

Technical White Paper

48V 汽车车身电机应用的设计权衡



摘要

汽车行业正在经历向 48V 电气系统的转变，这一趋势源于传统和电动汽车对提升效率、提高电力输送能力以及支持先进功能的迫切需求。虽然这种转变带来了诸多好处，但对于车门模块、车窗升降器、雨刮器和电动座椅等应用中常用的车身电机设计而言，这也带来了一些挑战。本文讨论了设计人员能够在哪些方面利用 48V 电源以及需要考虑的权衡取舍。

内容

| | |
|------------------------------------|----|
| 1 简介..... | 2 |
| 2 在车身电机应用中使用 48V 电源的示例..... | 2 |
| 2.1 车门模块..... | 2 |
| 2.2 车窗升降器..... | 3 |
| 2.3 雨刮器..... | 4 |
| 2.4 电动座椅..... | 5 |
| 3 48V 电源的优势..... | 6 |
| 3.1 采用 48V 电源提升半桥集成度..... | 6 |
| 3.2 48V 集成驱动器与 12V 栅极驱动器的尺寸比较..... | 6 |
| 3.3 放置示例研究..... | 6 |
| 4 热性能和 EMC 性能权衡取舍考量..... | 8 |
| 4.1 MOSFET 导通损耗..... | 8 |
| 4.2 PWM 期间的开关损耗..... | 9 |
| 4.3 实验结果显示 PWM 期间压摆率对晶体管温度的影响..... | 11 |
| 4.4 快速压摆率对电磁发射的影响..... | 13 |
| 5 总结..... | 15 |
| 6 关于作者..... | 15 |
| 7 参考资料..... | 15 |

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

几十年来，汽车电气系统一直采用 12V 标称铅酸电池系统；但近年来，逐渐转为采用 48V 电气系统。对于车身应用，这种较高的电压意味着车窗升降器、座椅调节、挡风玻璃雨刮器、泵和鼓风机等各种功耗高的执行器所需的电流更低。较低的电流可实现更小的电线横截面，从而降低线束和执行器的成本与重量。

从 12V 系统转向 48V 系统需要设计人员对整车电子元件进行新的权衡取舍决策。在以下各节中，本文档讨论了电机驱动器、电源管理、接口收发器和其他元件如何受到这一趋势的影响。

2 在车身电机应用中使用 48V 电源的示例

下面的简化方框图说明了如何在关键车身电机汽车应用中实现 48V 系统。请注意，根据每种设计的具体要求，其他元件可能更适合该特定应用。

2.1 车门模块

在此典型示例中，中央电子控制单元 (ECU) 通过车辆 CAN 总线与车门模块进行通信，并提供锁定、解锁和车窗控制等功能的指令。由于车窗升降器电机的电流相对较高，因此使用 48V 电源来驱动车窗升降器电机。由于电流较低并且重新设计现有 12V 机构的成本较高，车门中的其他功能可继续使用 12V 执行器。在这种情况下，需要使用 48V 至 12V 降压稳压器为低电流负载提供 12V 电压。

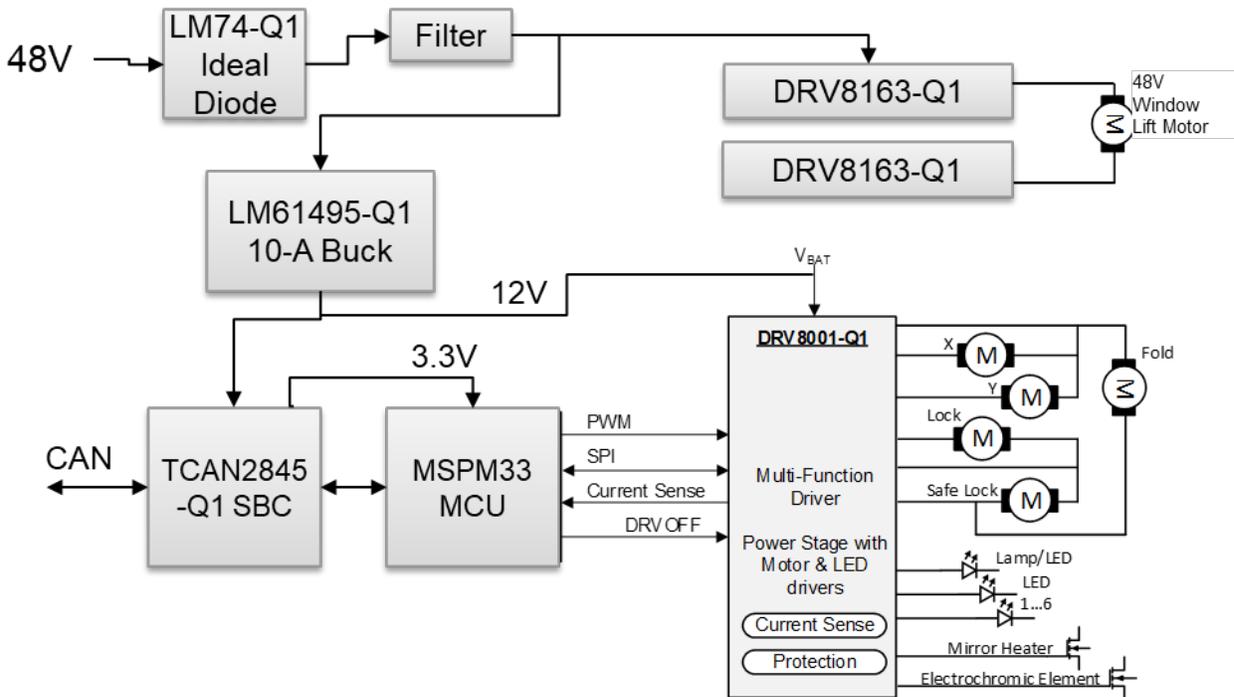


图 2-1. 48V 车门模块方框图示例

如果 48V 电源捆绑在同一线束中，CAN 系统基础芯片 (SBC) 能够承受高达 $\pm 58V$ 的总线故障。降压转换器以 12V 的电压为多功能驱动器提供高达 10A 的电流，该驱动器控制所有低功耗车门功能。对于由 48V 电源供电的更大功率的车窗升降器电机，半桥驱动器可在电源上提供高达 70V 的电压。理想二极管控制器可防止因 48V 电源线上的反向电压故障导致的损坏。微控制器可协调车门模块的所有通信和功能，在本例中，微控制器是具有 CAN-FD 连接和增强型安全功能的 160MHz Arm® Cortex®-M33 MCU，是车门应用的理想选择。

2.2 车窗升降器

车窗升降器可作为车门模块的一部分实现，也可由专用 ECU 控制。车窗升降系统接收升降车窗的指令，并具备速度控制（可减少机械卡滞）和挤压检测等高级功能。48V 电源驱动负责车窗运动的直流电机。全桥驱动器可将 MCU 的 PWM 信号转换为高电流电机驱动电压，从而控制 MOSFET，进而控制电机的运行。

在此示例方框图中，一个 DRV8263-Q1 全桥驱动器或两个 DRV8163-Q1 半桥驱动器直接连接到 48V 电源，从而控制有刷 48V 车窗升降器电机。设计人员可以使用 TI 的结温计算器工具，根据车窗升降器的电流曲线来评估哪种方案更好。[6],[7]

降压转换器为 TLIN4029A-Q1 供电，其连接到车辆的 LIN 网络，可承受高达 ±70V 的故障。

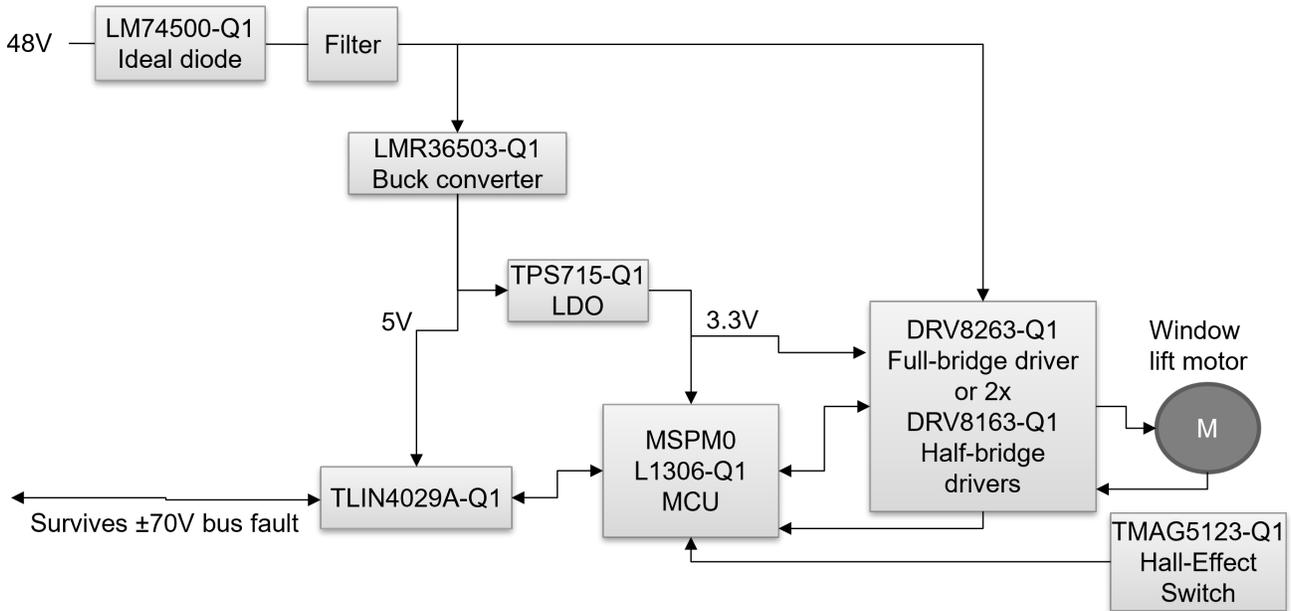


图 2-2. 48V 车窗升降器方框图示例

低压降 (LDO) 稳压器为微控制器 (MCU)、电机驱动器中的逻辑和提供位置反馈的霍尔效应传感器提供 3.3V 电压。

请注意，车窗升降器的许多设计特性与电动天窗等其他车身应用类似。

2.3 雨刮器

雨刮器系统在由 48V 电压轨供电时，使用旋转电机（直流有刷或无刷 (BLDC)）来驱动雨刮器机构。驱动器根据用户设置和可选的雨量传感器输入来控制电机转速或驱动至复位位置。电机电流和运动信息可以反馈至 MCU 以实现精确控制。

通常，前雨刮器有两种速度以及间歇性运行。如果采用有刷型电机，它通常有两个绕组，分别对应两种转速。较新的设计可能使用 48V 无刷电机，其效率更高且使用寿命更长。通过调整电换向驱动电压的相位，可控制无刷电机的转速。

采用 BLDC 电机的 48V 雨刮器模块示例方框图如 48V 车窗升降器方框图示例 所示。

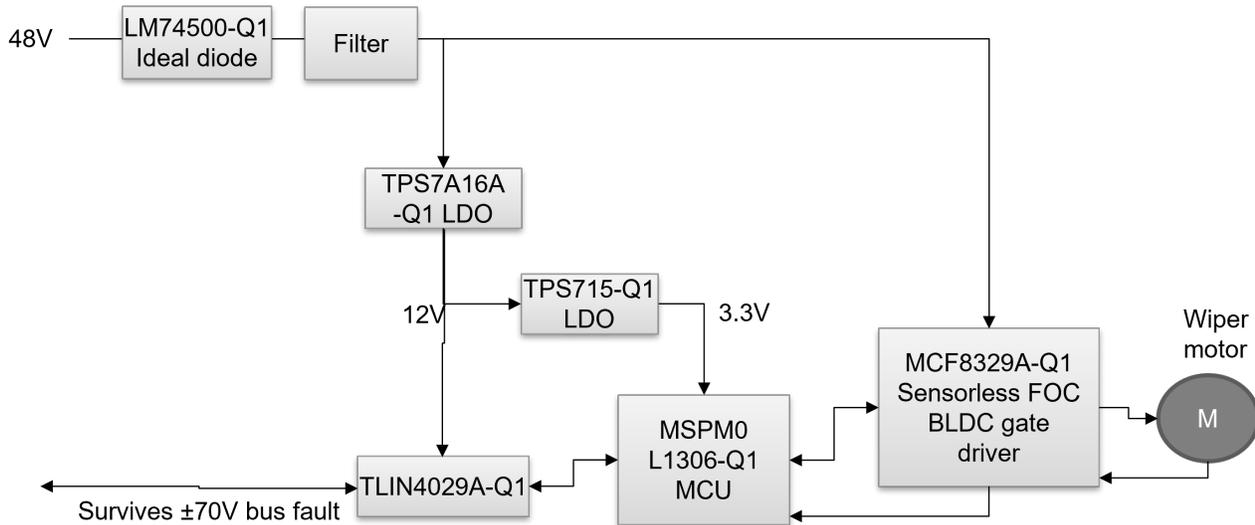


图 2-3. 48V 挡风玻璃雨刮器方框图示例

本示例中所示的 MCF8329A-Q1 BLDC 栅极驱动器包括一个 50mA 3.3V 稳压器，能够为外部电路提供高达 50mA 的电流。当芯片处于低功耗睡眠模式时，该稳压器将被禁用；但如果雨刮器 ECU 的 48V 电源通过上游区域模块或配电盒切换，则可以使用集成在 MCF8329A-Q1 中的稳压器而不是 TPS7A16A-Q1 稳压器。

2.4 电动座椅

与其他多功能车身应用类似，电动座椅系统利用 48V 电压为负责座椅调节的多个大功率直流电机供电。每个电机都具有专用全桥驱动器或共享半桥驱动器，用于根据来自座椅控制开关的用户输入来控制移动。与车门模块类似，电流较高的电机率先转用 48V，而低电流执行器暂时保留在 12V 电源上。驱动位置调节等间歇性功能的电机通常使用有刷电机，而运行座椅风扇等持续功能的电机通常使用无刷电机。

图 2-4 显示一种实现方案：直接通过 48V 电源驱动大电流电机，而低电流负载仍为 12V 负载，需要降压稳压器来产生 12V 电源。

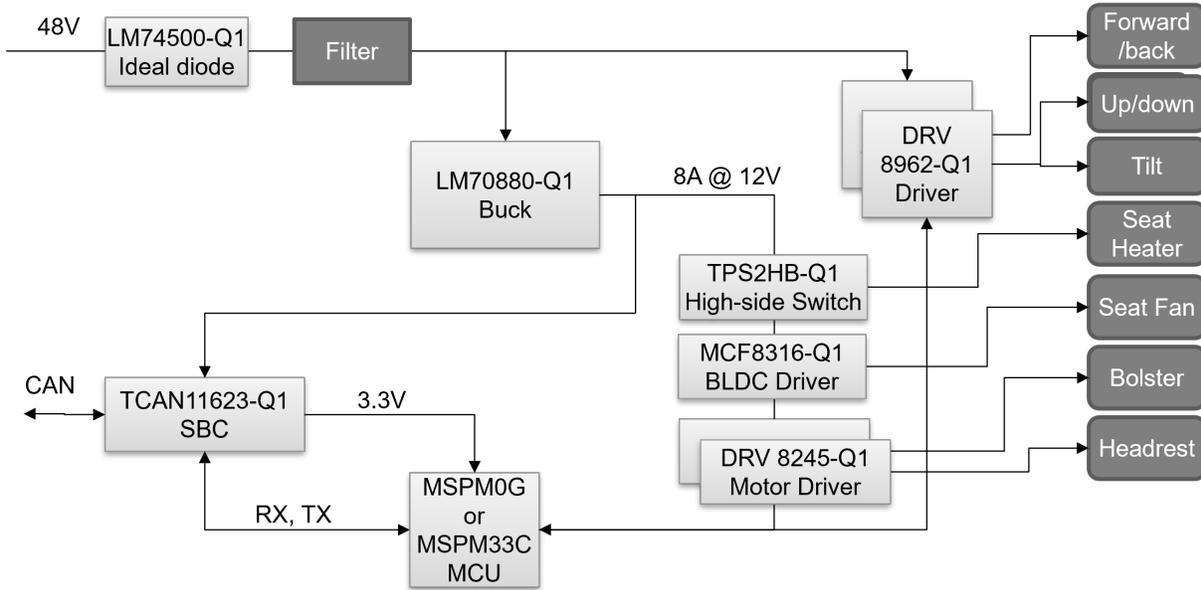


图 2-4. 48V 座椅模块方框图示例

3 48V 电源的优势

对于开发车身电机应用的设计人员而言，从 12V 电源切换到 48V 电源具有诸多优势。除了在架构层面降低线束成本和重量外，这些优势还利用 48V 设计所需的较低电流，提供更高的集成度、更小的电路板尺寸和增强的功能。

3.1 采用 48V 电源提升半桥集成度

随着 48V 系统的普及，集成电机驱动器 IC 中的半桥集成度呈上升趋势。与采用分立式 MOSFET 的栅极驱动器相比，集成驱动器设计具备以下优势：

- 更小的外形尺寸：通过将多个半桥和控制逻辑集成到单个封装中，可以减小电机驱动器电路的整体尺寸。
- 降低的复杂性：使用集成驱动器进行设计可简化电路板布局布线并减少外部元件的数量，从而实现更精简的设计。
- 增强的功能：集成驱动器可整合其他功能，如使用电流镜的集成电流检测、集成驱动器级的温度检测、完全集成的诊断以及梯形或磁场定向控制 (FOC) 等高级控制算法。

3.2 48V 集成驱动器与 12V 栅极驱动器的尺寸比较

集成式 48V 驱动器不仅具有降低复杂性等优势，而且尺寸与传统 12V 栅极驱动器实施对比揭示了有趣的权衡取舍。

集成式驱动器：集成式 48V 驱动器通常将最终驱动器级 MOSFET 及其栅极驱动电路集成到一个封装中。当 $R_{DS(on)}$ (导通状态电阻) 值较低时，电机驱动器的封装尺寸和裸片成本会显著增加。因此，与 12V 栅极驱动器加外部 MOSFET 的实施相比，由于电流要求较低，48V 驱动器提供类似的功率能力时占用的电路板面积更小。

缩小 48V 驱动器封装以利用更小裸片尺寸的一个限制是，48V 信号与其他信号之间物理隔离的要求的距离比 12V 信号的距离更远。这些爬电距离和间隙规格约束了 48V 驱动器封装的最小尺寸，而无视因驱动电流较低导致的裸片尺寸缩减。

栅极驱动器和外部 FET：传统的 12V 栅极驱动器与外部 MOSFET 相结合，虽然对于给定的 $R_{DS(on)}$ 而言可能会占用更多布板空间，但允许更灵活地为应用选择首选外部 FET，从而有可能实现更低的 $R_{DS(on)}$ 和更好的热性能。因此，设计人员在评估从 12V 转换到 48V 的优缺点时，必须考虑这一因素。

3.3 放置示例研究

图 3-1 显示双向有刷直流电机 (例如车窗升降器) 两种类似设计之间的电路板尺寸比较。此应用通常需要 300W 或更低的峰值功率，典型工作功率约为 100W。

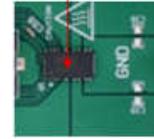
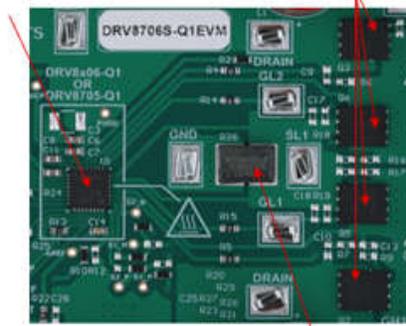
左图是 12V 设计，使用 DRV8706-Q1 栅极驱动器和四个外部 N 沟道 MOSFET，更适合车窗升降器的电机电流典型值：峰值电流约为 20A，稳态 (尽管是间歇性的) 运行时电流约为 8A。通过选择具有低 $R_{DS(on)}$ 值的合适 MOSFET，该设计可以扩展到更高的电流。

右图是 48V 设计，采用 DRV8263-Q1 集成式全桥电机驱动器，也是车窗升降应用的理想选择，同时显著节省了电路板尺寸。48V 电源的电流水平小于 10A 峰值，稳态运行时的电流仅为几安培。请注意，除了因电流降低而减小驱动器尺寸外，将完整设计集成到单个芯片还可减小外部元件尺寸，最显著的影响是无需大型分流电阻器。

DRV8706-Q1
2-half-bridge
gate driver
for 12-V systems

4x n-channel
MOSFETs

DRV8263-Q1 2-half-bridge
motor driver with integrated n-channel
MOSFETs and current sense output
for 48-V systems



3W current-sense
resistor

图 3-1. 12V 和 48V 全桥电机驱动器的电路板尺寸比较

4 热性能和 EMC 性能权衡取舍考量

汽车领域从传统 12V 电气系统转变为 48V 系统，尤其是对于车身电机，带来了显著的热兼容性和电磁兼容性 (EMC) 挑战及权衡取舍。虽然 48V 系统具有降低线束重量和成本、提升效率以及为高级功能提供增强型电源等诸多优势，但这需要对这些因素进行谨慎权衡。

4.1 MOSFET 导通损耗

考虑一个具体示例，其中需要持续功率负载为 240W 的有刷电机。对于 12V 系统，这会产生 20A 的电机电流，而对于 48V 系统，电流仅为 5A。

为了便于比较，假设任一设计都需要将 99% 的电力输送给电机，因此驱动器中的损耗必须为 2.4W 或更低。对于 12V 系统，这意味着驱动器级（高侧和低侧晶体管）的总导通电阻必须小于 6mΩ。

$$R_{LS+HS} = \frac{P_{\text{loss}}}{I_{\text{motor}}^2} = \frac{2.4\text{W}}{20\text{A}^2} = 6\text{m}\Omega \quad (1)$$

市面上鲜有配备如此低 RDS(on) 集成 MOSFET 的电机驱动器，因此满足这些要求的典型设计是具有外部 MOSFET 的 DRV8706-Q1 等栅极驱动器。

对于 48V 系统，在驱动器中允许相同功率损耗的情况下，驱动器级（高侧和低侧晶体管）的导通电阻可高达 96mΩ。

$$R_{LS+HS} = \frac{P_{\text{loss}}}{I_{\text{motor}}^2} = \frac{2.4\text{W}}{5\text{A}^2} = 96\text{m}\Omega \quad (2)$$

DRV8263-Q1 等采用 48V 系统的电机驱动器集成导通电阻通常低于 96mΩ 的 MOSFET，从而可以采用尺寸更小的电路板选项。

4.2 PWM 期间的开关损耗

如果使用脉宽调制 (PWM) 以低于全速的速度运行电机，情况就会更加复杂。现在，必须考虑开关损耗以及导通损耗。

每次驱动器级 MOSFET 导通或关断时，晶体管都会在线性区域内短暂运行一段时间，这意味着电流并非为零，并且通道上的电压大于晶体管完全导通时的电压。在此期间，晶体管中的功率耗散达到最大值。图 4-1 中的电路仿真展示了晶体管 T1 从无电流的关断状态切换到导通状态的这一过程。晶体管中的功率耗散显示为 PM1，并且当晶体管两端的电流和电压处于转换过程的中间时，功率耗散达到最大值。

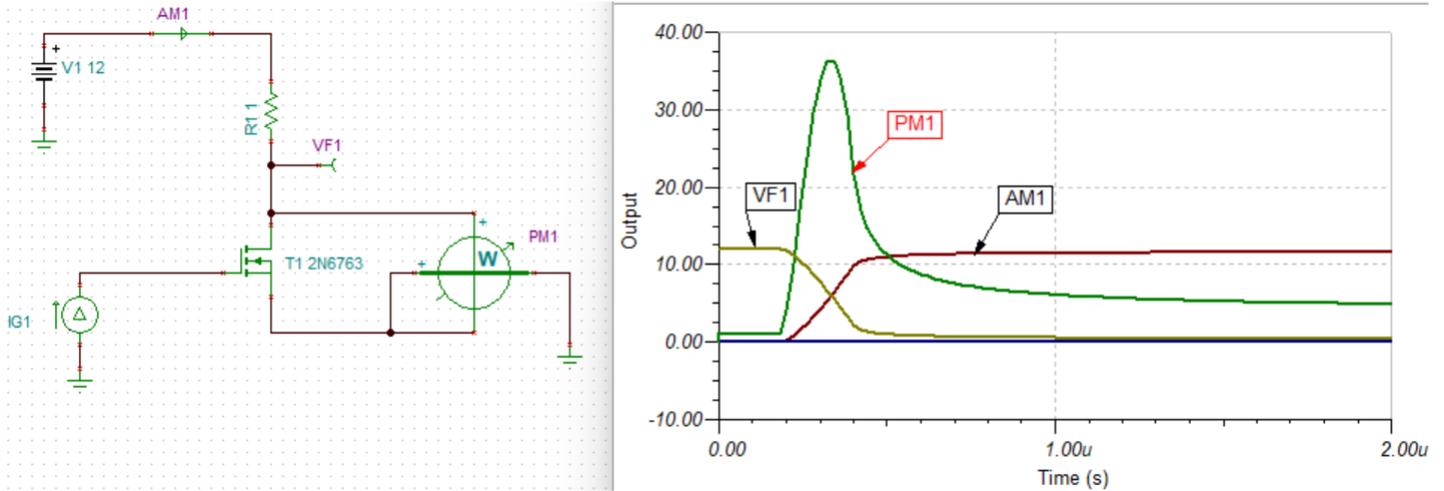


图 4-1. 显示开关功率耗散的仿真

请注意，在晶体管导通之前，由于没有电流流动，功率耗散基本上为零。晶体管导通后，在运行的传导阶段，功率耗散是稳态电流与晶体管两端电压的乘积（相对较低）。

驱动器晶体管中的瞬时功率耗散是漏源沟道电压与通过沟道的电流的乘积。瞬时功率的简化数学模型假设上升和下降转换都具有线性斜率。通过这些简化，我们可以将功率耗散建模如下：

$$P(t) = V(t) \cdot I(t) \quad (3)$$

$$P(t) = I_{\max} \cdot \left(\frac{t}{t_{\text{rise}}}\right) \cdot (V_{\text{supply}} - I_{\max} \cdot 2 \cdot R_{\text{DS(on)}}) \cdot \left(1 - \frac{t}{t_{\text{rise}}}\right) + (I_{\max} \cdot 2 \cdot R_{\text{DS(on)}}) \cdot (I_{\max} \cdot \frac{t}{t_{\text{rise}}}) \quad (4)$$

为了进行公平的比较，我们可以计算等效 12V 和 48V 情况下的功率耗散。在这两种情况下，我们都会在稳态运行期间为负载提供约 48W 的功率，因此 12V 系统需要 4A 的电流，而 48V 系统需要 1A 的电流。为每种情况选择相应的 MOSFET，以在稳态运行期间，驱动器为负载提供 99.7% 的效率；因此 MOSFET 中耗散约为 160mW。这样一来，12V 系统使用 $R_{\text{DS(on)}}$ 为 $10\text{m}\Omega$ 的 MOSFET，而 48V 系统使用 $R_{\text{DS(on)}}$ 为 $160\text{m}\Omega$ 的 MOSFET。在这两种情况下，MOSFET 中的最大瞬时功率耗散均为 12W，如图 4-2 所示

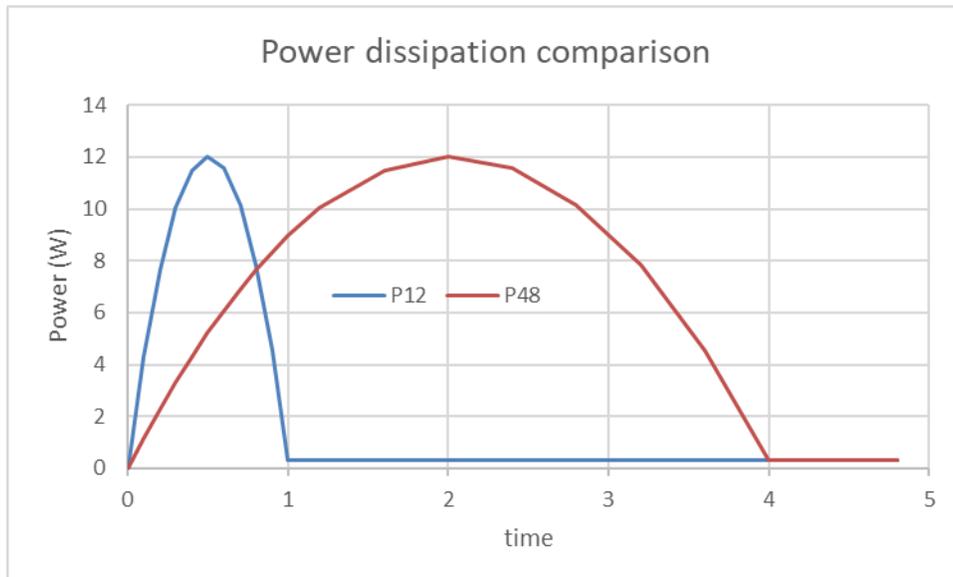


图 4-2. 等效 12V 和 48V 系统的瞬时功率耗散

关键结果表明，对于等效系统的稳态性能，如果压摆率相等，则 48V 系统的开关功率耗散持续时间是 12V 系统的 4 倍。总能量耗散是图 4-2 中每条曲线下的面积。正是这些能量在 PWM 运行期间使晶体管显著地发热。

图 4-3 显示具有可调压摆率的集成电机驱动器的电压转换：即采用 12V 电源的 DRV8245-Q1 和采用 48V 电源的 DRV8363-Q1。请注意，此斜率在上升沿期间并非恒定，但总转换时间与压摆率设置的倒数相关。正如预期的那样，压摆率设置为 19V/us 时 48V 器件的上升时间约为压摆率 20V/us 时 12V 器件上升时间的四倍。

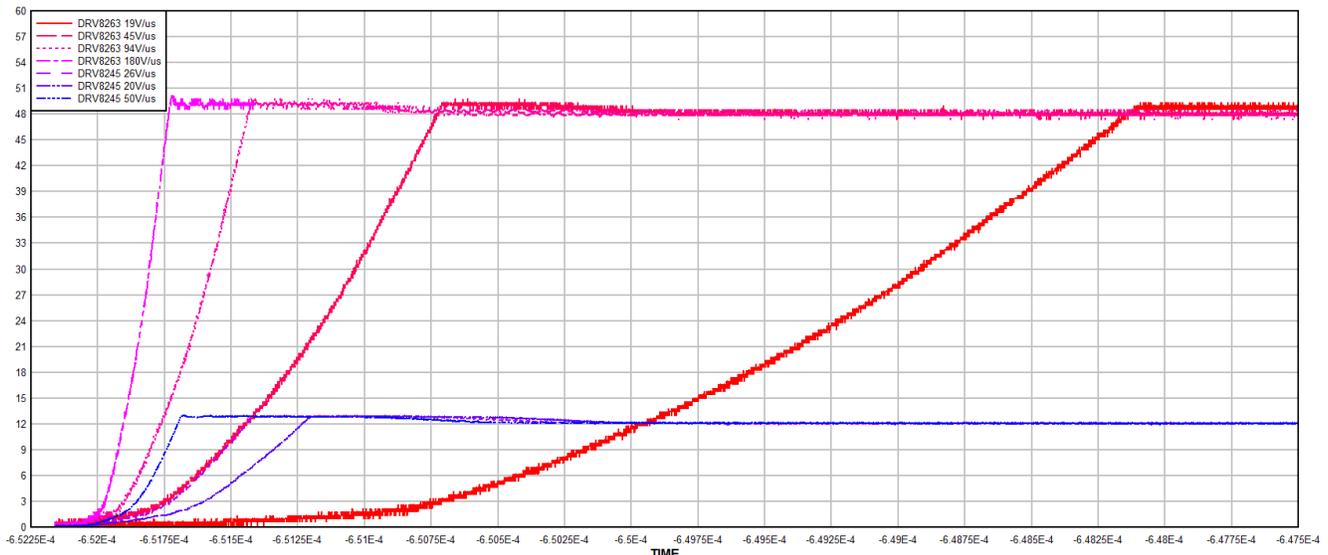


图 4-3. 各种压摆率设置下 12V 和 48V 电压转换的比较

为降低功率耗散，我们需要快速完成转换阶段。因此，我们需要较快的压摆率，从而缩短驱动器级晶体管的上升时间和下降时间。可调压摆率设置提供了这种灵活性。然而，正如本文档后面所述，由于快速信号边沿中的高频成分较多，快速压摆率会影响电磁发射。

4.3 实验结果显示 PWM 期间压摆率对晶体管温度的影响

实验结果支持 12V 和 48V 电源条件下压摆率与热功率耗散之间的理论关系。测试条件是 PWM 开关频率为 20kHz，占空比为 50%。12V 器件的负载为 3Ω，与 1mH 电感串联，仿真在 24W 下运行的电机。对于 48V 器件，负载为 48Ω，与 1mH 电感串联，同样仿真在 24W 下运行的电机。得到的测量结果如表 4-1 所示，并在图 4-4 中绘制。

表 4-1. 温升与压摆率的实验测量结果

| 器件 | (V) | 压摆率设置 (V/us) | 温升 (C) |
|---------|-----|--------------|--------|
| DRV8245 | 12 | 20 | 13.5 |
| DRV8245 | 12 | 26 | 12.7 |
| DRV8245 | 12 | 50 | 7.8 |
| DRV8263 | 48 | 19 | 30.8 |
| DRV8263 | 48 | 94 | 14.6 |
| DRV8263 | 48 | 180 | 12.7 |

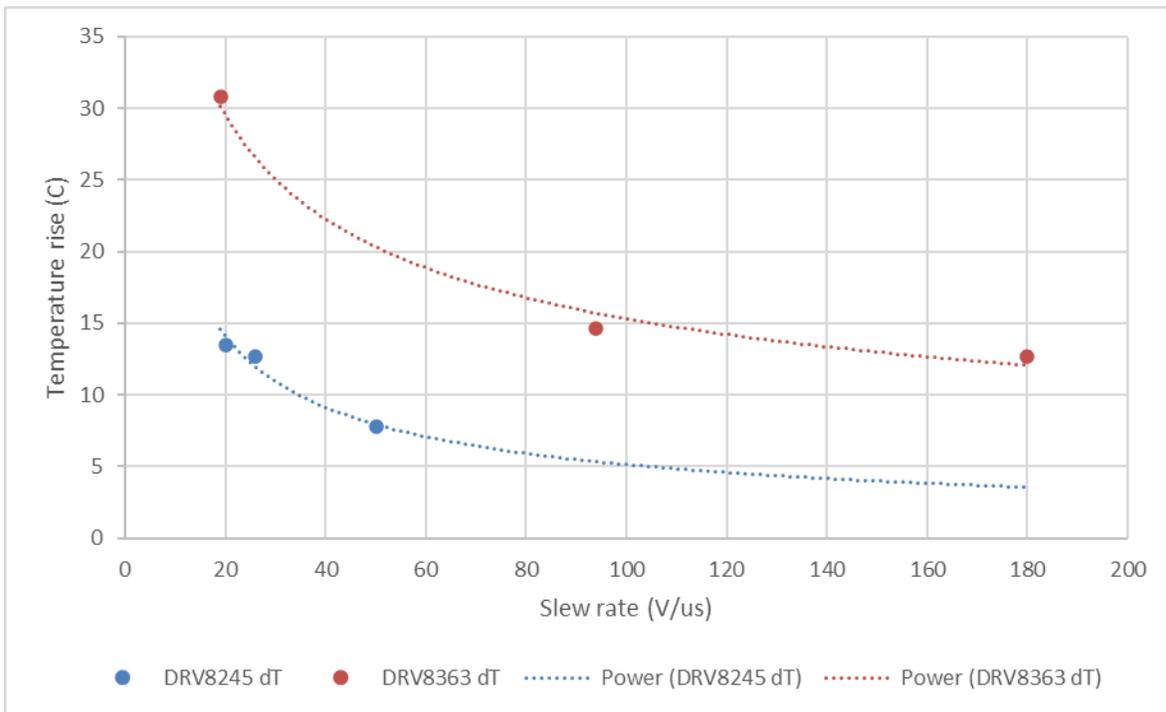


图 4-4. 器件温升与压摆率间的关系 (12V 和 48V 器件)

图 4-5 中的热成像图展示了电源电压、压摆率与温升之间的关系。电源电压为 12V 且压摆率为 20V/us 时，温升约为 9C。在相同的压摆率下，48V 电源的温升约为 24C。为降低温升，可以增加 48V 电源的压摆率；在这种情况下，180V/us 的压摆率可提供与电源电压为 12V 且压摆率为 20V/us 时相同的温升。

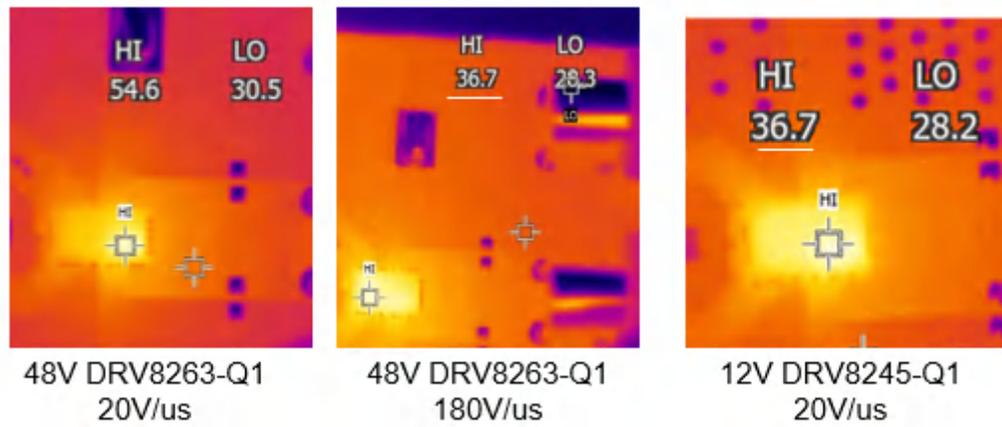


图 4-5. 驱动器温度比较 (48V 和 12V)

这些测量的条件如表 4-2 所示。

表 4-2. 热性能和 EMC 测量的测试条件

| 器件 | 占空比 | 频率 | VM | 负载 |
|--------------------|-----|-------|-----|-----------|
| DRV8245-Q1 VQFN-HR | 50% | 20kHz | 12V | 3Ω + 1mH |
| DRV8263-Q1 VQFN-HR | 50% | 20kHz | 48V | 48Ω + 1mH |

4.4 快速压摆率对电磁发射的影响

随着我们增加压摆率以减少开关期间的功率耗散，意外的后果是 PWM 基频的高频谐波能量增加。

如果上升沿和下降沿非常快，则 PWM 电压可以模拟为方波信号或矩形信号，其公开的谐波取决于基波周期和占空比。转换较慢时，PWM 电压模拟为梯形信号。如图 4-6 所示，电压频谱包络图有两个滚降频率：第一个滚降频率由占空比设置的导通时间 τ 决定，第二个滚降频率由取决于压摆率设置的上升时间 τ_r 决定。

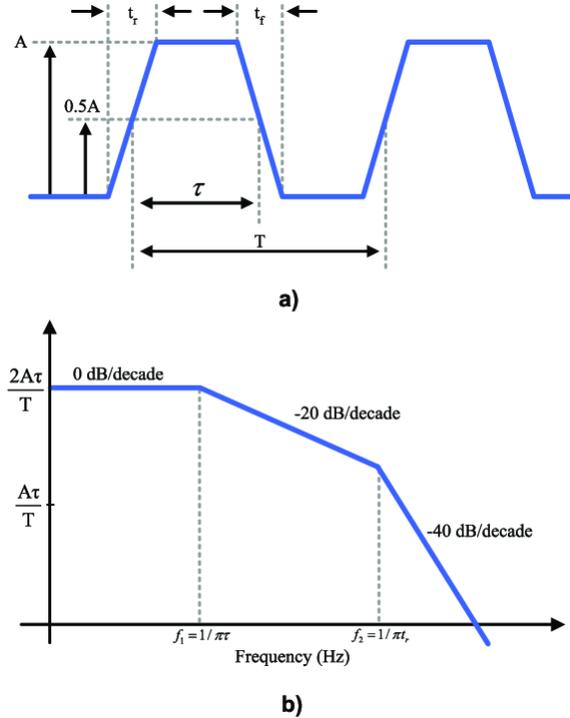


图 4-6. 梯形 PWM 信号与谐波频率包络之间的关系 [1]

实验结果说明了压摆率与发射振幅之间的这种理论关系，如下面的比较所示。我们使用与热实验相同的测试条件，测量 48V 电机驱动器在 150kHz 至 10MHz 范围内的传导发射。

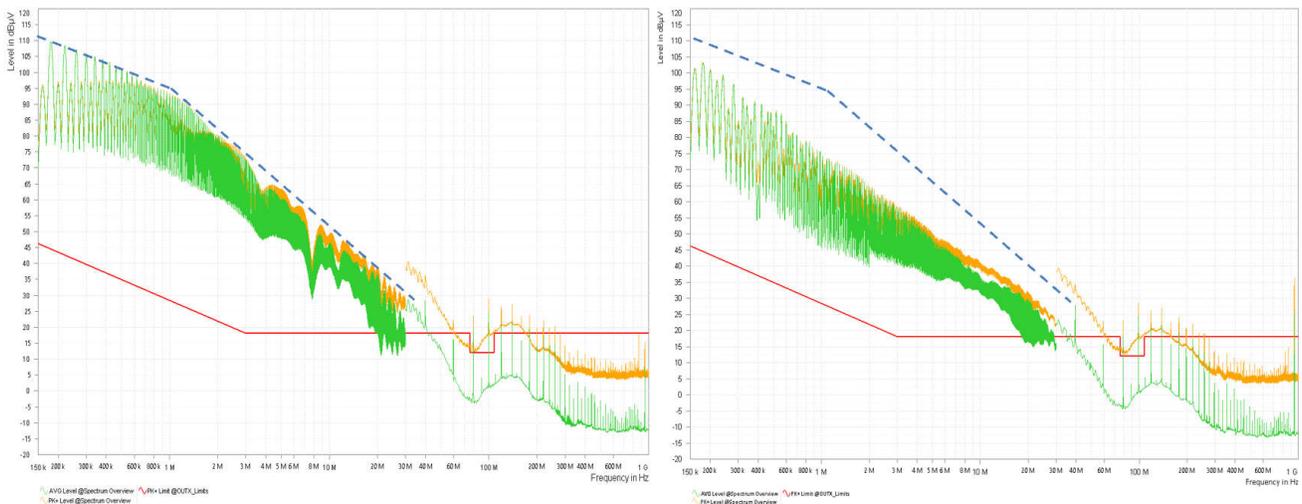


图 4-7. 压摆率 180V/us (左) 与 20V/us (右) 的发射比较

左图显示压摆率为 180V/us 时测量的发射。右图显示压摆率为 20V/us 时的发射。压摆率较快的发射显著高于压摆率较慢的发射。右图中的虚线（较慢的压摆率）重现了较快压摆率发射的包络。400kHz 至 4MHz 频段的发射降幅约为 20dB 量级。

由 DRV8363-Q1 驱动的无刷电机的辐射发射中可看到类似的效果。下图展示 BLDC 电机在 48V 电源电压下运行时的两个频谱。左图中，驱动器级 MOSFET 的栅极电流设置为 250mA（充电）和 500mA（放电），从而实现相对较快的压摆率。右图中，栅极电流减小，导致转换速度变慢，发射特性如预期得到改善。

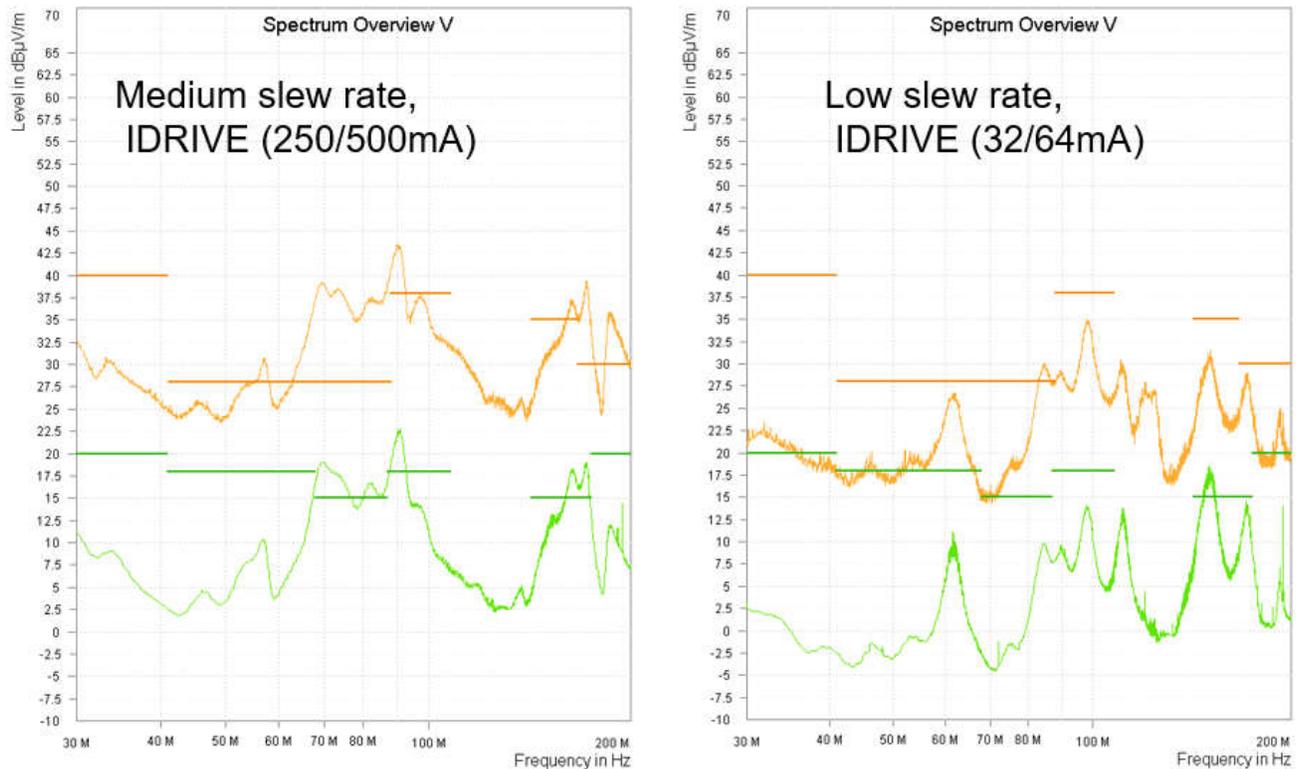


图 4-8. 采用 BLDC 电机时的辐射发射

因此，虽然快速转换有利于降低功率耗散并可简化热设计，但在电磁兼容性方面，较慢的压摆率更为理想。设计人员将通过考虑总体系统（包括散热措施和减少排放的最佳实践）来找到平衡。

5 总结

总之，汽车应用领域转向 48V 系统既给车身电机应用带来了机遇，也带来了挑战。虽然提高半桥集成度在尺寸和复杂性方面具有优势，但需要谨慎考虑热管理和 EMC 性能，尤其是对于车窗升降器和电动座椅等应用。应根据具体的设计优先级和应用要求，在集成式设计和栅极驱动器设计之间进行选择。

汽车车身电机向 48V 系统转变需要采用整体方法，在整个设计和开发过程中同时考量热性能和 EMC 两个方面。为了在收获 48V 系统优势的同时验证整个汽车电气系统可靠性、安全性和功能性，谨慎选择元件、优化的热管理策略和稳健的 EMC 设计技术至关重要。

6 关于作者

Clark Kinnaird 是德州仪器 (TI) 汽车系统工程团队的成员，负责车身电机应用。

Miguel Chaidez 是德州仪器 (TI) 有刷和步进电机驱动器部门的系统工程师和技术团队成员。

Joshua Horlander-Cruz 是德州仪器 (TI) 有刷和步进电机驱动器部门的应用工程师。

Joseph Ferri 是德州仪器 (TI) BLDC 电机驱动器部门的应用工程师。

7 参考资料

1. Hizarci, Halime、Pekperlak, Umit 和 Arifoğlu, Uğur。(2021). *Conducted Emission Suppression Using an EMI Filter for Grid-Tied Three-Phase/Level T-Type Solar Inverter (使用 EMI 滤波器对并网三相/电平 T 型光伏逆变器的传导发射抑制)*。IEEE Access。9.67417-67431。10.1109/ACCESS.2021.3077380。
2. 德州仪器 (TI)，[48V 汽车系统：为什么现在推出？](#)，营销白皮书。
3. 德州仪器 (TI)，[降低 48V 汽车应用降压转换器中的传导 EMI](#) 应用手册。
4. 德州仪器 (TI)，[更智能的配电：塑造汽车技术的未来](#)，营销白皮书。
5. 德州仪器 (TI)，[48V 汽车系统的电机驱动器压摆率注意事项](#) 应用手册。
6. DRV816X-Q1 结温计算器，DRV816X-Q1-JUNCTION-TEMPERATURE-CALC 计算工具 | TI.com
7. DRV826X-Q1 结温计算器，DRV826X-Q1-JUNCTION-TEMPERATURE-CALC 计算工具 | TI.com

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