

汽车反向电池保护设计中的 TVS-less

Abhijeet Godbole
Systems Engineer
Texas Instruments

Dilip Jain
Systems Manager
Texas Instruments

引言

汽车电池连接多个负载，包括电子控制单元 (ECU)、继电器和电机。一些系统级事件（例如打开或关闭电感负载）会导致电池电源线路上产生电压瞬变。所有反极性保护电路都必须保护下游电子负载免受这些系统级瞬态事件的影响。

理想二极管反向电池保护系统通常包括一个理想二极管控制器、一个 N 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET)，以及一个用于钳制瞬态事件的输入侧瞬态电压抑制 (TVS) 二极管。然而，该 TVS 二极管占用了高达 70% 的解决方案空间，这在设计密集型 ECU（如汽车驾驶辅助系统 (ADAS) 摄像头、USB 集线器和显示 ECU）方面提出了挑战。去掉输入侧 TVS 可节省系统成本，减小解决方案尺寸，并提高系统可靠性。

本文介绍了使用理想二极管控制器的无 TVS 反向电池保护系统设计，并根据国际标准化组织 (ISO) 7637-2 和 16750-2 以及原始设备制造商 (OEM) 标准（如德国汽车制造商的 VW8000 (LV124)）分析了该系统架构的保护和电磁兼容性 (EMC)。

使用理想二极管控制器实现汽车反向电池保护

驱动 N 沟道 MOSFET 的理想二极管控制器是一种低损耗反极性保护解决方案，可替代基于功率二极管和 P 沟道 MOSFET 的传统解决方案。除了针对输入极性反转提供保护外，输入保护解决方案还应保护下游电子电路免受各种系统级瞬态事件的影响。ISO 7637-2、VW 80000 (LV124) 和 ISO 16750-2 等汽车标准定义了此类系统级瞬态事件。

典型的应用电路包括一个驱动 N 沟道 MOSFET 的理想二极管控制器和一个用于抑制各种汽车 EMC 瞬态的输入侧 TVS 二极管。输入侧 TVS 二极管的主要用途是防止因电源与电感负载断开而产生 ISO7637-2 脉冲 1 瞬态事件所描述的汽车高能量负瞬态。如图 1 所示，当通过电感负载的电流中断时，会发生电压瞬变。根据 ISO7637-2 标准，该瞬态事件通常持续 2ms (t_d)，幅度 (U_S) 范围为 -75V 至 -150V。两个连续脉冲之间的总持续时间为 200ms (t_2)。还有由 ISO 7637-2 标准定义的其他低能量短时瞬态事件，例如由线束电感突然切换和电流中断引起的脉冲 2A、3A、3B。理想二极管保护电路中使用的输入和输出电容器可滤除这些短时瞬态，不会影响整体系统性能。

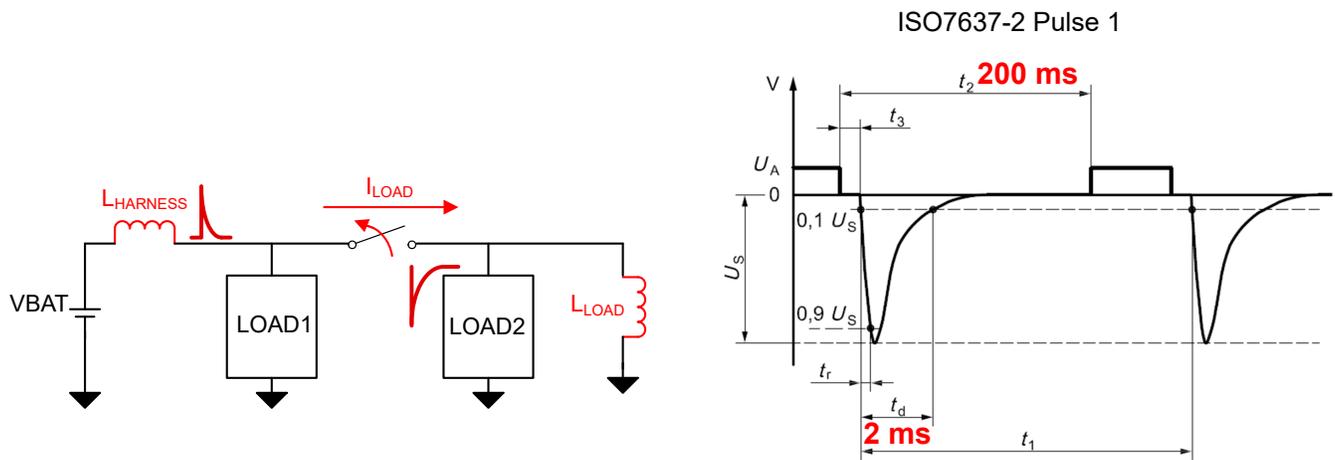
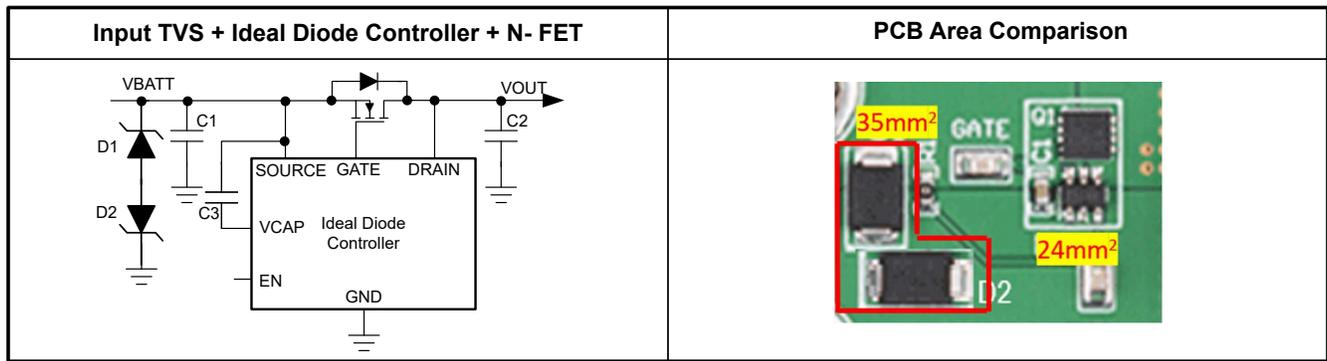


图 1. ISO 7637-2 脉冲 1 特性。

大多数车辆都有一个集中式负载突降钳位，可在负载突降事件期间，将 12V 电池驱动车辆的最大瞬态电压钳位到 35V。但是需要保护电子电路，以免在关闭电感负载时出现负瞬态。输入侧 TVS 二极管将这些瞬态钳位在更安全的范围内，这样电子电路就可以继续运行而不会出现任何损坏。

图 2 显示了一个实现理想二极管反极性保护解决方案的典型印刷电路板 (PCB)，以及输入 TVS 二极管对总解决方案尺寸的贡献。对于空间受限的 ECU 设计（如 ADAS 摄像头、雷达和激光雷达 ECU 以及 USB 集线器），去掉输入侧 TVS 二极管并同时确保可靠的系统级 EMC 性能可带来诸多好处。去掉输入侧 TVS 二极管也提高了整体可靠性，因为电池和地线之间不再需要分流元件。



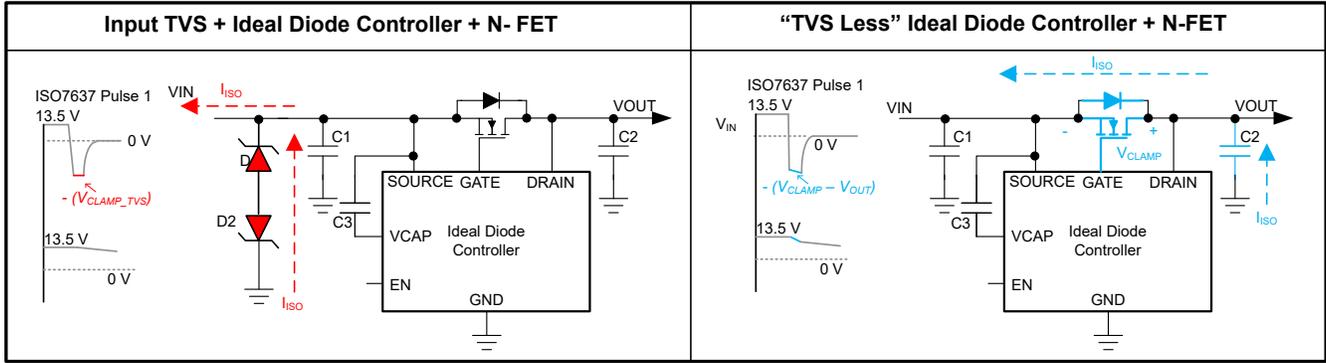
- 与传统的功率二极管和 P 沟道 MOSFET 解决方案相比，在较高电流电平下具有尺寸、成本和效率优势
- 可靠的系统级 EMC 性能
- 瞬态电压抑制所需的 2 个输入 TVS 二极管
 - D1: 主要作用是在正常运行时阻断来自 D2 的正向电流
 - D2: 主要作用是抑制负瞬态 ISO7637-2 脉冲 1
- 理想二极管控制器 + N 沟道 MOSFET 的面积: 24mm²
- 2 个输入 TVS 二极管 (D1 和 D2) 的面积: 35mm²
- TVS 约占理想二极管系统解决方案总面积的 70%
- TVS 额外增加了系统成本和 BoM 数目
- 去掉 TVS 可以提高系统的可靠性, 因为去掉了 VBATT 终端上的分流元件

图2. 典型的理想二极管应用电路和 PCB 面积比较。

使用理想二极管控制器实现无 TVS 汽车反极性保护

TI 的 LM74701-Q1 和 LM74721-Q1 理想二极管控制器集成了一种独特功能, 可实现无 TVS 的输入反极性保护解决方案。该器件运行一个外部 MOSFET 作为有源钳位元件, 以耗散 ISO 7637-2 脉冲 1 所述负瞬态事件产生的能量。在 ISO 7637-2 脉冲 1 瞬态事件期间, 在没有要求保持输出电压的情况下, 这些器件通过监测外部 MOSFET 漏源 (VDS) 引脚上的压降并启用栅极驱动, 将外部 FET 两端的电压稳定至预定义阈值。反向电流从输出电容器流回输入源, 瞬态脉冲能量通过 MOSFET 耗散。

图 3 所示为标准理想二极管与无 TVS 理想二极管解决方案在 ISO 7637-2 脉冲 1 运行方面的差异。



- 输入 TVS 二极管 D2 将 ISO7637-2 脉冲 1 钳位并耗散脉冲能量
- 峰值 ISO7637 脉冲电流从 TVS 二极管流出，如红色箭头所示
- 外部 FET 用作有源钳位元件并耗散 ISO7637-2 脉冲 1 能量
- 反向电流从输出电容器、FET 流回输入源
- 输入被钳位于 $-(V_{CLAMP} - V_{OUT})$

图3. 有/无 TVS 时的 ISO 7637-2 脉冲 1 比较。

无 TVS 理想二极管：运行模式和工作原理

在 VDS 钳位运行期间，电流从输出电容器传导回输入源。ISO 7637-2 脉冲 1 瞬态事件期间此运行是可接受的。在该事件中，鉴于掉电持续时间长达 200ms，不强制要求保持输出电压。但是，反向电流保护是系统测试所需的一项关

键功能，在测试中，电源中断持续的时间很短，例如输入微短路 (LV124-E10) 以及在交流叠加测试期间 (LV124-E06)。在这些测试期间 VDS 钳位运行不应干预进来，以确保实现反向电流保护。

图 4 是一张流程图，可帮助您确定 VDS 钳位阈值，从而确保各种测试条件下的 EMC 性能。

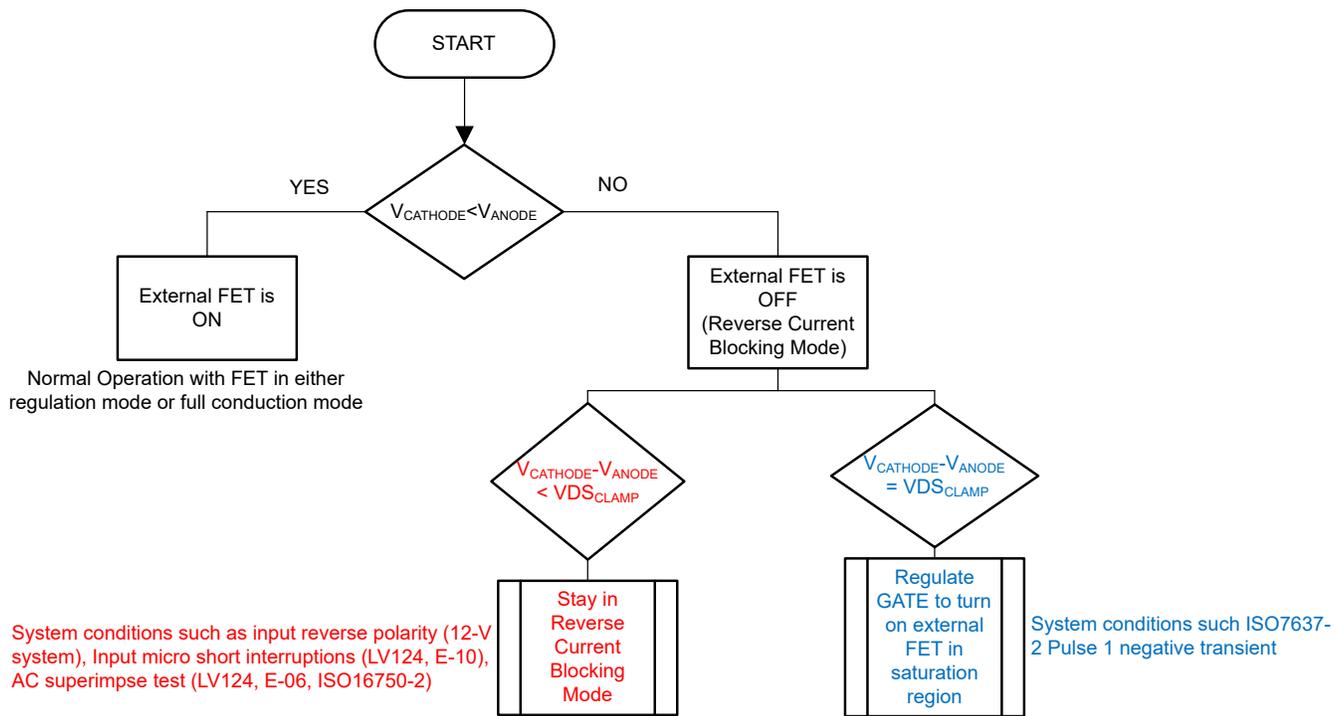


图4. 无 TVS 理想二极管控制器运行算法。

对于无 TVS 理想二极管控制器，当输入电压低于输出电压但未达到 VDS 钳位阈值时，理想二极管控制器保持反向电流阻断模式，且外部 FET 保持关闭状态，以确保输出电压不会从其标称值下降太多。这种运行模式更适用于要求保持输出电压的系统级 EMC 测试，例如输入微短路中断（LV124-E10、ISO 16750-2）。当输出和输入之间的电压

差超过 VDS 钳位阈值（例如在 ISO 7637-2 脉冲 1 瞬态事件的情况下）时，理想二极管控制器将启用栅极驱动，外部 FET 将在饱和区域内运行，充当电流源。输出电容器向输入源提供反向能量，输出电压从其标称值下降。图 5 所示为在 ISO 7637-2 脉冲 1 瞬态事件期间理想二极管控制器无 TVS 运行的等效电路。

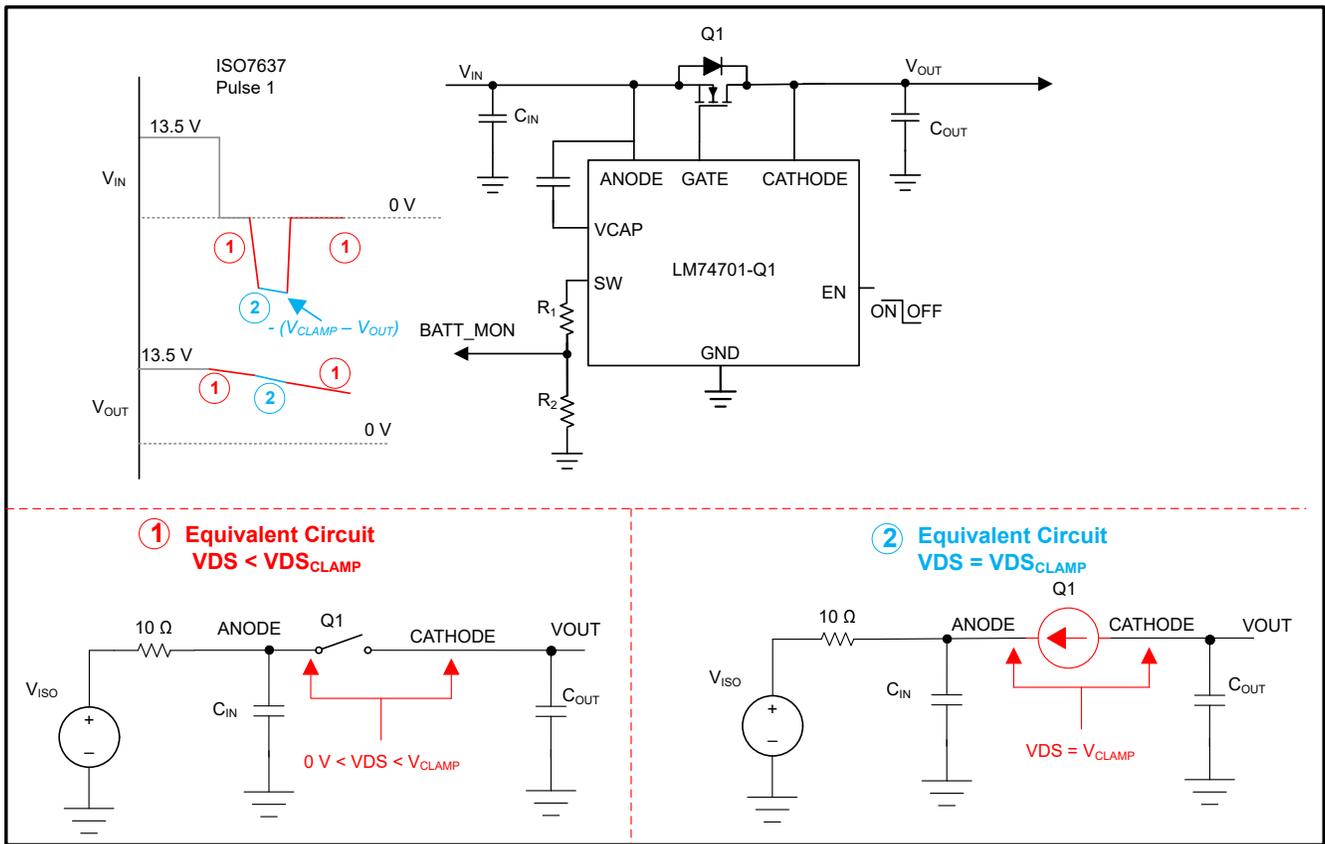


图5. ISO 7637-2 脉冲1 瞬态事件期间的无 TVS 理想二极管等效电路。

外部 MOSFET 和输出电容器 (C_{OUT}) 讨论了选择外部元件时的注意事项。

外部 MOSFET

外部 MOSFET 需要在功耗、系统级性能（例如反向电流阻断）和解决方案成本之间达到最佳平衡。为此，可以先选择一个通常在满负载电流下提供 30mV 至 50mV 正向压降的 MOSFET。

另一个重要参数是 MOSFET 的最大 VDS 额定电压。在 ISO 7637-2 脉冲 1 瞬态事件期间，外部 MOSFET Q1 的最大 VDS 是理想二极管控制器的 VDS_{CLAMP}（最大值）检测阈值。方程式 1 计算 ISO 7637-2 脉冲 1 瞬态事件期间流经 MOSFET 的峰值电流：

$$I_{ISO_PEAK} = \frac{(V_{ISO} + V_{OUT} - V_{DS_CLAMP(max)})}{R_S} \quad (1)$$

其中：

V_{ISO} 是 ISO 7637-2 脉冲 1 瞬态事件的负峰值，

V_{OUT} 是应用 ISO 7637-2 脉冲 1 之前的 VBATT 初始电平，

VDS_{CLAMP} 是理想二极管控制器的最大 V_{CLAMP} 阈值，

R_S 是 ISO 7637-2 脉冲发生器输入阻抗 (10Ω)。

图 6 显示了 LM74701-Q1 在 ISO 7637-2 脉冲 1 瞬态事件期间的无 TVS 性能，以及 VDS 钳位运行期间的栅极导通行为、峰值脉冲电流和 MOSFET 上的功率耗散。

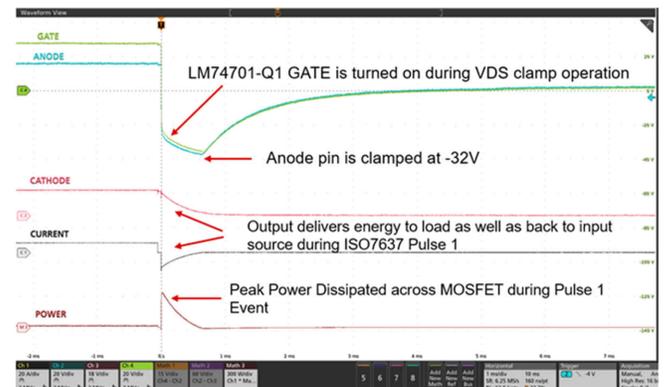


图6. LM74701-Q1 理想二极管控制器的无 TVS 性能。

ISO 7637-2 脉冲期间的平均电流可近似为峰值电流的三分之一，或 ($I_{ISO_PEAK}/3$)。所以，可根据 **方程式 2** 计算外部 MOSFET 上的平均功率耗散：

$$P_{D_ISO_AVG} = \frac{V_{DS_CLAMP(max)} \times I_{ISO_PEAK}}{3} \quad (2)$$

一个 ISO 7637-2 脉冲 1 瞬态事件通常持续 2ms，外部 MOSFET 在有源钳位模式下运行约 1ms。建议选择一个具有以下安全工作区 (SoA) 特性的 MOSFET：负载线对应于 V_{DS_CLAMP} （最大值）的 VDS 且漏极电流 (ID) 在 1ms 内大于 ($I_{ISO_PEAK}/2$)。

图 7 所示为典型的 SoA 特性和 MOSFET 的选择标准示例。

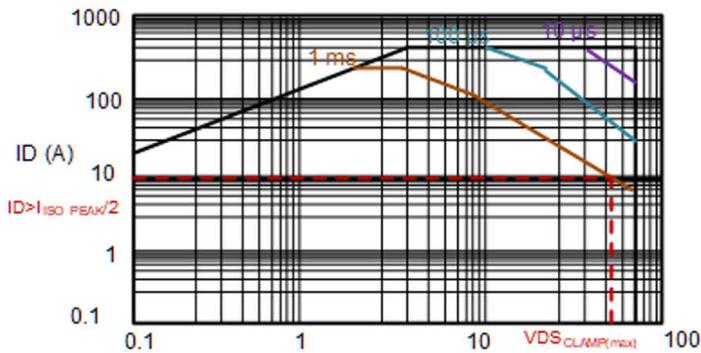


图 7. MOSFET SoA 选择曲线示例。

输出电容器 (C_{OUT})

使用无 TVS 的理想二极管控制器时在 ISO7637-2 脉冲 1 事件期间，电流从输出电容器流回输入源，从而使输出电压放电。如果输出电容器不足以将电压保持在 0V 以上，则输出电压可能为负摆幅。理想二极管控制器（如 LM74701-Q1）能够处理输出端（阴极引脚）上的负电压，并能与较低的输出电容器一同工作。但如果连接在理想二极管控制器输出端的负载（如直流/直流转换器、音频

放大器和稳压器）无法处理负输入电压，您必须调整输出电容器的量程，以使 ISO 7637-2 脉冲 1 瞬态事件期间的输出电压不低于 0V。

方程式 3 计算 ISO 7637-2 脉冲 1 事件期间所需的最小输出电容，确保输出不会出现负摆幅：

$$C_{OUT} = \frac{(I_{LOAD} + I_{ISO_AVG}) \times 1ms}{\Delta V_{OUT}} \quad (3)$$

其中， ΔV_{OUT} 是 ISO 7637-2 脉冲 1 瞬态事件开始和结束时 V_{OUT} 之间的差值。

无 TVS 理想二极管控制器 EMC 性能

图 8 说明了 LM74701-Q1 在以下情况下的系统级性能：

- 输入微短路中断（LV124-E10 测试）和交流叠加频率（LV124-E06），需要反向电流阻断功能来保持输出电压。理想二极管控制器不会干预 VDS 钳位的运行。
- ISO 7637-2 脉冲 1 瞬态事件（-100V 瞬态），其中理想二极管控制器干预 VDS 钳位的运行，并且 MOSFET 上的能量耗散可实现无 TVS 运行。
- ISO 7637-2 脉冲 2A 和 2B 瞬态事件。
- ISO 16750-2 脉冲 5B 抑制负载突降事件（抑制负载突降为 35V）。
- ISO 7637-2 脉冲 3A 和 3B，由输入和输出电容器进行滤波的短时瞬态事件，不会影响器件性能和输出电压电平。

某些汽车 ECU 设计由始终处于通电状态的负载组成，在有效运行期间要求整体系统具有低静态电流。对于常开型系统的无 TVS 输入反极性保护，LM74721-Q1 理想二极管控制器具有 25 μ A 的典型工作静态电流。

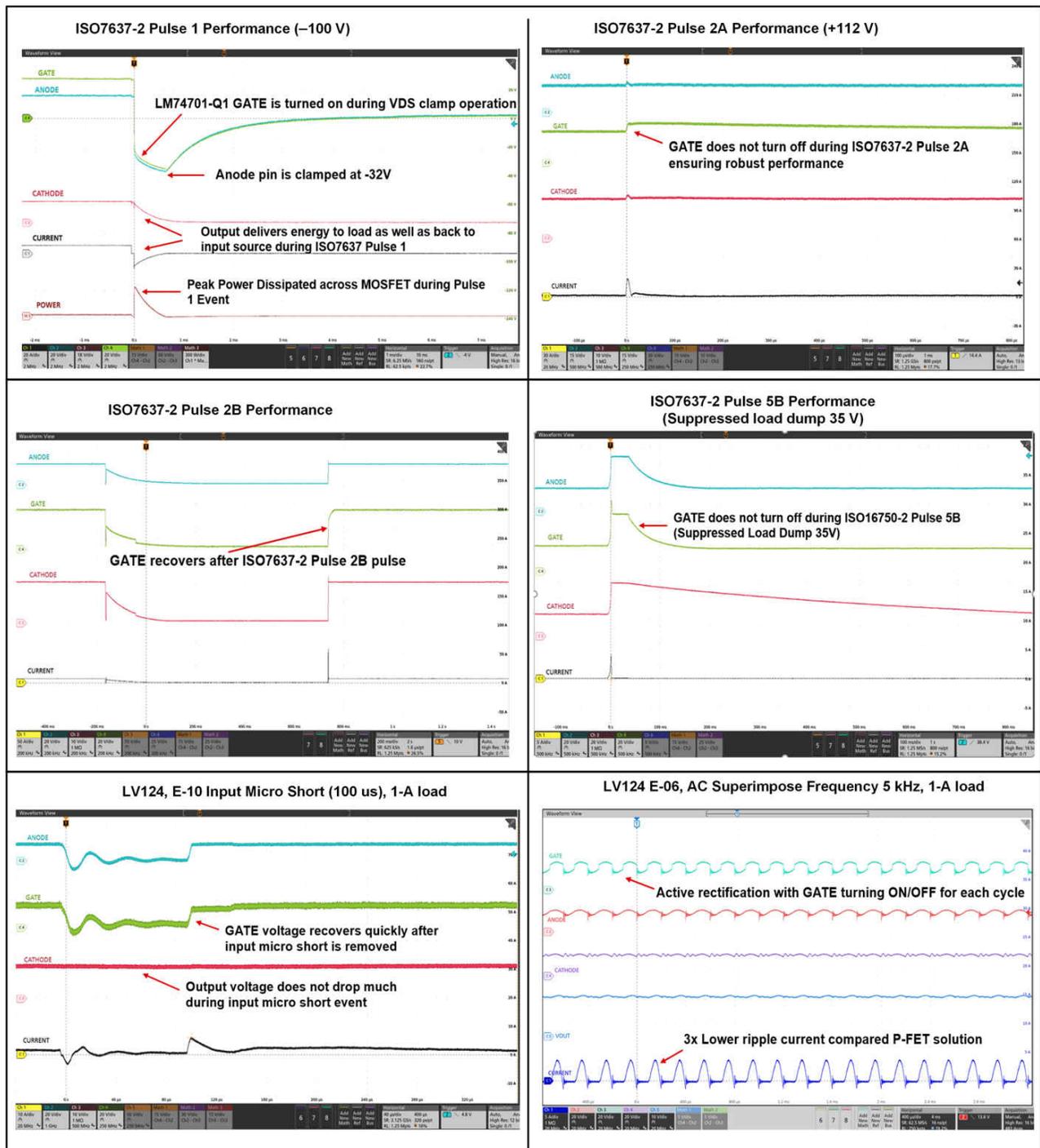


图8. 无TVS 理想二极管控制器系统级EMC 性能。

结论

处理能力的提高和电子系统尺寸的小型化增加了对高效率和高功率密度设计的需求。这让系统设计人员面临新的挑战，尤其在汽车前端电源系统方面。前端反向电池保护系统直接影响总体系统设计的可靠性。具有集成式VDS 钳位的理想二极

管控制器可实现输入侧无 TVS 的汽车反极性保护解决方案，从而降低了系统成本，将解决方案尺寸缩小了 70%，并提高了系统可靠性。

相关网站

- [LM74701-Q1](#)
- [LM74721-Q1](#)

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

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