

*Application Note***48V 汽车系统的电机驱动器压摆率注意事项**

Akshay Rajeev Menon, Joseph Ferri

摘要

最近，汽车行业发生了重大变化，市场的电气化趋势以及政府机构实施的环境法规推动了这一变化。随着越来越多的 OEM (原始设备制造商) 正在从事电动汽车 (EV) 项目，48V 架构的采用速度正在显著加快。即使在全电动汽车之外，轻度混合动力汽车也采用 48V。

包含 48V 电压轨后，连接的系统能够以更低的电机电流运行，从而减少线规厚度、线束重量、功率损耗和 PCB 尺寸。最终，这有助于降低这些车辆线束的高总成本。通过提高功率密度和简化布线，EV 中更常用的滑板式机箱还可以从 48V 电源轨中受益。

在许多汽车系统中，无刷直流 (BLDC) 电机由于效率更高、使用寿命更长、EMI 更低、运行更安静且控制精度高，因此得到广泛采用。这些电机在整个车辆中用于多种用途，例如制动、转向、换档、主动悬架、泵、鼓风机等。这种从传统 12V 架构的转变，会导致无刷直流电机 (BLDC) 系统的性能发生变化，因此需要重新审视部分设计方案。

虽然在 48V 电压电平下有多个新的系统级注意事项，但本应用手册重点介绍 MOSFET 功率损耗以及从 12V 系统转换到 48V 系统时功率损耗的变化。

内容

1 简介	2
2 电机驱动器系统中的功率损耗和热性能	2
2.1 导通损耗	2
2.2 开关损耗	3
3 实际电机驱动器限制	5
3.1 电磁干扰 (EMI) – 系统噪声注意事项	5
3.2 电机驱动器电压容差	5
4 摘要	6
5 参考资料	6

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

BLDC 电机在多个汽车系统中具有多种功能。传统上，BLDC 系统最常见的电压范围是 12V。由于这些系统包含 48V 电压轨，因此了解由此对 MOSFET 功率损耗的影响非常重要。为了降低工作温度和节省电池电量，管理功率损耗来源至关重要。

本应用手册讨论了转换到 48V 时，新系统级注意事项，包括传导损耗、开关损耗、EMI 等。对于所有后续示例和计算，12V 和 48V 都使用 960W 的功率级别，即 12V 时为 80A，48V 时为 20A。

2 电机驱动器系统中的功率损耗和热性能

BLDC 电机通过 MOSFET 半桥三相的电气换向，将电势能量转换为机械能。从电池向电机输送功率的 MOSFET，是电机驱动器系统中功率损耗和热量的最大因素。

功率损耗是系统设计过程中需要考虑的一个关键因素，因为功率损耗会影响：

用户体验 - 高温会影响可用性，并可能导致用户不适

器件可靠性 - 高温运行会导致磨损加速，并影响寿命可靠性

电源效率 - 缩短电池寿命，降低车辆续航里程并增加热设计挑战

本应用手册重点介绍 MOSFET 功率损耗的两个主要方面：导通损耗和开关损耗。

2.1 导通损耗

当电流从漏极传导到源极时，MOSFET 中会出现导通损耗。MOSFET 导通时的通道电阻通常称为导通状态电阻或 $R_{ds(on)}$ 。这些损耗与电流的平方成正比，因此电机电流成为决定导通损耗的主要因素。FOC 换向期间的导通损耗通过以下公式计算得出：

$$P_{conduction} = 3 \times I_{RMS}^2 \times R_{ds(on)} \quad (1)$$

示例 1

假设两个系统的总功率为 960W。

系统 A = 12V 电池

系统 B = 48V 电池

$$P = I \times V \quad (2)$$

根据 [方程式 2](#)，如果假设 12V 和 48V 系统所需的功率输出相同，则使用欧姆定律，我们可以推导出 48V 系统的工作电流仅为 12V 系统的四分之一。因此，根据 [方程式 1](#)，流经 MOSFET 的电流会更小，使 48V 系统中的导通损耗减少 16 倍。[图 2-1](#) 说明了 [示例 1](#) 中所示的损耗。

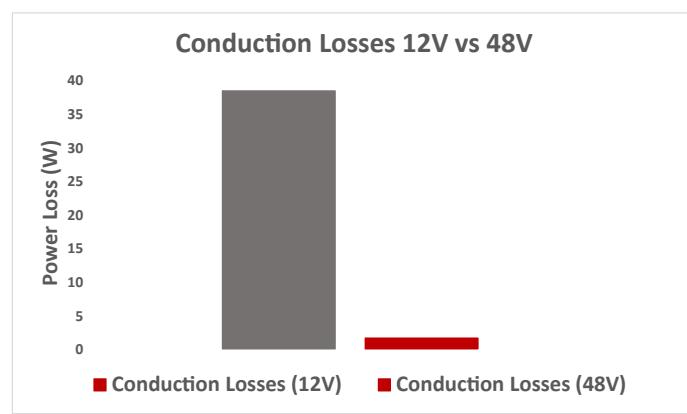


图 2-1. 导通损耗 (12V 对比 48V)

2.2 开关损耗

开关损耗是功率损耗的另一种形式，与 **MOSFET** 导通/关断过程中产生的能量损耗相关。这些损耗与完全转换漏源电压所需的时间及 **MOSFET** 的开关频率成正比。

FOC 换向期间的开关损耗计算公式如下：

$$P_{switching} = 3 \times I_{RMS} \times V_{peak} \times T_{rise/fall} \times F_{PWM} \quad (3)$$

在 12V 汽车系统中，导通损耗在总功耗中占主导地位，因此开关损耗不是重点。不过，随着汽车制造商转向 48V EV/混合动力系统，开关损耗在总损耗中占主导地位。这一市场变化趋势促使更多工程师优化开关行为，以降低总功耗。

关注的核心参数是 **MOSFET** 在电池电压范围内进行开关转换所需的时间。方法是缩短压摆时间 ($\frac{Voltage}{T_{rise/fall}}$)，可以更高效地切换 **MOSFET**。通过增加电机驱动器的栅极电流可缩短压摆时间，从而加快压摆率。图 2-2 显示了转换率对开关损耗的影响。

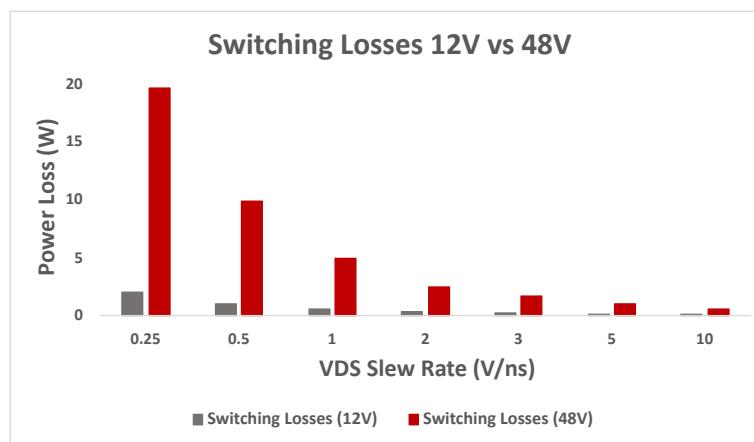


图 2-2. 开关损耗 (12V 对比 48V)

2.2.1 开关频率的影响

另一个可能严重影响系统中开关损耗量的因素是输入 PWM 信号的频率。MOSFET 必须在相应输入脉冲的开始和结束（关断和导通）时进入开关区域。PWM 频率越高，这些脉冲的发生频率就越高，因此会增加每个 MOSFET 在开关区域所花费的时间。这意味着开关损耗量与输入 PWM 信号的频率之间存在成比例的关系（参见图 2-3）。48V 系统中 PWM 频率的常见值约为 20kHz。之所以使用该值，是因为该频率足够高，足以超出人类可闻范围，但会保持较低水平，以减少开关损耗和噪声。

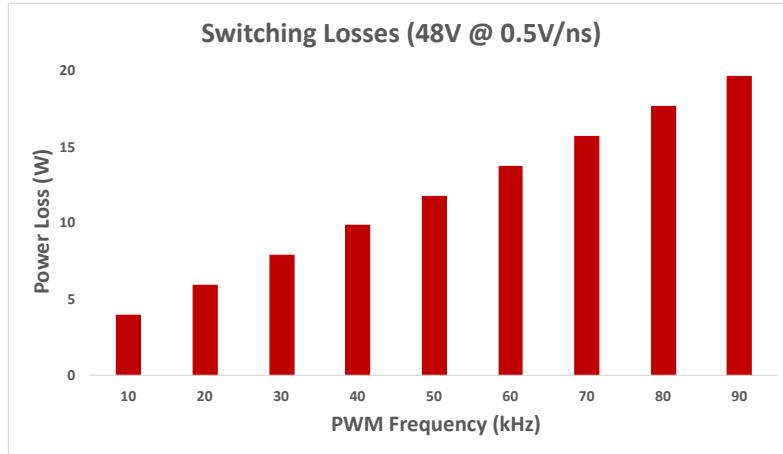


图 2-3. 开关损耗 (0.5V/ns 时为 48V)

3 实际电机驱动器限制

理论上，以最快的压摆率运行是优化电机驱动器系统及降低开关功率损耗的关键。但是，在实践中，您受以下实际限制因素的影响：

3.1 电磁干扰 (EMI) – 系统噪声注意事项

MOSFET 的开关速度越快，产生的电压瞬变就越剧烈，而这些瞬变包含高频元件，会以 EMI 的形式传导出去。所有电路都具有寄生电感和电容，这些 L-C 元件受到的快速激励时，会形成谐振电路，进而放大某些频率。这些频率会对系统的其余部分造成干扰。汽车系统具有严格的 EMI 频率上限要求，例如符合 CISPR 25 标准，因此对可在终端系统中实现的压摆率构成了限制。

3.2 电机驱动器电压容差

提高电压压摆率会导致 MOSFET 的栅极和源极信号上出现电压振铃（过冲和下冲）。过冲的幅度与压摆率（由栅极电流控制）直接相关。有关栅极电流对压摆率和振铃的影响，请参阅 图 3-1。系统设计工程师有责任确保电压尖峰不超过电机驱动器的绝对最大额定值，尤其是栅极和源极引脚额定值。在超过电机驱动器额定值的情况下运行，将会影响器件性能和可靠性，从而导致意外行为/快速磨损。

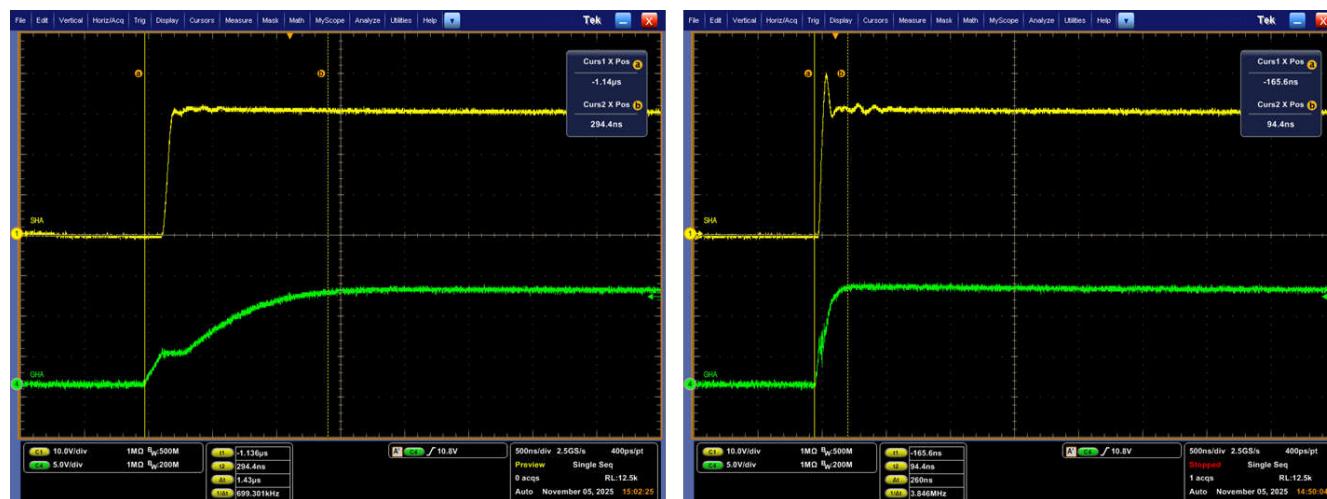


图 3-1. 栅极电流对压摆率和振铃的影响：a) 栅极电流 - 64mA (左) ；b) 栅极电流 - 1024mA (右)

另一个经常被忽略的关键规格，是电机驱动器源节点可承受的绝对最大压摆率。许多旧器件和主要竞争器件的绝对最大压摆率规格为 $1V/\mu s$ ，从而限制了开关速度。还值得注意的是，MOSFET 电压漏源压摆率不是线性的，而是类似于 S 曲线，因为这是电容充电的模拟特性。这意味着，压摆率可能高于中间部分的器件额定值。对于需通过探索更快压摆率开关速度以提升开关效率的客户而言，这构成了一项严重限制。德州仪器 (TI) 的新款 48V 驱动器 [DRV8363-Q1](#) 是专门针对这一考虑因素而设计的，并在源极节点上提供最大 $20V/ns$ 压摆率容差。[DRV8363-Q1](#) 的新额定值可提高系统稳健性，以实现更快的压摆率，从而避免驱动器成为系统性能的限制因素。

添加 RC 缓冲器或遵循适当的 PCB 设计实践，可以减少振铃的影响。最后，系统设计工程师在为系统选择栅极电流之前，必须考虑 EMI 限制和驱动器电压额定值。任一侧各有优缺点，包括 PCB 对寄生效应的整体稳健性，这些寄生效应会影响系统的理想压摆率。

4 摘要

随着 BLDC 系统在汽车系统中过渡到 48V，必须注意的是，MOSFET 开关损耗不再可以忽略不计。损耗从导通主导转变为开关主导，这一变化改变了电机驱动系统的优化策略。

更高的压摆率有助于减少开关损耗，但必须考虑更快压摆率（例如 EMI 和振铃）的不利影响。如果压摆率过大，系统可能容易受到电压过冲、电容耦合甚至非预期导通的影响。PCB 布局和正确选择拉电流和灌电流设置对于优化系统至关重要。通过平衡这些因素，设计人员可使用 [DRV8363-Q1](#) 创建一个稳健可靠的 48V 系统，而 DRV8363-Q1 不受器件压摆率能力的限制。

5 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[DRV8363-Q1 具有精确电流检测和高级监控功能的 48V 电池三相智能栅极驱动器](#)数据表。
- 德州仪器 (TI)，[DRV8363-Q1EVM 评估模块](#)。

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出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