

级联理想二极管：解决 48V EV 的电源难题

Shiven Dhir

Applications Engineer
Input Power Protection and Distribution

Rakesh Panguloori

Applications Manager
Input Power Protection and Distribution

除了传统的 12V 网络外，48V 电池子系统的应用日益广泛，这导致 HEV/EV 电源系统的设计发生显著变化。48V 系统可以提供更大的功率，无需大量的布线，可降低线束的功率损耗，从而延长续航里程。随着这一变化，车辆配电架构正在从传统的集中架构过渡到区域架构。在区域架构中，配电、通信和负载驱动根据在车辆中所处的位置而不是按功能分组，如图 1 所示。区域架构可降低系统复杂性，并为原始设备制造商 (OEM) 提供更多模块化特性。

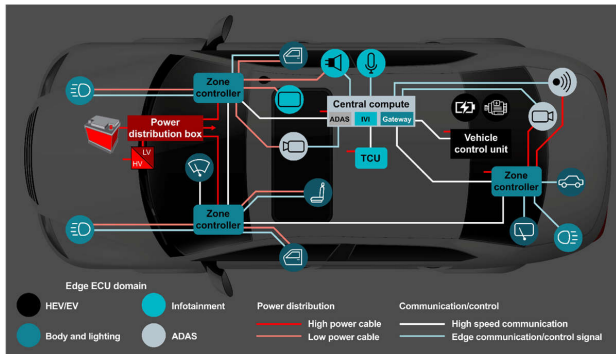


图 1. 现代车辆中的区域架构

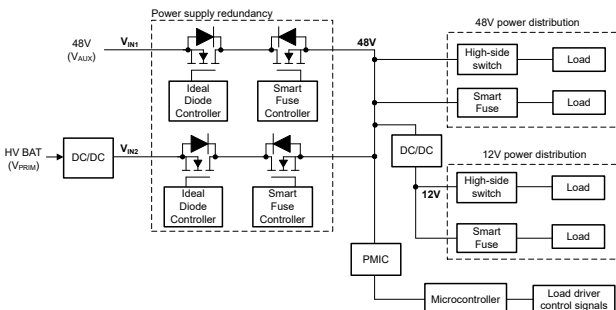


图 2. 区域控制模块中的典型配电

图 2 显示了一种典型的配电方式，即使用多个电源为区域控制模块实现冗余电源。理想二极管（详见白皮书《[理想二极管基础](#)》）非常适用于需要反向电流阻断和/或反向极性的应用。由于理想二极管具备反向电流保护功能，因此在需要组合多电源以提升系统冗余度 [2] 的应用中也很有用。但是，市场上现有理想二极管控制器的绝对最大电压额定值仅为 72V，并且在支持某些 48V 系统设计方面存在限制。

本文讨论了为 48V 系统设计 ORing 级所面临的挑战，以及级联理想二极管配置如何实现可靠的 ORing 解决方案来安全地处理输入电源中断和外部瞬态事件。

挑战 1：反向电源故障期间的高压应力

如图 2 所示，初级配电需要不间断的电力供应。高压电池 (VPRIM) 由 DC/DC 转换器针对 48V 电压轨进行降压，然后备用 48V 辅助电源 (VAUX) 在“或”运算时提供冗余电源。如果 VIN1 发生反极性故障，DC/DC 转换器输出 VIN2 将为整个负载供电，如简化示意图 3 所示。但是，这会导致辅助电源路径上的 ORing 产生高压应力。48V 电源最高可达 54V 电压，在控制器 [LM74700D-Q1](#) 的阴极至阳极引脚之间产生 108V 的大电压差，这超过了 75V 的绝对最大额定值。该解决方案还需要额定电压至少为 120V 的 MOSFET，这些 MOSFET 比 60V FET 的价格高，并且很难从多个供应商处采购。

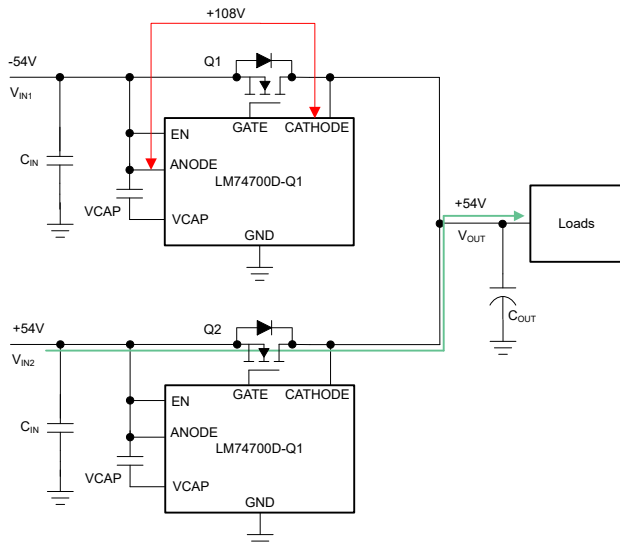


图3. 输入反极性条件下的电压应力

挑战 2: 符合 LV148 负载突降和开关瞬态要求

由于关断负载和加速器尖端短路，电气系统可能会发生瞬态过压。对于 48V 系统，现行标准（ISO 21780 和 Liefervorschriften [LV] 148）规定了 E48-02 瞬态过压曲线，如图 4 所示。此曲线显示，电压最高可达 70V 并保持 40ms，某些 OEM 甚至达到 100ms。受测器件 (DUT) 必须能够承受这些功能状态为 A 的事件，且 DUT 必须执行所有功能。请注意，对于如此高的功率和更宽的瞬态，使用 TVS 或齐纳二极管进行钳位的做法不切实际。简单地说，直接连接到 48V 电压轨的集成电路在所有条件下都必须能够承受 70V 的电压。但是，如果考虑到开关瞬态或元件裕量，器件应支持远高于 70V 的电压。现有的理想二极管控制器在阳极到接地之间具有 72V 的绝对最大额定值，因此为系统设计人员留的裕度较小。

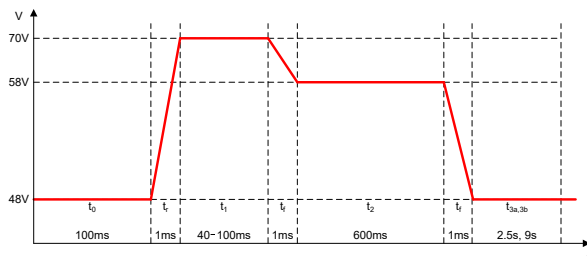


图4. LV 148 的 E48-02 瞬态过压曲线

基于单一控制器的解决方案

图 5 显示了一个使用单个 LM74700D-Q1 的解决方案，但使用齐纳钳位电路可降低控制器阴极到阳极引脚之间 108V 的大电压差。齐纳二极管 DZ 可以将阴极到阳极之间的电压限制在其绝对最大额定值 (75V) 以下，而电阻器 RZ 可以适当偏置 DZ。但是，该解决方案仍需要额定电压至少为 120V 的 MOSFET，这比 60V FET 的价格高，并且很难从多个供应商处采购。此外，在正常运行时，电阻器 RZ 会导致阴极路径额外下降，从而影响反向电流保护阈值。

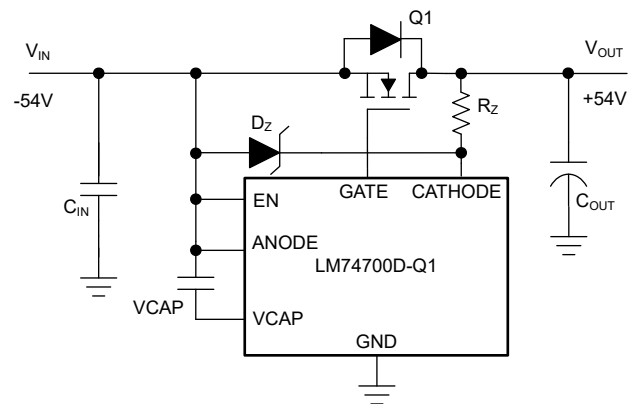


图5. 采用单个高电压 MOSFET 的解决方案

建议的级联理想二极管配置

建议的解决方案使用两个理想二极管控制器，并分别以串联配置连接 MOSFET Q1 和 Q2，如图 6 所示。每个控制器的钳位电路不仅可确保阴极至阳极低于 75V，还起到了均衡网络的作用，从而确保在发生故障事件期间，Q1 和 Q2 之间共享相等的电压。我们来考虑两种常见故障场景下的电路工作原理

情况 1: 启动期间，当输出 (VOUT) 的供电电压为 54V 且输入 VIN 为 0V 时，中点电压 VMID 保持在 0V。由于出现 VOUT > VMID 且 Q2 阻断 54V 的反向电流阻断场景，第二个 LM74700D-Q1 控制器会使 GATE2 保持关断状态。在这种情况下，用户可在 VIN 处施加 54V 的反向电压，由于出现阳极 < 0V 且 Q1 阻断 54V 的反极性场景，第一个 LM74700D-Q1 控制器会使 GATE1 保持关断状态。

情况 2: 在此场景中，VIN 以故障状态（例如 -54V）启动，然后系统在 VOUT = 54V 的情况下上电。由于第一个 LM74700D-Q1 控制器会使 GATE1 保持关断状态以阻止

VMID 处的反向电压，因此中点电压 VMID 保持在 0V。同样，第二个 **LM74700D-Q1** 控制器会因反向电流阻断情况而使 GATE2 保持关断状态。MOSFET Q1 和 Q2 都会产生 54V 的电压应力。在故障情况下，MOSFET 两端的电压都低于 60V，因此该解决方案让客户可以灵活地选择额定电压为 60V 且易于从多个供应商处采购的传统 FET。

如图 6 所示，该解决方案还在接地路径中包含一个瞬态钳位网络（DC、Q3、RB 和 DB），以处理超出 LM74700D-Q1 绝对最大额定值的开关瞬态电压。在正常运行时，器件接地端和系统接地端之间的电势差只是 Q3 的 VBE，但只要 VIN 超过二极管 DC 的击穿电压 (VBR-DC)，晶体管 Q3 便会在其两端降低电压并将器件接地电势升高。这有助于将 **LM74700D-Q1** 的阳极至接地电压限制为接近直流击穿电压，从而有助于实现可扩展的瞬态处理解决方案。二极管 DB 的作用是在输入电源反向条件下阻断反向电流路径。

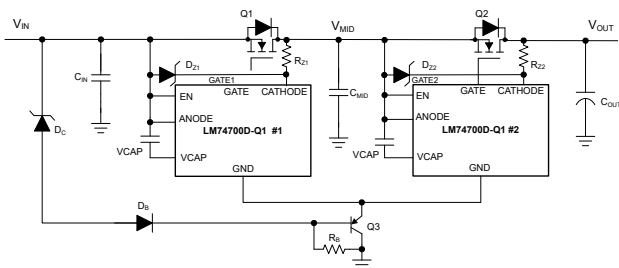


图 6. 级联理想二极管配置

元件选择和测试结果

务必要考虑如何选择系统中的关键元件来达到这些效果。

对于理想二极管 MOSFET Q1 和 Q2，具有 $\pm 20V$ VGS(MAX) 的 60V VDS(MAX) 可在所有故障条件下提供足够的裕度。标称电流下的 R_{DS_ON} ：（20mV/标称电流） $\leq R_{DS_ON} \leq$ （50mV/标称电流）对于保持较低的反向电流十分重要。例如，在 5A 设计中， R_{DS_ON} 的范围在 4m Ω 到 12.5m Ω 之间。

MOSFET 栅极阈值电压 Vth 的最大值为 2V。

PNP 晶体管 Q3 会在齐纳二极管 DC 激活后出现最大压降，并且其额定电压应大于 (VIN-MAX - VBR-DC)。它还必须支持 LM74700D-Q1 的静态电流（小于 1mA）。可以使用 BC857-Q 等晶体管。

对于齐纳二极管 **DZ1** 和 **DZ2**：应选择 BZX84J-B62 等 62V 齐纳二极管，以便将阴极限制为低于 75V 的阳极。对于齐纳二极管 **DC**，直流电路的击穿电压 (VBR-DC) 决定了 VIN 上出现开关瞬态时，阳极至接地引脚之间的钳位电压。利用 BZX84J-B62 等 62V 齐纳二极管可以限制电压并为 LM74700D-Q1 提供足够的裕度。阻断二极管 **DB** 的阻断电压应接近最大输入电源反向电压，因此应选择额定电压至少为 60V 的二极管，例如 NSR0170P2T5G。

电阻器 **RZ1** 和 **RZ2** 是适用于 DZ1 和 DZ2 的偏置电阻器。1k Ω 到 2k Ω 范围内的任何值都应该足够了。电阻器 **RB** 是直流电的偏置电阻器，10k Ω 到 47k Ω 范围内的任何值都足以满足要求。

图 7 和图 8 展示了在系统启动前后施加输入反极性时，MOSFET 上的漏源电压分布情况。如图所示，MOSFET 共享相同的电压，每个 MOSFET 的最大电压小于 60V。图 9 显示了接地路径瞬态钳位网络的性能，其中阳极至 IC 接地钳位至 62V，以应对 VIN 上发生的 70V 负载突降事件。

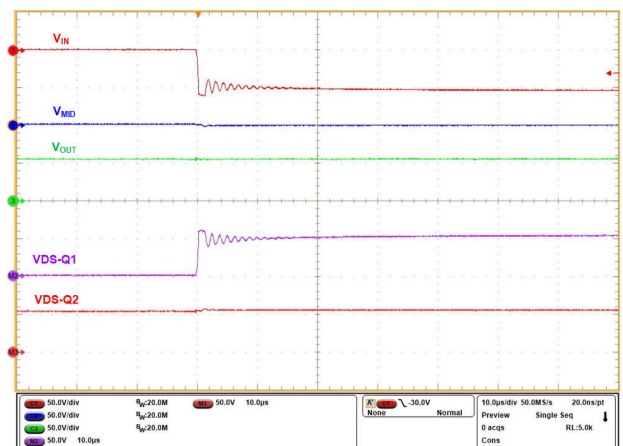


图 7. MOSFET 在输入反极性条件下的电压共享情况

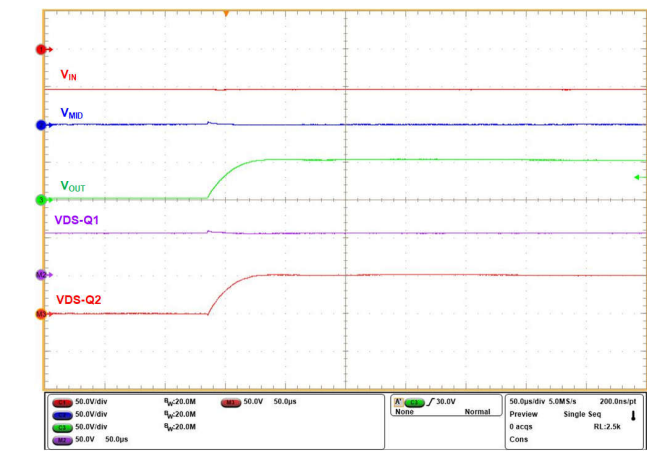


图 8. MOSFET 在输出端热插拔期间的电压共享情况 (VIN = -54V)

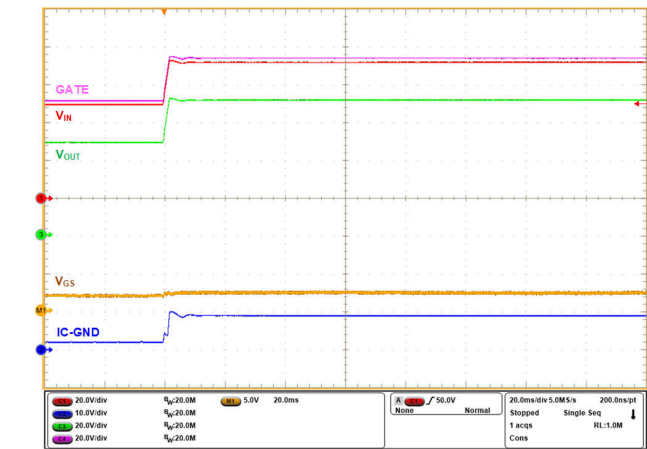


图 9. 建议解决方案对 70V 负载突降事件的响应

结语

虽然 48V 系统具有许多优点，但也为配电级中的冗余电源 ORing 带来了一系列新的挑战。建议的级联理想二极管配置带接地路径瞬态钳位网络，使采用 60V 额定电压且易于从多个供应商处采购的传统 FET 的系统设计成为可能。建议的方法还为开关瞬态提供了足够的电压裕度，从而在 48V 系统中实现可靠的 ORing 解决方案。

参考资料

1. “理想二极管基础知识”德州仪器 (TI) 应用报告，文献编号 SLVAE57B，2021 年 2 月。
2. “使用理想二极管控制器的汽车应用冗余电源拓扑”德州仪器 (TI) 模拟设计期刊，文献编号 SLYT848，2024 年 3 月。
3. 德州仪器 (TI)，**LM74700D-Q1 车用低 IQ 反向电池保护理想二极管控制器**，数据表。

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 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月