿下管 MOSFET 的风险。

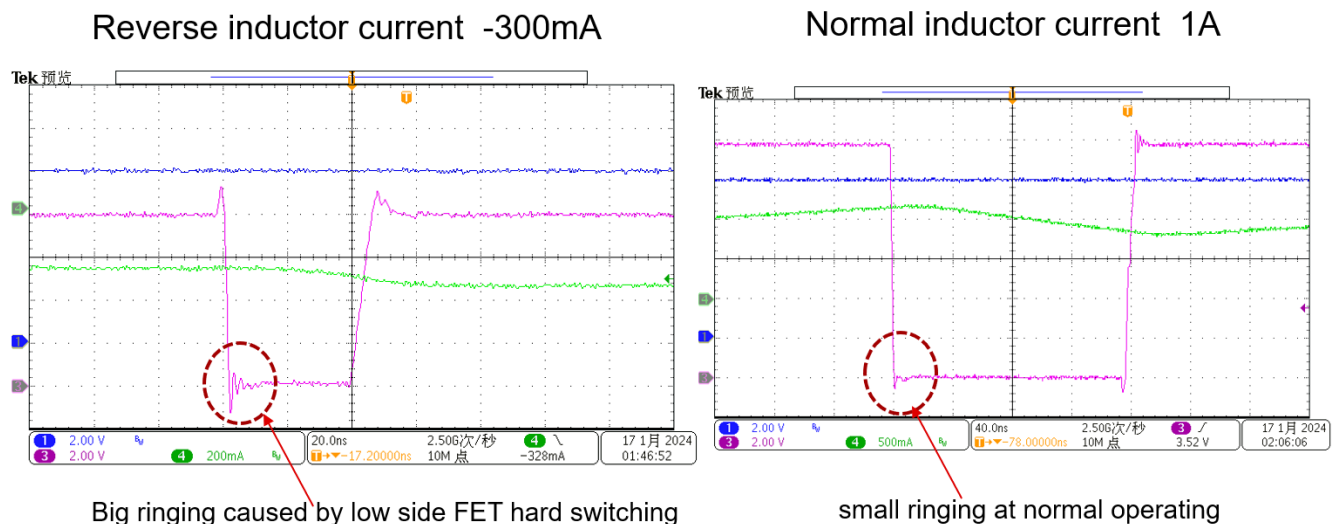


图 5-4. 下管波形

-300mA 的反向电流，在 ns 级的开启速度下，巨大的 di/dt 会在下管的两侧形成巨大的电压，这个电压就会存在较大的风险击穿下管 MOSFET，只是芯片存在个体差异，下管的 MOSFET 的应力表现不尽相同，所以当存在生产正态分布边沿的芯片，可能就会无法承受这个巨大的应力而失效。

举个例子来计算，按照测量到的反向电流-300mA 来计算，即 $di=300mA$ ，由于 LM636X5-Q1 属于转换器产品，我参考 LM25141 的 EVM 使用的 MOSFET (SQ7414AEN) 作为参考，取 rise time max $dt=14ns$ ，根据 Buck 拓扑的寄生电感经验值一般在 1-5nH，当前取中间值 $L=3nH$ 计算：

$U = (di/dt) * L \approx 64.3V$ ，该芯片的 VDS 耐压在 60V，超过了 MOS 的应力承受范围，所以这个反向电流存在损坏 MOS 的风险。实际应用中寄生电感和快速的 di/dt 对反向电流造成的反向电压都存在极大的影响，设计中需要重视。

6 反向电流的产生与失效过程

上文通过 EVM 的测试发现在当前的应用场景下确实存在较大的反向电流，虽然 EVM 上的芯片并未损坏，但是当样本量较大时，则会大大提高反向电流的击穿风险，本章将详细介绍在 BUCK 的开关过程中，反向电流时如何瞬间失效，以及对应完整的失效过程。

(1) Q1 开启与死区阶段

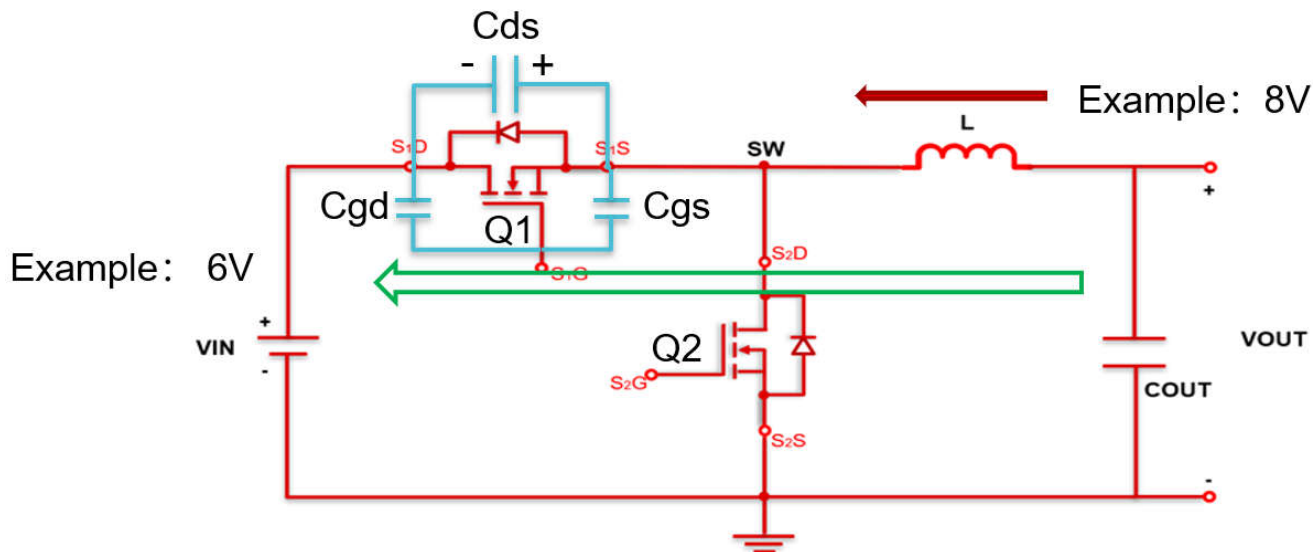


图 6-1. Q1 开启与死区阶段

在下电或者输入降至低于输出时，反向电流的回路是 VOUT->SW->Q1 体二极管->VIN。此阶段，会给 Cds 进行充电。

- 当上管 Q1 开启，下管 Q2 关断，Cds 充电，反向电流流向 VIN；
- 当上管 Q1 关断，下管 Q2 开启，反向电流会从下管流入 GND 泄放。
- 死区时间，反向电流会经由上管 Q1 的体二极管流向 VIN，同时 Cds 会被充电。

(2) Q1 关断，Q2 开启阶段

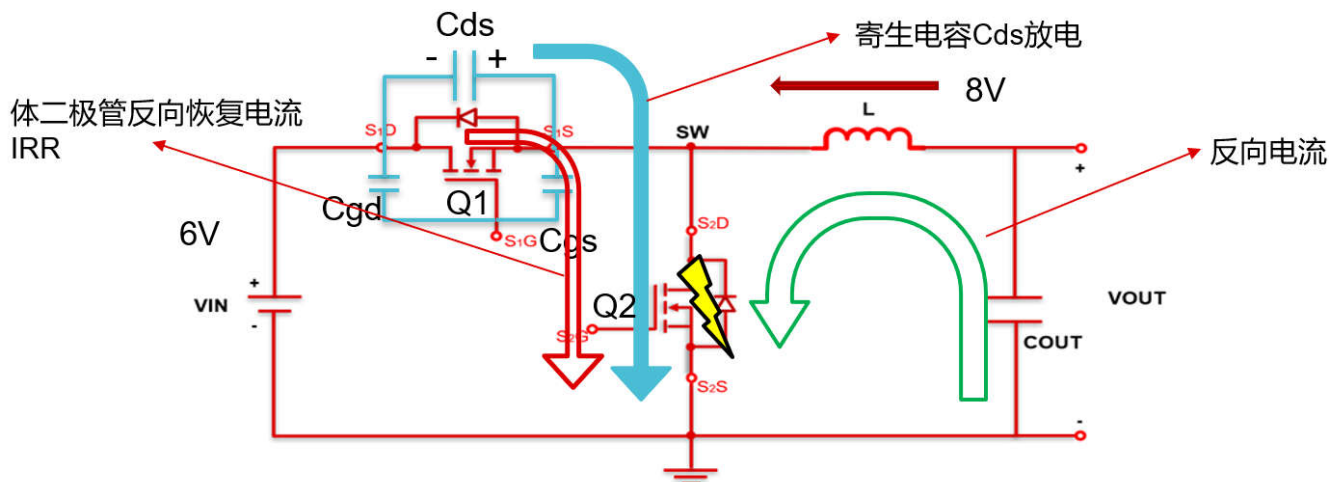


图 6-2. Q1 关断，Q2 开启阶段

上管 Q1 关断，下管 Q2 开启时：

- 此时除了输出的反向电流外；

- 在 Q1 开启阶段和死区阶段充电的 Cds 同时会通过下管放电；
- 死区时间内导通的体二极管的反向恢复电流也会通过下管导通来泄放。

一般下管的开启时间会在 ns 级别，所以根据计算，即使只有几百 mA 的反向电流， di/dt 的变化也会是相当大，足以达到损坏下管 MOSFET 的级别。

(3) 失效过程分析

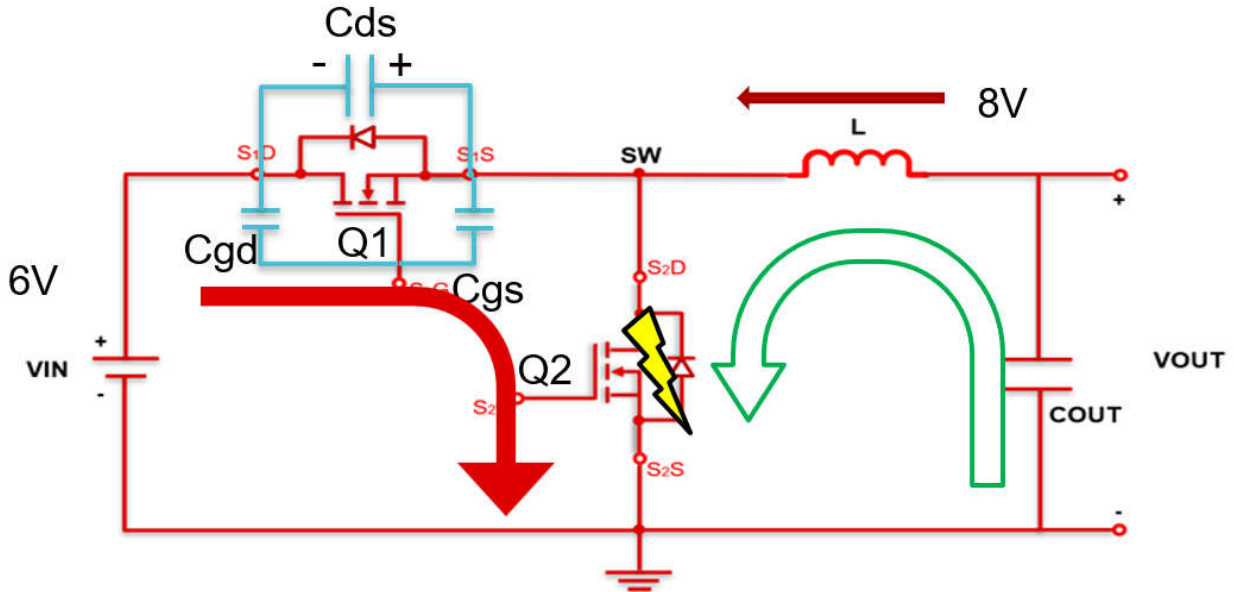


图 6-3. 下管失效

- **PIN12:** 由于巨大 di/dt 导致下管 MOSFET 失效，失效表现为短路，VOUT 快速接 GND 后输出快速下降，此时上管此时导通，会出现 VIN 直接短接到 GND，此时巨大的短路电流会直接把 DIE 上的 VIN 的 Bonding 线烧断，所以 VIN 显示为 OPEN 的失效现象。
- **PIN3:** VCC 是内部的 LDO PIN，直接从 VIN 取电的，降压给内部逻辑供电，VIN 短路器件巨大的电流把内部的 LDO 击穿，导致 VCC 短路。
- **PIN1:** SW 由于下管的短路导致显示失效为短路到 GND。

另外还有部分失效表现为 BOOT PIN 的短路通过图 6-4 可以得到解释，巨大的 di/dt 同时也会在 BOOT 电容侧形成较大的电位差，当这个电位差超过 BOOT 电容的击穿，从而与 VCC 的击穿形成了短路回路。

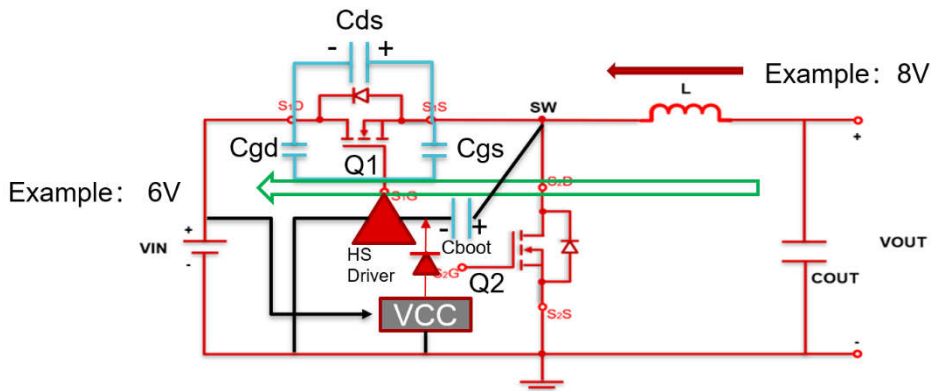


图 6-4. BOOT 失效

(4) 其他问题

根据反向电流的失效过程来反推，可能就会有以下几个疑问：

- 为什么失效案例只出现只在 PFM 模式下？

AUTO Mode(PFM Mode):在负载较轻的，芯片通过降低开关频率，来降低芯片的开关损耗和导通损耗，达到降低功耗的目的。

FPWM Mode : 芯片工作期间持续维持 RT 设定的开关频率，当前设计是 2.1MHz。

在 Q1 导通期间的 Cds 的电荷量由充电的时间决定，Cds 的充电时间分为 Q1 导通和死区时间，死区时间固定，因此主要影响因素就是 Q1 的导通时间。因此，轻载下，频率更低，Q2 开启的泄放时间就更短，Cds 和二极管反向恢复的电流释放时间太短，就会在短时间内形成巨大的 di/dt 。

总的来说，芯片处于轻载下，开关频率越低，则周期时间越长，Ton 相比较低频时越大，上管开启的时间更久，即寄生电容 Cds 和 Cboot 充电越久，下管开启时的电流冲击越大。

- 为什么在 POC 的设计中容易出现？

该案例的同一块电源板上还使用 2pcs 的 LM63635-Q1,不过输出为 3.9V/3.3V，均无任何失效问题的出现。而对于 POC 的供电应用输出常常设置到 8V，汽车电池常常工作电压在 9-16V，部分要求 6-16V。当汽车电池本身电压较低时，下电比较 3.3V/3.9V/5V 的电源轨更容易出现反向电流。当前案例中摄像头的负载较轻，相比较板上另一颗 LM63635-Q1 的 3.9V 负载较轻，较容易进入 PFM Mode，因此出现反向电流击穿的概率进一步增加。

7 数据验证

由于该案例在设计中并未在 SYNC/MODE 上下拉设计，因此无法直接修改 SYNC/MODE 为上拉 VCC 来修改至 FPWM 模式来避免芯片长时间处于 PFM，存在反向电流的风险，因此只能使用折中的方案，在输出添加假负载，如图 7-1 所示。

通过假负载的设计，让芯片尽可能的避免工作在较低频率的 PFM 模式下，但是假负载会持续的带来损耗，会明显的影响效率，并且同时由于芯片的个体差异，不同的芯片电流检测精度的差异，并不能完全避免芯片工作在 400k 以上的工作频率，仍然存在工作在低频的状态。

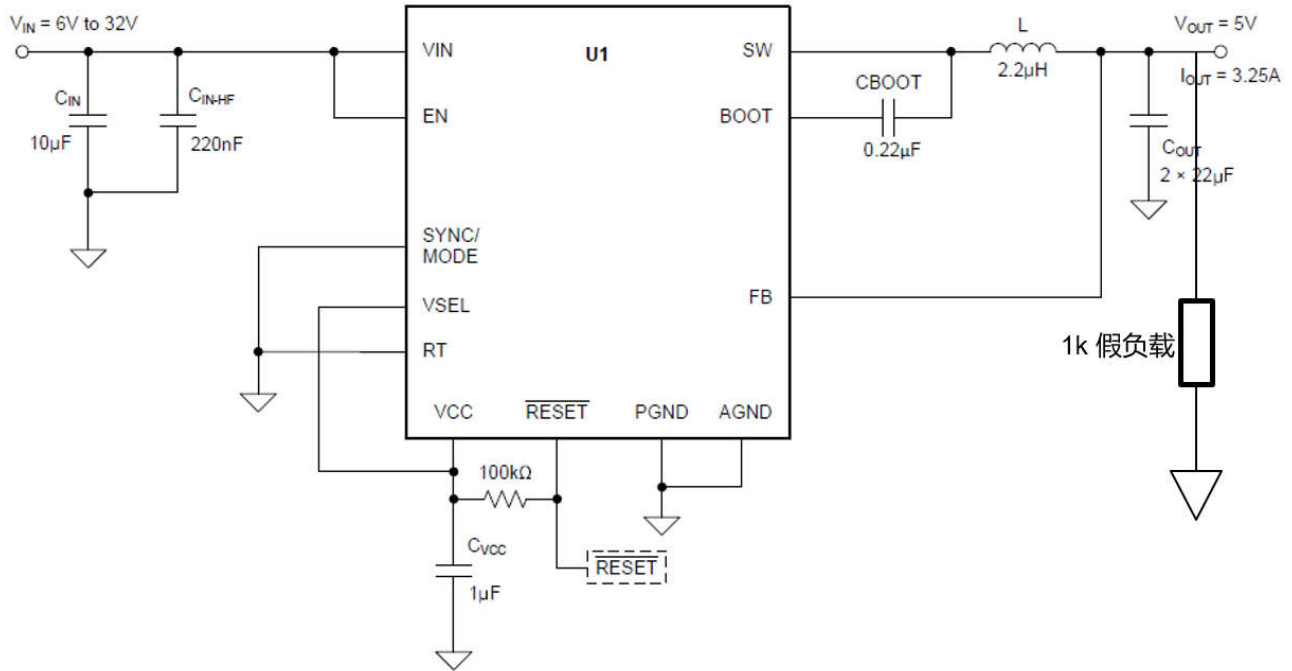


图 8-1. 示例应用电路 $V_{IN} = 12V$ 、 $V_{OUT} = 5V$ 、 $I_{OUT} = 3.25A$ 、 $f_{SW} = 2.1MHz$

图 7-1. 增加假负载

通过后续的持续验证关于该场景下的失效数据对比如下：

未导入假负载失效率（量产 2 年）： $622/72089 * 1000000 = 8628ppm$

导入假负载方案后失效率（导入半年内）： $3/7640 * 1000000 = 392ppm$

同时结合 TI 大范围的出货及应用调研数据发现，工作在 FPWM 模式下的产品失效率远远低于 AUTO 模式。因此，可以得出结论，该案例的 EOS 失效源自于反向电流的给下管 MOSFET 造成了应力性的损坏，从而导致了下次开关动作时的直通。

8 设计建议

通过理论上的分析，EVM 的验证，客户应用的验证，以及大范围的数据支撑，我们寻找到了该问题的 Root Cause，而针对当前已知的可能存在风险的应用场景，有如下设计建议：

1. VCC 的外围不接任何外部电路，使用优质 (X7R) 1uF 电容，布局尽可能的靠近 Pin 脚设计；
2. 针对大于 5V 的输出应用时，设计原理图时，尽量使用 FPWM 模式或者在 SYNC/MODE pin 同时预留 VCC 上拉或者下拉 AGND 设计，使用 0Ω 进行选择；
3. TI 目前为了帮助客户避免在 POC 应用设计中遇到的风险，针对 LM636x5-Q1 产品已经做了优化设计，具体修改细节、生效批次请联系对应的 TI 支持团队了解细节。

9 小结

LM636XX-Q1 作为当前全球范围应用最广泛的一级 BUCK 产品之一，产品优异的性能和极高的性价比给汽车用户带来了良好的体验。同时，由于 BUCK 拓扑本身带来的一些潜在风险，TI 也做出了很多优化，持续更新优化，保证产品的可靠性。除此之外，本文以一个 EOS 的失效分析案例来深挖 EOS 背后的根因，推动了芯片的优化更新，适配更多的应用场景，增加了芯片的鲁棒性。

10 参考文献：

1. 数据表"LM63635-Q1 3.5V 至 36V、3.25A、汽车级降压转换器"
2. User Guide" LM63635EVM EVM User's Guide"
3. Application Report" Methods to Eliminate Damage Caused by Reverse Current in Synchronous Buck Converters"
4. Application Note" 关于降压转换器中自举电阻器的设计注意事项"
5. Application Report" AN-1229 SIMPLE SWITCHER® PCB Layout Guidelines"

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、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