

Application Note

适用于工业和汽车应用的 48V BLDC 驱动器 - 为集成式电机设计助力



Manu Balakrishnan, Nihal Palankar, Pratyush Saxena

摘要

无刷直流 (BLDC) 电机广泛用于工业和汽车应用，可实现卓越的系统效率、更长的使用寿命和紧凑的设计。这些应用使用的是各种低电压输入电源，如 5V、12V、24V、36V、48V 直流 (工业应用) 和 12V、24V、48V (汽车应用)。行业最新趋势是更广泛地采用 48V 电源，这有助于降低总体系统成本、提高效率，同时仍可支持低电压架构，从而最大限度减少安全问题。机器人、类人机器人、BLDC 电机模块和汽车系统等应用通常需要将电子元件集成到电机壳体中，以实现智能电机设计，并减少布线、EMI 和系统设计复杂性。

本应用手册介绍了 TI 最新的三相集成式 FET BLDC 驱动器 DRV8376 (70V、4.5A 峰值)，并描述了 DRV8376 如何帮助设计出应用的驱动电压高达 48V 的紧凑型 BLDC 驱动器。

内容

1 简介.....2

2 应用概述.....2

2.1 用于汽车的 48V HVAC 阀门和执行器.....2

2.2 楼宇 HVAC 阀门和执行器.....2

2.3 采用 48V 电源的工业应用.....3

3 适用于 48V 应用的集成式 FET 三相电机驱动器 DRV8376.....3

4 用于高性能系统设计的 DRV8376.....5

4.1 为 48V BLDC 电机驱动器应用助力.....5

4.2 高度集成的紧凑型设计.....5

4.3 更高的电力输送和效率.....5

4.4 更大的爬电距离和电气间隙.....6

4.5 更高的电机控制精度.....6

4.6 集成式保护.....6

4.7 EMI 优化.....7

5 总结.....8

6 参考资料.....8

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

过去，四轮汽车系统在车身、ADAS 和信息娱乐子系统上使用 12V 的电源。但是，48V 的采用率越来越高，这主要得益于以下几方面的优势：效率显著提升，系统成本大幅降低，铜线布线成本得以节省，整体尺寸与重量双双减少。此外，在低电压 (48V) 设计中，不仅能实现更低的排放量，还无需满足严苛的高电压安全要求。48V 电源广泛用于工厂自动化、机器人、医疗、服务器和电信等工业应用。针对恒温器、阀门等轻负载，住宅和商用暖通空调 (HVAC) 系统使用的是 24V 交流电源。这些应用通常由采用 BLDC 电机控制算法的微控制器单元 (MCU)、用于 H 桥的 MOSFET、用于控制 MOSFET 导通/关断的栅极驱动器、用于实时检测电机相电流或转子位置的检测电路、LDO 和系统级保护功能组成。这些设计通常需要利用紧凑且精确的 BLDC 驱动器，以将电子元件集成到电机中，从而降低系统成本并提高系统效率。

2 应用概述

2.1 用于汽车的 48V HVAC 阀门和执行器

图 2-1 展示了使用 BLDC 电机驱动器、以 48V 电源驱动的 HVAC 阀门或执行器的简化方框图。阀门的位置根据来自电子控制单元 (ECU) 的命令进行调整。采用 48V 电源的汽车系统可降低相同电机功率的电流要求，从而带来以下改变

- 铜布线减少
- 电力输送量增加
- 系统效率提高
- 成本和重量降低

为了将电子器件集成到电机上，汽车系统中的新型智能电机需要采用紧凑型设计，并且在 48V 的低电流设计下更容易实现。

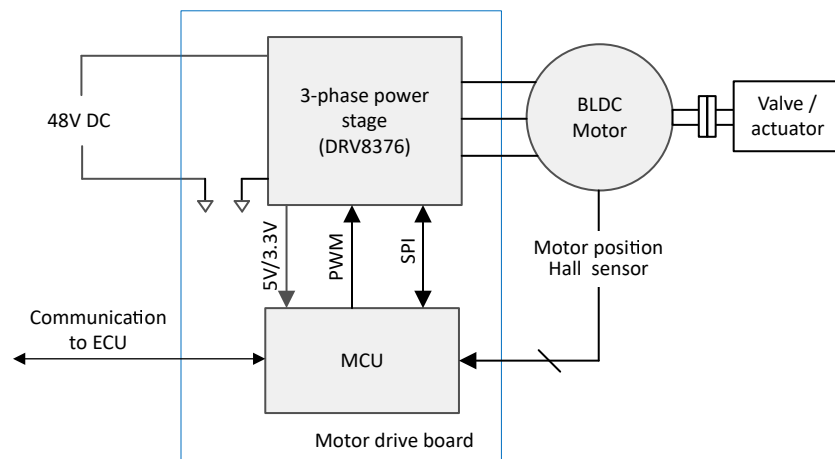


图 2-1. 汽车 HVAC 系统中的 BLDC 电机驱动器应用图

2.2 楼宇 HVAC 阀门和执行器

阀门和执行器位于 HVAC 系统中，用于控制空气处理单元和区域控制器单元中的气流，以实现出色的冷却/加热调节。这些系统设计通常需要精确的电机控制，以便根据 HVAC 控制器或恒温器发出的命令控制阀门或执行器的位置。图 2-2 显示了该系统的典型方框图。驱动电源通常为 24V 的交流电，可提供 34V 的整流电压（峰值电压高达 42V、在 24V 交流线路电压下的容差为 20%）。

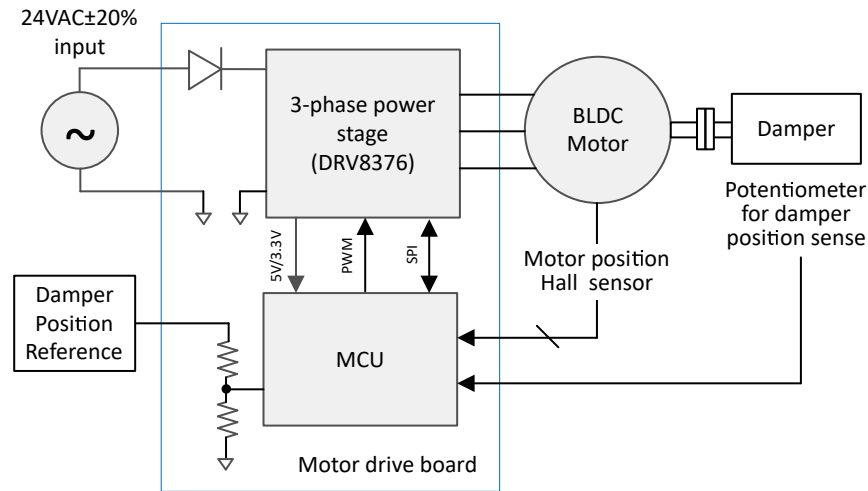


图 2-2. 楼宇 HVAC 系统中的 BLDC 电机驱动器应用图

2.3 采用 48V 电源的工业应用

2.3.1 机器人和类人机器人

对于机器人和类人机器人设计而言，通常需要将电子元件集成到电机中，以减少布线并实现紧凑的设计。48V 电源降低了对相同功率的电流要求，而更多的单芯片驱动器使设计变得紧凑。为了实现紧凑型设计，还需要精确的电机控制以及具有低死区时间和传播延迟的电机驱动器。

2.3.2 服务器和电信

过去，电信系统使用 48V 电源来实现更好的电力传输效率。从过去采用 12V 电源转变为现在采用 48V 电源的服务器冷却系统也越来越受欢迎，因为它可以降低配电损耗、提高系统效率并实现紧凑型设计。

3 适用于 48V 应用的集成式 FET 三相电机驱动器 DRV8376

DRV8376 是一款单芯片三相功率级，用于驱动 4.5V 至 65V 的 BLDC 电机。DRV8376 集成了三个 1/2H 桥，具有 70V 的绝对最大电压以及经过优化的开关和低 $R_{DS(ON)}$ (每个 FET 为 200mΩ) MOSFET，可提供大功率驱动能力。电机电流可以使用无分流集成式电流检测电路进行检测，从而消除对外部检测电阻和电流检测放大器的需要。带有集成式 LDO 的电源管理功能可生成 3.3V (AVDD) 和 5V (GVDD) 的必要电压轨，可用于为外部电路供电。

图 3-1 所示为 DRV8376 的简化应用原理图。



4 用于高性能系统设计的 DRV8376

4.1 为 48V BLDC 电机驱动器应用助力

DRV8376 的最大运行电压额定值为 65V，绝对最大额定电压为 70V。高额定电压使得 DRV8376 成为 48V 工业和汽车应用的理想之选，这些应用的最大电压容差高达 60V。该器件集成了过压保护功能，可用于在直流电压超过过压保护阈值时将所有 MOSFET 置于 Hi-Z 中。

4.2 高度集成的紧凑型设计

该器件集成了六个具有集成式栅极驱动器的 N 沟道 MOSFET。高侧栅极驱动器使用基于电荷泵的电源和一个集成式电容器，仅需使用一个外部电容器。集成式无分流电流检测、LDO 和多级保护消除了对外部元件的需求。所有集成均以 6x4mm 封装的形式提供。表 4-1 列出了相较于分立式方法的 DRV8376 集成，并说明了可节省 40 多个外部元件这一优势。

表 4-1. 相较于分立式方法的 DRV8376 集成

DRV8376 集成	分立式实现中的元件数量
六个 N 沟道 MOSFET	六个 N 沟道分立式 MOSFET
具有集成式栅极电流控制选项的三相栅极驱动器	1 个三相栅极驱动器、12 个电阻器（6 个栅极电阻器和 6 个栅源电阻器）
一个集成式电荷泵电容器和一个外部电容器	两个外部电容器
三无分流器电流检测	用于增益配置的 3 个分流电阻器、3 个电流检测放大器和超过 12 个电阻器
3.3V 和 5V LDO	1 或 2 个外部 LDO
多级保护	多个无源元件和比较器

4.3 更高的电力输送和效率

DRV8376 集成了开关损耗经过优化的栅极驱动器，此驱动器可通过更高的转换率（24V 时的典型值为 1.1V/ns），最大限度地降低开关期间的电压-电流 (VI) 重叠损耗。较短的死区时间可降低二极管传导损耗。集成的无分流电流检测功能可消除外部分流电阻器中的损耗。更短的死区时间和传播延迟有助于充分利用直流总线电压，并通过降低电机电流实现相同的电力输送，从而进一步减少电机铜损耗。

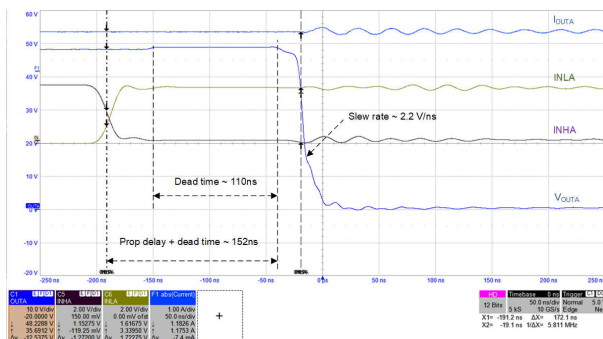


图 4-1. DRV8376 电压下降沿转换率

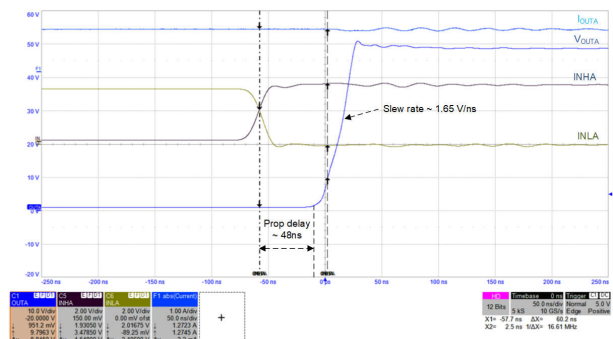


图 4-2. DRV8376 电压上升沿转换率

图 4-1 显示了在直流电源为 48V、负载电流为 1A 的情况下，DRV8376 的下降沿转换率（电流从电机绕组流入相位节点）。图 4-2 显示了在直流电源为 48V、负载电流为 1A 的情况下，DRV8376 的上升沿转换率（电流先流入相位节点，然后流入电机绕组）。观察到的传播延迟小于 50ns，死区时间约为 110ns。极低的传播延迟和死区时间有助于最大限度地减少电机电流失真，实现精确的平均电机电流检测并提高电机的可用电压。

4.4 更大的爬电距离和电气间隙

DRV8376 采用的是 6x4mm QFN 封装，在预期电压高达 V_M 时，引脚之间的间隙 0.6mm。例如，当 $V_M = 48V$ 时，器件增加了这些高电压引脚（包括 V_M 、 OUT_x 、 CP 至 GND ）之间的间隙。图 4-3 表示间隙为 0.6mm 的引脚。

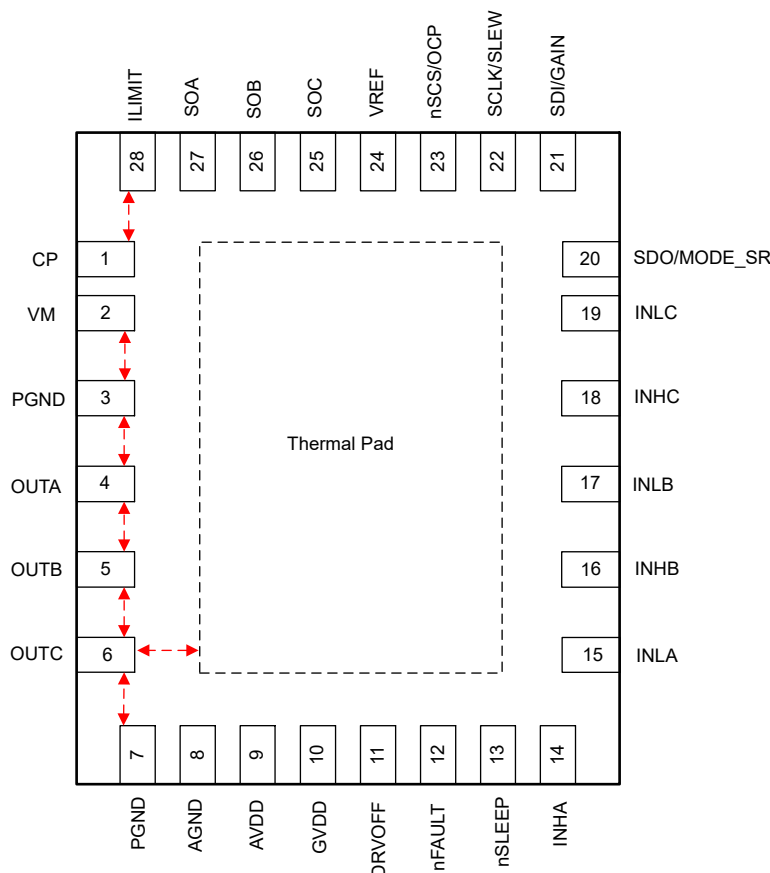


图 4-3. DRV8376 封装显示了更大的间隙

4.5 更高的电机控制精度

DRV8376 的开关功能经过优化，可将死区时间降至 150ns 以下，并将传播延迟降至 100ns 以下。对于最大限度地减少电机中的电流失真以实现精确和安静的电机控制而言，低死区时间、传播延迟和传播延迟不匹配至关重要。在 HVAC 应用中，精确的阀门定位离不开精确的电机控制，以实现最佳的冷却/加热效果。

4.6 集成式保护

DRV8376 集成了多种保护功能，旨在实现可靠的系统设计，包括：

- 过流保护 (OCP)，可防止发生短路事件
- 逐周期电流限制 (ILIMIT)，可消除过载条件下的过热和应力
- 可配置的过压保护 (OVP)
- 电源和电荷泵欠压保护，可消除意外运行问题。
- 过热警告和关断 (OTW 和 OTSD)

该器件提供 SPI 选项，可进行详细的故障诊断和控制。图 4-4 显示了 DRV8376 在发生短路事件（电压为 48V）期间提供的过流保护功能。

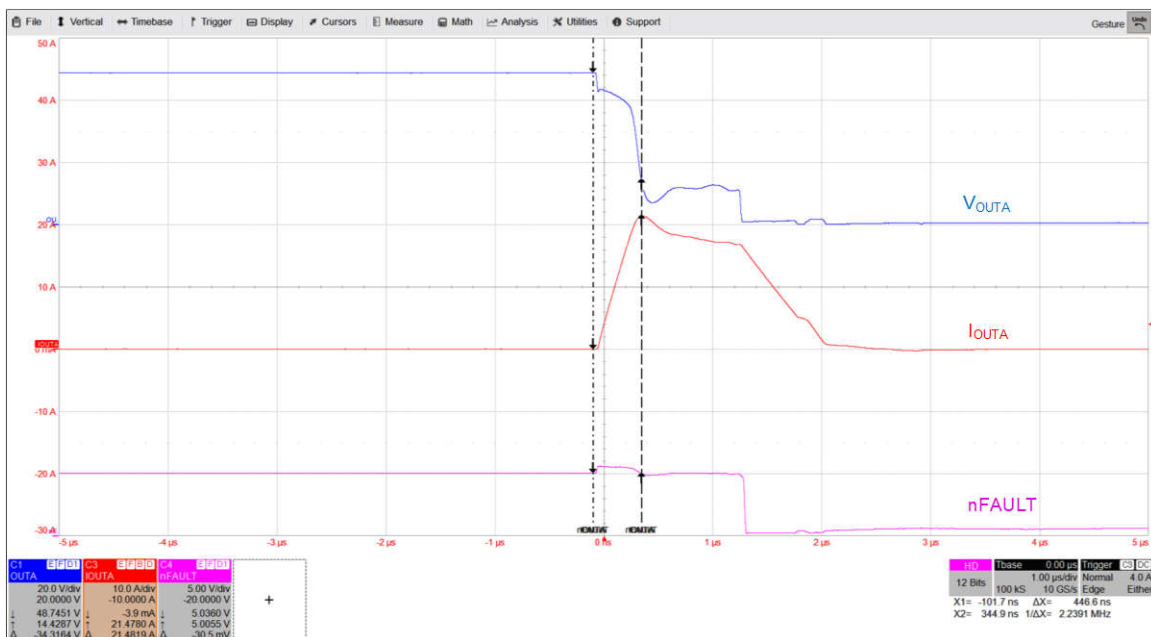


图 4-4. DRV8376 在发生短路事件 (电压为 48V) 期间提供的过流保护功能

4.7 EMI 优化

DRV8376 具有可调 OUTx 电压开关转换率 (dv/dt) 设置。对半桥的 MOSFET 实施可调栅极驱动电流控制，以实现压摆率控制。

MOSFET V_{DS} 转换率是优化辐射发射和与寄生效应相关的开关电压瞬态的关键因素。

在硬件型号中，每个半桥的转换率可以通过 SLEW 引脚进行调整，在 SPI 器件型号中则使用 SLEW 位进行调整。每个半桥都可以选择为 1.1V/ns、0.5V/ns、0.25V/ns 或 0.05V/ns 的转换率设置。转换率根据 OUTx 引脚电压的上升时间和下降时间计算得出。

5 总结

得益于效率提升、系统成本降低、铜线布线成本得以节省、整体尺寸和重量减少以及排放量更低，48V 的采用率在汽车和工业应用中越来越高。TI 的三相集成式 MOSFET 电机驱动器 DRV8376 具有 70V 的绝对最大额定电压，得益于布线减少、EMI 经过优化和集成了保护措施，电子元件才能集成到具有高集成度的电机，48V BLDC 电机驱动器的设计才得以简化。

6 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[DRV8376 三相集成式 FET 电机驱动器](#)，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、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