

## Application Note

## 将有效载荷与无刷直流电机驱动器规格相关联



Akshay Rajeev Menon

## 摘要

工厂自动化和机器人的发展通过提高消费品生产的速度、精度和数量，彻底改变了现代制造工艺。曾经的劳动密集型任务现在已经实现自动化，从而产生了更高效的制造技术。先进的电机模块是用于驱动这些机器人的驱动力，可提供较高的精度和功率，从而根据需要移动负载和执行任务。具有安静运行、高速和高扭矩密度的无刷直流 (BLDC) 电机是这些应用的首选。

TI 的无刷直流产品系列提供各种电机驱动器，这些驱动器可用于驱动机器人和工厂自动化系统的 BLDC 电机。本应用手册介绍了如何将电机功率与电流相关联，以及如何确定电机驱动器是否能够驱动提供电机功率所需的 MOSFET。本应用手册还介绍了 TI 智能栅极驱动技术如何在调整开关速度时提供广泛控制，从而使电机驱动器能够驱动各种 MOSFET。

## 内容

1 引言.....	2
2 系统电源要求.....	2
3 电机电流和 MOSFET 选择.....	2
3.1 BLDC 电机驱动器系统如何工作？.....	2
3.2 电机电流与 $Q_G$ 值的关系.....	3
3.3 电机驱动器的作用.....	4
3.4 我的 MOSFET 能否被驱动或换向？.....	4
4 需要考虑的电机驱动器规格.....	5
4.1 DRV8353 - 内部生成的栅极驱动电源.....	5
4.2 DRV8161/DRV8162 - 外部生成的栅极驱动电源.....	5
5 TI 具有智能栅极驱动功能的 BLDC 驱动器的优势.....	5
6 最大拉电流和灌电流以及 $Q_{GD}$ .....	6
7 旧设计.....	7
8 总结.....	8
9 参考资料.....	8

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

在设计电机驱动器系统时，主要考虑的是在最终应用的机械限制范围内移动有效载荷所需的功率。直接驱动有效载荷所需的扭矩与电机的功率要求相对应。所选电机需要符合系统总线电压的额定值，并且能够提供应用所需的电流。

## 2 系统电源要求

大多数新兴机器人应用都在 48V 电压轨上运行，所需功率从小型机器人的几十瓦到用于提升大型有效载荷的协作机器人的几十千瓦不等。

所移动负载的重量可能从几公斤到几百公斤不等，设计人员可以将此值转换为通过 MOSFET 的总线电源所需的功率。

方程式 1 中所示的公式说明了功率与电压和电流成正比的关系。

$$P = V \times I \quad (1)$$

电机电压是电机的额定电压，可由系统的总线电压电源确定。电机电流可由电机驱动的负载确定。设计人员需要验证电机是否能够处理应用所需的电流。

为大功率应用选择电机驱动器时的一个常见问题是栅极驱动器是否能够驱动为应用选择的 MOSFET。以下各节将说明 BLDC 电机驱动器设计的工作原理，并介绍两个不同功率范围的示例 MOSFET，这些 MOSFET 可由 TI 的 BLDC 栅极驱动器驱动。

## 3 电机电流和 MOSFET 选择

### 3.1 BLDC 电机驱动器系统如何工作？

无刷直流电机使用电气换向来驱动三相电机。将调制的 PWM 信号作为输入应用于电机驱动器，以控制电机的扭矩和速度。BLDC 栅极驱动器用于控制 3 组半桥。来自控制器的输入命令通过驱动器的功率级进行调节，以生成 MOSFET 的栅极驱动电压。换向算法用于以应用所需的方式为电机供电。定子线圈上的磁场（来自施加的电压，与转子的磁场相互作用）用于使电机旋转。

在三相 BLDC 电机驱动器系统（图 3-1）中，电流使用排列在 3 对 H 桥中的 6 个 N 型 MOSFET 从电池提供给电机。

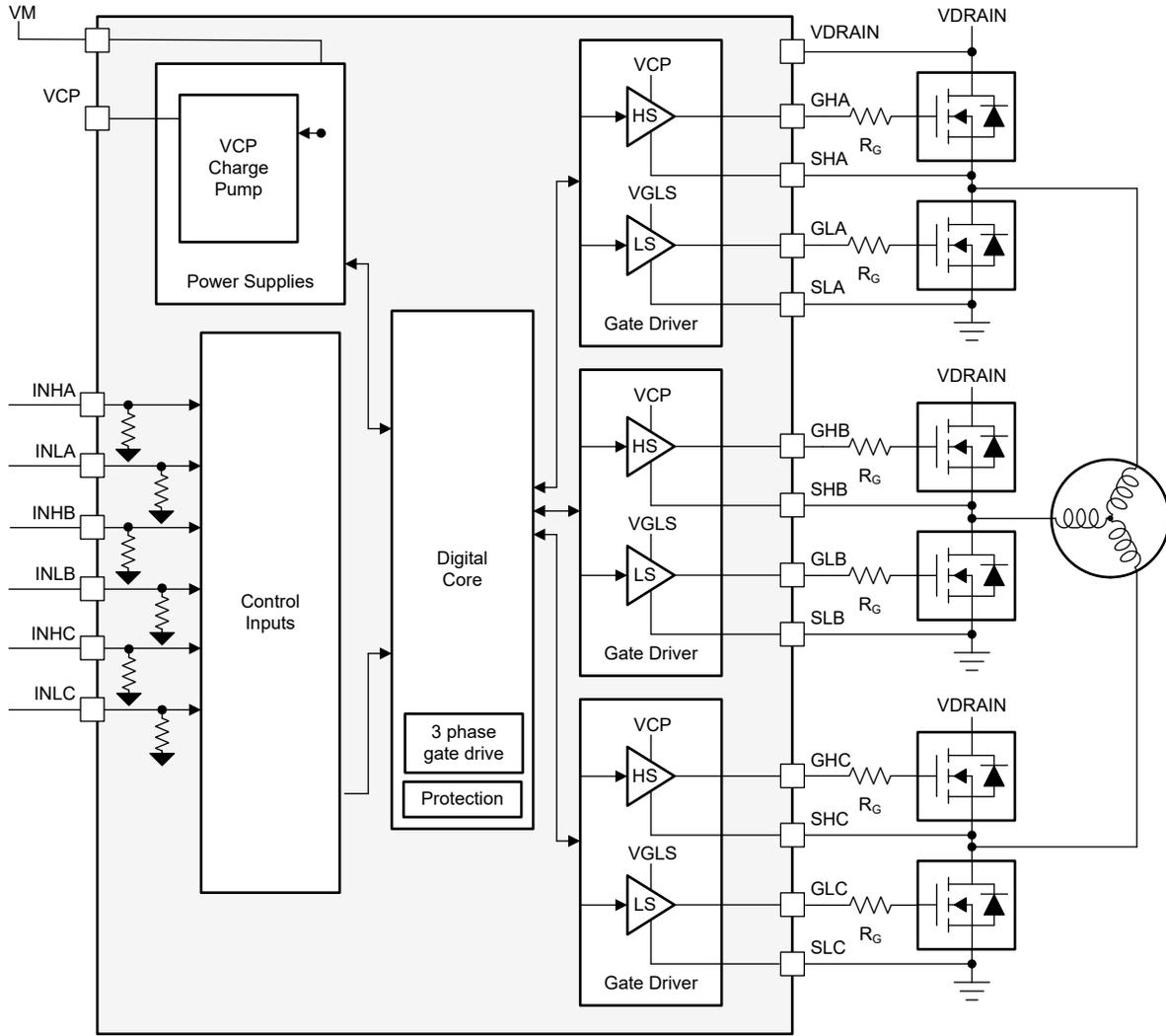


图 3-1. 三相 BDLC 电机驱动器

### 3.2 电机电流与 $Q_G$ 值的关系

MOSFET 可输送到电机的电流取决于 MOSFET 的漏极电流 ( $I_D$ ) 额定值。

若要开通 N 型 MOSFET，需要在 FET 的栅极和源极上施加差分电压以增强通道，从而为电流从漏极流向源极创建一条路径。图 3-2 展示了 N 型 MOSFET 的原理图。

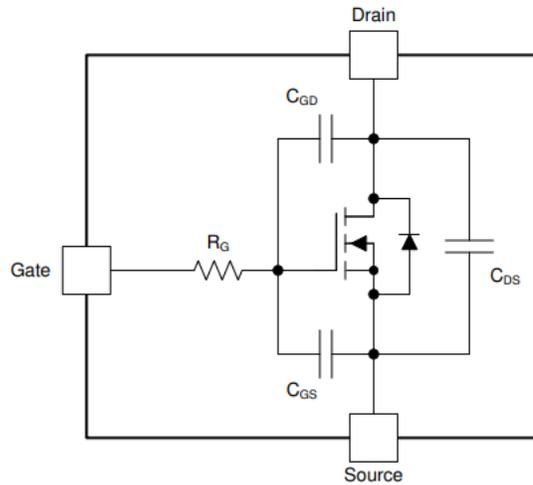


图 3-2. MOSFET 电路模型

要创建该通道，需要为 MOSFET 的栅极电荷电容 ( $C_g$ ) 充电。通常，MOSFET 的额定电流越大，开启 MOSFET 所需的栅极电荷就越大。

### 3.3 电机驱动器的作用

电机驱动器提供为栅极电容充电所需的栅极电流。通过调节电流，用户能够改变为栅极充电所需的时间。方程 2 展示了电流、电荷和时间之间的关系。

$$I = \Delta Q / \Delta t \quad (2)$$

### 3.4 我的 MOSFET 能否被驱动或换向？

为了确定选择用于驱动负载的 MOSFET 是否可以由电机驱动器驱动，设计人员需要考虑栅极驱动器能够提供的平均栅极电流。这是开关 MOSFET 时可以消耗的平均电流，具体取决于每个周期的开关频率和开关的 MOSFET 数量。

需要考虑的因素：

1. 要切换的 MOSFET 数量 ( 基于换向梯形与 FOC )
2. PWM 开关频率
3. MOSFET 的栅极电荷  $Q_g$

$$I_{AVG} = \# \text{ of MOSFETs Switching} \times \text{PWM Frequency} \times Q_G \quad (3)$$

#### 3.4.1 示例 1 - 中等功耗 (4.8kW - 48V × 100A)

##### 备注

以下 MOSFET 规格基于可用于所选电机电流的常见设计。

假设：

##### MOSFET A：

- $V_{DS} = 80V$
- $I_D = 150A$
- $Q_G = 130nC$
- $Q_{GD} = 30nC$
- $F_{PWM} = 20kHz$

开关 FET 数量 = 6

计算方法：

$$I_{AVG} = 6 \times 20\text{kHz} \times 130\text{nC} = 15.6\text{mA}$$

### 3.4.2 示例 2 - 高功率 (19.2kW - 48V × 400A)

#### 备注

以下 MOSFET 规格基于可用于所选电机电流的常见设计。

假设：

#### MOSFET B：

- $V_{DS} = 80\text{V}$
- $I_D = 500\text{A}$
- $Q_G = 180\text{nC}$
- $Q_{GD} = 40\text{nC}$
- $F_{PWM} = 20\text{kHz}$

开关 FET 数量 = 6

计算方法：

$$I_{AVG} = 6 \times 20\text{kHz} \times 180\text{nC} = 21.6\text{mA}$$

## 4 需要考虑的电机驱动器规格

以下是 TI BLDC 产品系列中额定电压为 100V、旨在驱动 48V 电机系统的栅极驱动器的两个示例。

### 4.1 DRV8353 - 内部生成的栅极驱动电源

DRV8353 使用电荷泵架构生成高侧驱动电压，并使用线性稳压器生成低侧栅极驱动电压。

使用较大的功率示例 2 时，栅极驱动器需要 21.6mA 的平均栅极电流。更具体地说，高侧电源的 10.8mA 和低侧电源的 10.8mA。

数据表指出，在 15V VM 时，驱动器可以从 VCP (高侧电源) 输出高达 25mA 的电压，并从 VGLS (低侧电源) 输出高达 25mA 的电压。因此，该驱动器能够在如此高的功率下驱动负载。

### 4.2 DRV8161/DRV8162 - 外部生成的栅极驱动电源

DRV816x 系列器件采用自举拓扑，该拓扑通过 GVDD 引脚从外部提供栅极驱动电压。使用外部提供的电压为自举电路充电并提供低侧 VGS 电压，可以从该外部电源获取平均栅极电流。只要外部电源设计得当，能够提供为自举充电所需的电流并为所选 MOSFET 提供低侧栅极电荷，就可以使用该驱动器驱动所述 MOSFET。对于示例 2，需要设计外部电源来支持 21.6mA 的平均栅极电流。

## 5 TI 具有智能栅极驱动功能的 BLDC 驱动器的优势

在驱动 MOSFET 时，一个重要的考虑因素是确定栅极充电的速度，因为它决定了 MOSFET 的压摆时间。MOSFET 将漏极电压连接到源极所需的电荷以及驱动器配置为提供该电荷的速率决定了 VDS (漏源电压) 压摆率。VDS 压摆发生在 MOSFET 栅极电荷的  $Q_{GD}$  部分期间。图 5-1 展示了 MOSFET 的不同充电区域。通过增大栅极电流，MOSFET 能够更快地开通和关断，从而降低 MOSFET 的开关损耗。

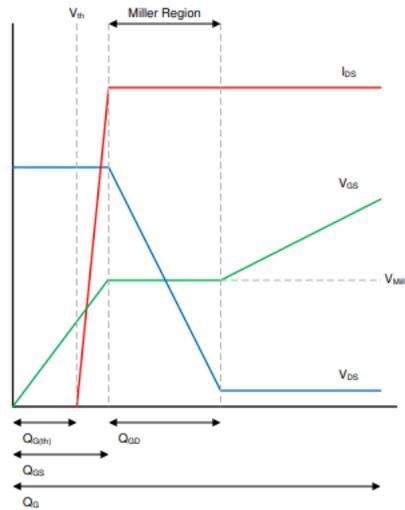


图 5-1. MOSFET 开通响应

借助 TI 的智能栅极驱动 (SGD) 技术，用户可以选择开通/关断 MOSFET 所需的峰值栅极驱动电流。有关 SGD 的更多信息，请参阅[了解智能栅极驱动应用手册](#)。

TI 的大多数 BLDC 驱动器分别提供 1A/2A 的峰值拉/灌栅极电流。SGD 提供许多不同的栅极电流调节级别，使驱动器能够调节 VDS 压摆率，并使驱动器能够与各种尺寸的 MOSFET 配合使用。

方程式 4 展示了如何计算实现所需压摆时间所需的峰值栅极电流。

$$T_{turn-on/turn-off} = \frac{MOSFET\ Q_{GD}}{I_{source/sink}} \quad (4)$$

表 5-1 计算了为前面示例中所述的 MOSFET 实现所需压摆率需要的峰值栅极电流。使用 SGD，用户可以选择最接近所需压摆率的电流电平。

表 5-1. 栅极电流和压摆时间计算

示例 MOSFET	栅漏极电荷	开通时间	关断时间	拉电流	灌电流
MOSFET A	QGD (nC)	开通 (ns)	关断 (ns)	I <sub>source</sub> (mA)	I <sub>sink</sub> (mA)
	30	100	50	300.0	600.0
		200	100	150.0	300.0
		300	150	100.0	200.0
		400	200	75.0	150.0
MOSFET B	QGD (nC)	开通 (ns)	关断 (ns)	I <sub>source</sub> (mA)	I <sub>sink</sub> (mA)
	40	100	50	400.0	800.0
		200	100	200.0	400.0
		300	150	133.3	266.7
		400	200	100.0	200.0

备注

通常，所选的关断时间要快于开通时间。

## 6 最大拉电流和灌电流以及 Q<sub>GD</sub>

为了提高机器人应用中的开关效率，高达 48V 的上升时间可低至 100ns。使用 1A 峰值源设置，可切换的峰值 Q<sub>GD</sub> MOSFET 计算公式如下：

$$100\text{ns} = Q_{\text{GDmax}}/1\text{A} \quad (5)$$

$$Q_{\text{GDmax}} = 100\text{nC} \quad (6)$$

在之前的**示例 2** (采用 19.2kW 应用) 中, 具有 40nC QGD 的 MOSFET 就足够了。因此, 如果需要, 该驱动器可以用于针对更高功率的应用进行扩展。

---

#### 备注

实际上, 实现极快的压摆率可能会导致开关节点振铃问题或其他与功率级相关的瞬态问题, 因此需要针对每个特定系统进行权衡。

---

## 7 旧设计

早期的电机驱动系统使用简单的三相栅极驱动器或半桥来驱动 MOSFET。其中一些器件具有 3A 至 4A 的峰值栅极驱动电流, 需要使用串联栅极电阻器来限制栅极电流。该电阻用于调节 VDS 压摆率。根据之前对上升或下降时间以及栅极电流的计算, 有证据表明 1/2A 峰值电流足以满足许多机器人和工厂自动化系统的要求。

借助 TI 的智能栅极驱动技术, 无需使用串联栅极电阻器, 从而降低了构建成本并节省了布板空间。

## 8 总结

工厂自动化和仿人机器人技术的兴起提高了生产和组装各种部件的效率和数量。这些进步的核心是无刷直流电机，能够提供这些应用所需的精确控制和高功率输出。这些系统所需的功率与电机驱动器功率级所需的电流直接相关。需要提升的有效载荷越重，电机输出扭矩所需的电机电流就越大。栅极驱动器可根据特定应用所需的 VDS 压摆时间来调整 MOSFET 栅极充电所需的栅极电流。

TI 的智能栅极驱动器能够提供高达 1/2A 的峰值拉/灌电流以及几个较小的栅极电流选项。因此，可以微调压摆率控制，以驱动工厂机器人中的高功率系统。通过提供不同的栅极电流电平，栅极驱动器可根据应用驱动各种尺寸的 MOSFET，同时可能消除非智能栅极驱动器中对串联栅极电阻器的需求。

## 9 参考资料

- 德州仪器 (TI), [DRV816x 具有集成式保护和电流检测放大器的 100V 半桥智能栅极驱动器](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI), [DRV835x 100V 三相智能栅极驱动器](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI), [了解智能栅极驱动器](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [适用于集成式电机驱动器的 48V、3.5kW 小型三相逆变器参考设计](#) 设计指南。
- 德州仪器 (TI), [三相与三个独立半桥栅极驱动器对比](#) 应用手册。

## 重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司