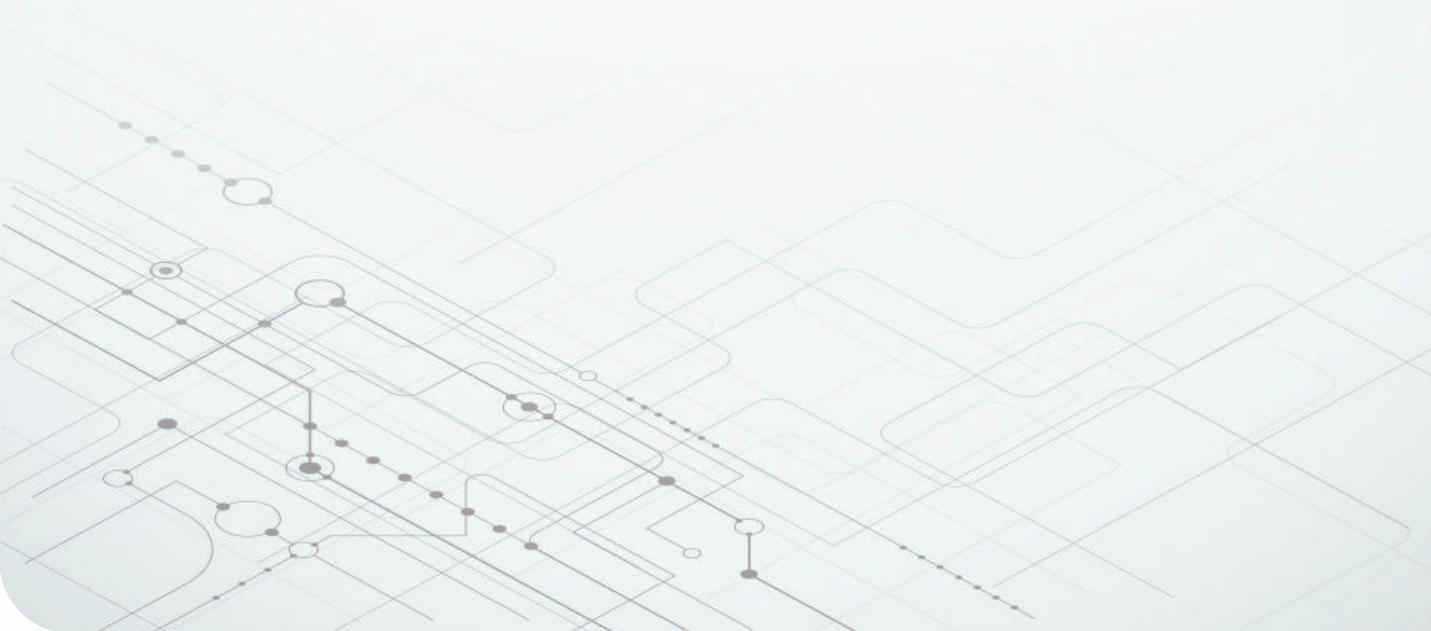


更智能的配电：塑造汽车技术的未来



David Martinez
Systems engineer



本白皮书讨论了区域架构、48V 系统以及其他趋势如何推动车辆实现更智能、更安全、更优化的配电。

内容概览

- 1

为什么配电正在发生变化？
了解电源变化、区域架构、48V 低压母线和安全需求如何推动汽车配电的变革
- 2

配电架构的演进
阅读汽车架构变化如何引发对优化布线和提升软件控制的需求。
- 3

配电模块内部结构
学习配电模块的设计方法及各种设计考量

简介

随着车辆配电架构和电子控制单元 (ECU) 的不断发展，通过引入智能半导体解决方案，实现了更安全、更可靠、更高效的配电。随着车辆不断向自动驾驶和电动动力系统发展，新的法规也在出台，以确保在故障情况下配电的安全与可靠。

本白皮书将介绍政府法规、区域架构、48V 系统以及以安全为核心的电源设计如何共同推动配电架构的变革，同时探讨这些架构目前面临的挑战与考量。

为什么配电正在发生变化？

随着新法规使销售铅酸电池汽车（尤其是在欧盟）变得更加困难，汽车原始设备制造商 (OEM)正在逐步放弃传统的铅酸电池。尽管铅酸电池比锂离子电池更便宜且更易生产，但其寿命更短，对环境的危害也更大。这些政府法规以及电动汽车的普及促使 OEM 采用不同的输入电源，如锂离子电池、DC/DC 转换器和超级电容器，如 图 1 中所示。

Input source combinations

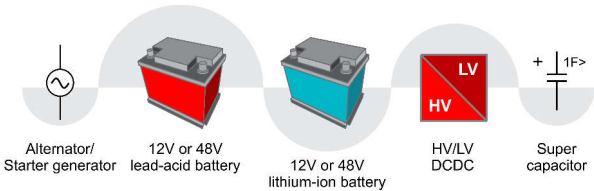


图 1. 对各种车辆电源的对比。

向锂电池、超级电容器或两者结合的过渡，需要额外的电路来防止过充。为这些电源充电的电路需要专用的高压到低压 DC/DC 充电电路，并使用智能电源开关来分配和监控充电电压和电流。随着纯电动汽车 (BEV) 和混合动力汽车 (HEV) 的出现，利用配电电路在车辆关闭或行驶过程中为电池充电，对于最大化续航里程尤为重要。

超级电容器是汽车输入电源的一个有趣补充。虽然它们不适合长期储能，但在需要突发模式供电的应用中表现出色，因为它们能够在短时间内能够提供比铅酸电池更多的启动循环次数（即在其能量显著下降前能提供大功率脉冲的次数）。因此，超级电容器非常适合处理如容性浪涌电流和电机启动或点火等负载瞬态。通过将电池与超级电容器结合使用，设计人员可以减轻汽车电池的压力，从而延长电池寿命。

区域架构与智能 eFuse

OEM 正在将车辆架构从域架构转向区域架构，区域架构是基于位置而非功能对电子控制进行分组的概念，如 图 2 中所示。区域架构通过减少车辆布线数量，带来了巨大的成本节约机会。

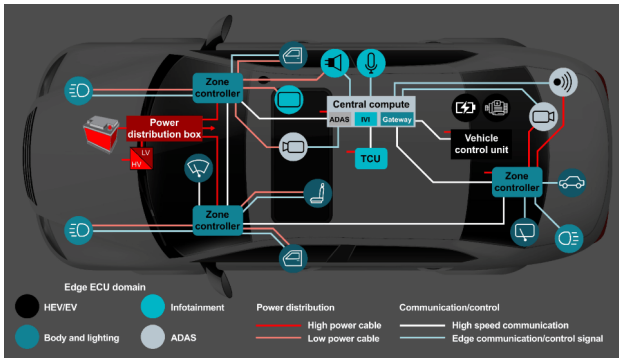


图2. 现代车辆中的区域架构。

区域架构不再从保险丝盒引出电源，而是通过配电盒 (PDB) 和区域控制模块 (ZCM) 分配电力。PDB 为车辆电源向 ZCM 和其他高功率 ECU 提供主要高电流配电。ZCM 则为附近的 ECU 和传感器提供二级配电。这种设计优化了布线，并增强了对电子功耗的控制。

ZCM 和 PDB 还使用基于半导体的开关——智能 eFuse，集成了熔断器和机械继电器的功能。通过添加可软件复位的开关，区域架构有效地消除了对可接近 PDB 的需求，因为现在软件可以单独管理每个开关，包括保护线束和故障恢复所需的算法。

区域架构还帮助 OEM 通过更好地管理车辆功耗，提高对配电系统的控制。在实际应用中，这涉及到车辆软件关闭 eFuse，从而切断杂项或未使用功能的电源，以确保安全关键功能有足够的电力运行。

将特定负载的电源关闭的概念，进一步扩展为通过 eFuse 的低功耗状态驱动始终供电 (PAAT) 负载，以最小化总功耗。即使在车辆钥匙关闭或停车状态下，PAAT 负载（如门锁）仍然通电，以确保安全关键功能的正常运行，并保持大容量电容充电。当 PAAT 功能运行时，eFuse 会退出低功耗状态，完全驱动负载并通知本地微控制器 (MCU)。eFuse 在空闲一段时间后会重新进入低功耗状态。

48V 低压母线

另一个节约成本的途径是采用高于 12V 的电源。虽然 48V 电源分配在汽车领域并不是新概念，但它可以进一步优化车辆布线、重量和成本，同时提升整车的电力分配能力。具体来说，像线控转向这样的高功率功能，在 48V 下所需的电流约为使用 12V 时负载电流的 25%。更低的负载电

流需求意味着可以降低线束线径、重量和成本，从而进一步延长 BEV 的续航里程。

更安全的配电以实现自动驾驶汽车

配电系统变化的最后一个原因，是 OEM 希望通过增强车辆智能，实现前所未有的驾驶辅助技术，从而提升车辆安全性。许多 OEM 正在努力将车辆创新推进到 SAE 2 级以上，甚至超越目前少数的 3 级车辆，以实现自动驾驶。3 级及以上配电所需的安全原则，要求采用如冗余输入电源、在某一电源失效时的智能负载管理，以及系统内故障隔离等设计实践。这些安全原则在 ISO26262 和 VDA450 标准中有详细定义。

配电架构的演进

汽车配电正在演变，因为整个汽车架构都在发生变化，这推动了线束优化和软件控制能力的提升。如图 3 所示，配电网络将车辆电源输入 PDB，配电盒再将电力分配到各个区域。每个区域再将电源本地分配给附近的 ECU、执行器或传感器。

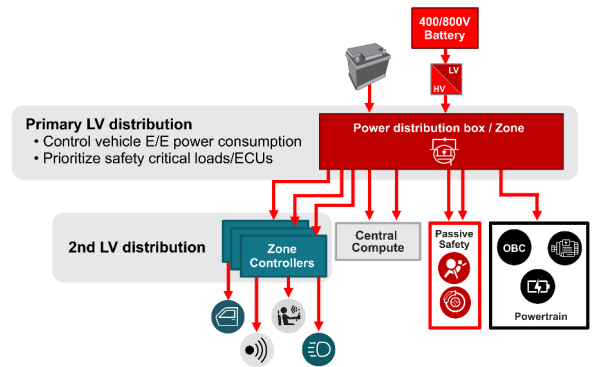


图3. 现代配电架构示意图。

图 4 展示了不同的配电架构。随着智能 eFuse 和 48V 系统的引入，OEM 正在通过用由车辆软件管理的电子保险丝盒替代由驾驶员管理的传统保险丝盒，来提升系统性能。向 48V 配电的过渡需要时间，因为并非所有负载和执行器都已准备好适应更高的电压。因此，12V 负载将在第一代 48V 系统中继续存在。随着 OEM 持续评估 48V 配电，配电架构将持续演进，未来甚至可能完全取代 12V 电源。

Power Distribution Architecture

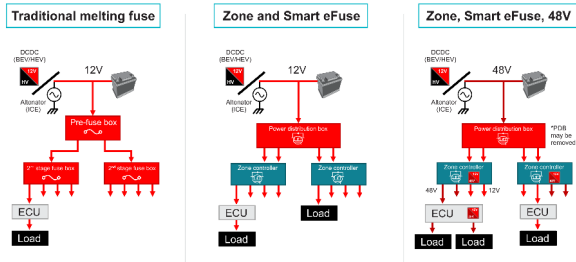


图 4. 未来配电架构对比。

48V 系统进一步推动了架构演进，使得可以采用主干架构，由 ZCM 同时分配主电源和辅助电源。如图 5 所示，可以移除 PDB。48V 架构下负载电流降低，使 ZCM 可支持更多电源输入输出，热损耗也更低。这种拓扑极大简化了配电网络。

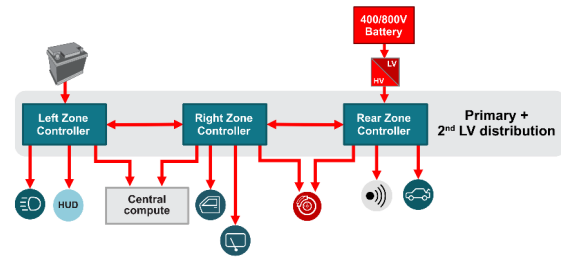


图 5. 主干配电架构示意图。

配电模块内部结构

典型的 PDB 和 ZCM 采用多种方法来实现更智能的车辆。如果系统没有 PDB，这些功能很可能被集成在 ZCM 中。

图 6 展示了配电的通用实现方式。

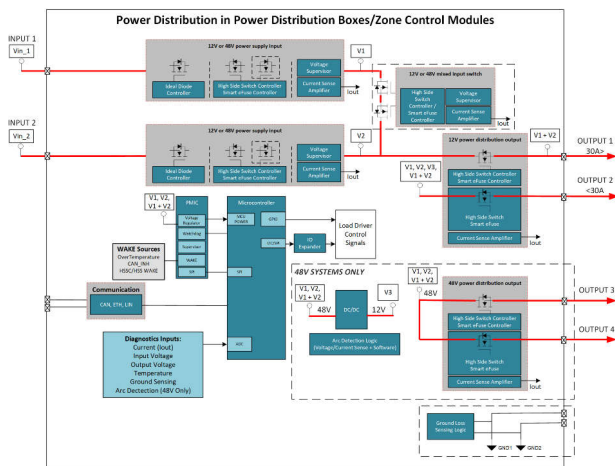


图 6. 通用配电模块

输入注意事项

重申一下，PDB 或 ZCM 可以使用图 1 中所示的五种不同电源之一。在选择冗余输入时，必须考虑系统中存在哪些负载瞬态，是否需要低功耗模式（尤其是 BEV）、是否需要反向电流保护、是否允许双向电流，以及系统需要哪些安全机制。

负载瞬态非常重要，因为超级电容或电池可以处理浪涌电流，确保电源不中断。另一方面，DC/DC 控制器和智能 eFuse 开关需要具备限流和为容性负载充电的能力，以确保下游元件免受瞬态浪涌电流的损害。

低压电池是在设计低功耗模式时主要考虑的输入电源。低压电池的电流消耗极小，且其电压水平在较长时间内保持稳定，不像超级电容那样波动。相比之下，大功率 DC/DC 转换器的静态电流消耗不可忽略。不过，若采用并联的低静态电流 DC/DC 转换器来支持系统的低功耗状态，可以减少高压电池的能耗。为车辆的钥匙关闭状态设计时，还涉及到在 BEV 中为该电池充电。使用 DC/DC 转换器作为第二输入源，开启混合输入开关后，即使下游开关闭，也能在钥匙关闭状态下为电池充电，使电流从 Vin_2 流向 Vin_1，如图 7 所示。

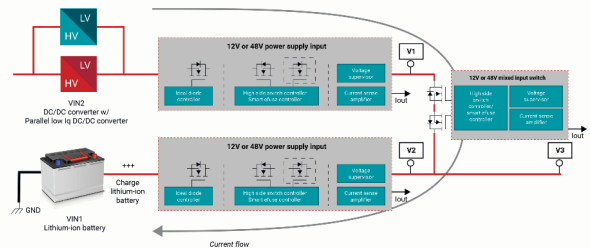


图 7. 使用混合输入开关为锂离子电池充电。

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，因此在需要多电源组合以提升系统冗余度的应用中也很有用。

另一方面，智能 eFuse 或高侧开关非常适合单向和双向电流的应用。双向电流除了用于电池充电外，在用多个电压母线或域为一个 ECU 提供冗余支持时也是必要的。以图

3 或图 5 系统为例，如果 DC/DC 转换器或控制器发生故障，车辆软件可以调整配电，将电池的电力从左侧区域引导到后部区域的高优先级功能。如果支持这些额外功能可能导致电池过载，车辆软件会通过电流检测放大器感知供电电流，从而决定系统中哪些负载需要关闭，以确保高优先级功能获得稳定电源。

最后，安全机制会极大影响配电架构。使用混合输入开关将 V1 和 V2 输出导轨结合，可为 ECU 提供额外受保护的 V1+V2 输出。超级电容还可以为 MCU 或外部 ECU 等关键部件持续供电。目前，超级电容已被用于诸如电动门锁等关键汽车功能，以便在发生碰撞后如果电源丢失，仍能打开车门。这些例子展示了设计人员在选择电源以实现不同安全功能时的创造力。

输出注意事项

用智能 eFuse 替代熔断保险丝和继电器的需求日益增长，以实现智能化的配电。选择合适的智能 eFuse 时，需要考虑可编程导线保护 (I²T)、电容充电、低功耗模式、控制与配置的引脚数量、电流与电压检测以及安全性等特性。

负载特性如工作电流、峰值电流、负载类型、PAAT 要求和汽车安全完整性等级 (ASIL) 将决定所选开关所需具备的功能。对于需要支持极高工作电流的应用，可以考虑采用高侧开关控制器驱动外部场效应晶体管 (FET)，以满足各种负载需求。当需要驱动极高连续电流（例如 30A 或更高）时，建议采用外部 FET 方案，因为此类电流会使集成 FET 方案的结温因 R_{ds(on)} 参数而升高至不可持续的水平。

相比之下，高侧开关和智能 eFuse 在支持较小电流时具有性能和成本优势。PDB 通常由高侧控制器组成，而非高侧开关，因为这些器件需要支持高达数百安培的电流，以满足所有下游区域的用电需求。负载特性还决定了智能 eFuse 应如何编程导线参数，以便在检测到过流时，智能 eFuse 能自动断开，无需本地 MCU 干预。eFuse 可编程保险丝特性的示例如图 8 所示。

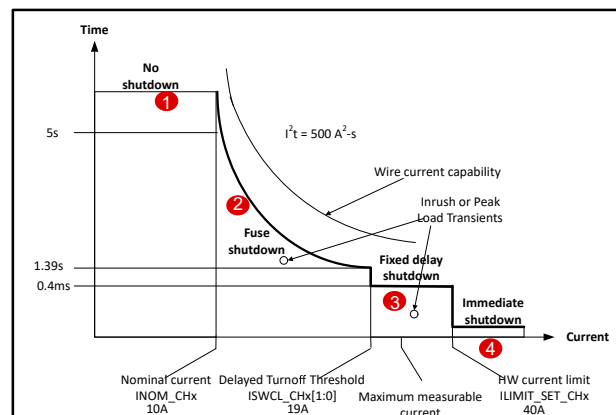


图 8. 不同 eFuse 可编程保险丝特性示例。

负载类型和峰值电流还决定了是否可以采用智能 eFuse 的电容充电方式。智能 eFuse 开关通常配备电容浪涌抑制技术，以应对电容浪涌并防止金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 损坏。另一方面，启动有刷直流电机时产生的电机浪涌电流，通常需要降低智能 eFuse 的漏源极导通电阻，或在无脉宽调制或限流的情况下使用外部 MOSFET。

同时，还需关注智能 eFuse 的安全机制，特别是其“跛行回家”模式功能。跛行回家模式是一种可编程安全状态，当满足故障条件（如高侧开关与其 SPI 控制器（通常为 MCU）失去 SPI 通信）时，器件会进入该状态。在设计跛行回家状态以维持车辆必要功能时，需要考虑输出是否保持开启以及恢复方式，这些都是智能 eFuse 在进入故障状态前可编程的特性。

系统注意事项

PDB 的设计考虑因素包括系统诊断、物料清单 (BOM)、输入/输出 (I/O) 以及智能 eFuse 故障恢复。

系统诊断可以包括诸如故障状态、每个开关的电压、电流和温度等参数，以及系统级参数如地线丢失。对于电压和电流的检测，如果精度要求低于 1%，可以选择电流检测放大器或电压检测放大器，并使用 MCU 集成的模数转换器 (ADC)；对于 1% 到 5% 的电流检测精度要求，使用开关的集成检测功能有助于降低系统 BOM。集成检测功能对于在主动和低功耗模式下都需要电流或电压读数的应用也非常适用。相比之下，若要准确检测这两种状态下的电流，至少需要两个电流检测放大器。最终，了解每个开关

的系统诊断信息，使车辆软件能够智能地实现多种安全功能。

确定配电盒所需的 MCU 通用 I/O 数量及其他外设，对于确定 MCU 与系统的交互方式、从而大幅节省成本至关重要。PDB，特别是 ZCM，可能拥有超过 60 个高侧开关、半桥和智能 eFuse 输出。这意味着需要 >300 个 I/O 和 ADC MCU 引脚来与多个负载驱动器和智能 eFuse 集成电路进行接口。使用基于串行外设接口 (SPI) 的 eFuse 和 SPI/I2C I/O 扩展器，可以优化 MCU 封装尺寸和引脚数量。图 9 表明对于每个基于 IO 的 eFuse，需要四个引脚（EN、诊断使能、WAKE、ISNS），且 I2T 特性不可编程。相比之下，一个基于 SPI 的 eFuse 只需要五个 MCU 引脚，每增加一个器件只需增加一个芯片选择引脚。

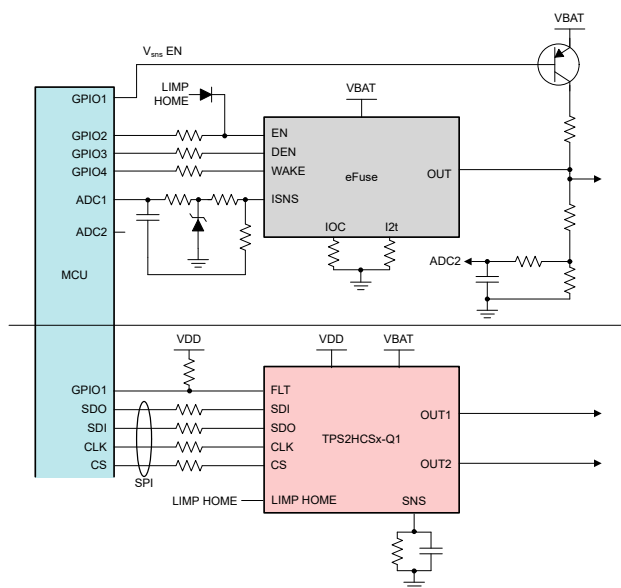


图 9. 通过 SPI 型 eFuse 优化 I/O 数量。

软件对于确定每个 eFuse 的恢复方式也至关重要。熔断器在检测到过流时会熔断并断开输入输出，从而阻止电流流动。德州仪器 (TI) 的智能 eFuse 则会简单地关闭输出，并可选择在设定时间后自动重新开启输出。还可以在本地 MCU 和配电系统中，通过电缆热模型和线缆电阻估算线缆温度，从而实现更复杂的负载恢复算法，以判断是否可以安全地重新开启输出。自动化这些开关的复位过程，最终减少了对可接近 PDB 的需求，并使开关能够更靠近其负载，从而缩短从电源到 ECU 的线缆长度。

48V 注意事项

48V 架构与 12V 架构非常相似，但也带来了一些额外的挑战。

首先，48V 下的电弧是一个问题，因此输出端和元器件必须具备足够的爬电距离和电气间隙，以防止不同电压点之间发生电弧。通过软件、电压和电流检测的结合，可以帮助检测电弧并快速关闭必要的开关以阻止电弧继续。还可以开发机器学习算法，更好地区分电弧波形与车辆中的自然瞬态，以帮助避免误报。图 10 展示了 48V 架构中电弧最常见的原因。

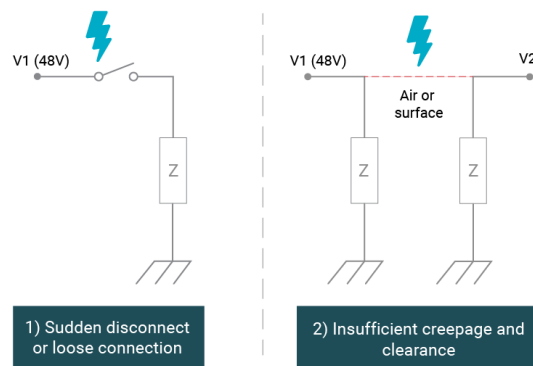


图 10. 48V 架构中电弧的常见原因

此外，在许多第一代 48V 架构中，48V 转 12V 的 DC/DC 转换器仍然是必需的，因为并非所有的执行器和半导体都已经过渡到 48V 工作，或者说过渡后并无明显收益。根据所需功率、板子尺寸、成本和效率，48V 转 12V 的转换有多种不同的拓扑结构可供选择。标准方法是采用传统的降压转换器或控制器，以及先进的拓扑结构，如开关电容转换器 (SCC) 和开关储能电感转换器 (STC)。

参考资料

1. 如需了解区域架构的更多信息，请参阅 [区域架构如何为完全由软件定义的车辆铺平道路](#)。
2. 关于区域架构的更多优势及其对软件定义汽车的影响，请参阅 [软件定义汽车推动汽车电子未来变革](#)。
3. 如需了解 48V 架构、其设计挑战及为何重新受到关注，请参阅 [48V 汽车系统：为什么是现在？](#)

4. 如需深入了解智能 eFuse 的系统优势与注意事项，请参阅 [用于区域控制器配电应用的全软件可配置高侧开关](#)。
5. 如需了解智能 eFuse 如何帮助减少 I/O 需求，请参阅 [通过 SPI eFuse 开关降低系统物料清单和 MCU 引脚需求](#)。

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。

© 2025 Texas Instruments Incorporated



ZHCY221

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、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