

Application Brief

用于无绳电动工具的 7-MOSFET



Jenson Fang, Kelly Tian

电动工具用于各种工业和家庭应用，例如钻孔、研磨、切割、抛光、驱动紧固件等。无绳电动工具使用电池电源驱动直流电机，不同产品具有不同的功率级别。

对于**高电流电平**应用，通常在电池和电机驱动器之间连接一个开关，以确保在连接或断开电源时安全操作。此外，断开开关可以减少设备的静态电流，从而在运输期间节省电力。

此场景中通常使用机械开关，因为其设计简单且成本低。但是，这些开关**不太可靠**。频繁开关会影响机械开关的寿命。开关期间可能会触发电弧，进而可能损坏电路板上的其他器件。

为避免机械开关引起的问题，可以使用电气 MOSFET 开关。由于电机逆变器通常包含 6 个 MOSFET 来驱动三相无刷直流 (BLDC) 电机，因此这个额外的 MOSFET 开关通常称为**第七个 MOSFET (7MOS)**。

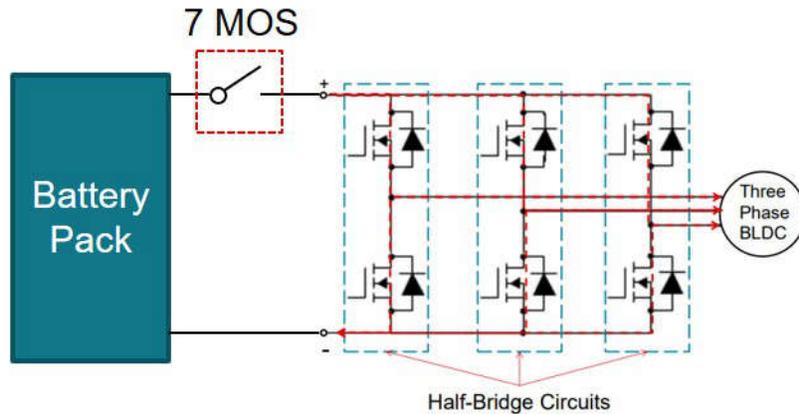


图 1. 无绳电动工具系统中的 7MOS

相应 7MOS 实施指南

7MOS 可以通过不同方式实施。要合适的设计，请浏览本章节确定您的需求。

要使用哪种类型的 MOSFET - NMOS 还是 PMOS ?

MOSFET 可分为两类：N 沟道 MOSFET (NMOS) 和 P 沟道 MOSFET (PMOS)。二者均可用作开关。与 PMOS 相比，NMOS 因实现相同额定电流的 $R_{DS(on)}$ 更低且尺寸更小，因此成本和功耗更低，广受欢迎。因此、本应用简报仅讨论使用 NMOS 的设计。

请注意，NMOS 需要由正 V_{GS} 驱动，这意味着栅极电压需要高于源极电压才能打开开关。如果 NMOS 放置在高侧，源极电压等于电源电压，那么栅极电压需要高于电源电压。为了实现该栅极电压，需要额外的驱动器电路。

表 1. 用作开关的 NMOS 与 PMOS

	$R_{DS(on)}$	成本	驱动器电路设计
NMOS	低	低	高侧控制所需的额外设计
PMOS	高	高	简单

要安装 7MOS 的电路板：电池侧还是电机侧？

通常，电池管理和电机控制在两个不同的电路板上实现，其中电池管理板放在电池附近（电池侧），电机控制板放在电机周围（电机侧）。7MOS 开关可以安装在任一电路板上。

无论开关置于何处，开关都可能增加 PCB 的尺寸、功耗和发热。要确定开关位置，需要考虑哪一侧可以承受这些规格的下降。

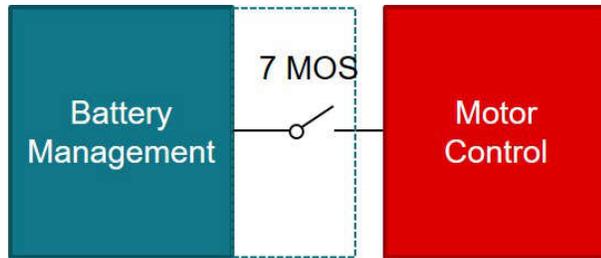


图 2. 7MOS 放置位置：电池侧

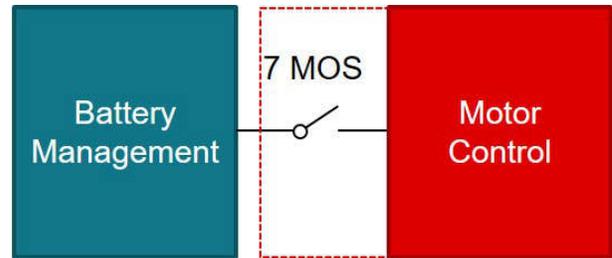


图 3. 7MOS 放置位置：电机侧

电池侧 7MOS

控制方法：高侧还是低侧？

在电池侧，可以将 7MOS 置于电源与负载之间（高侧）或负载与接地点之间（低侧）。

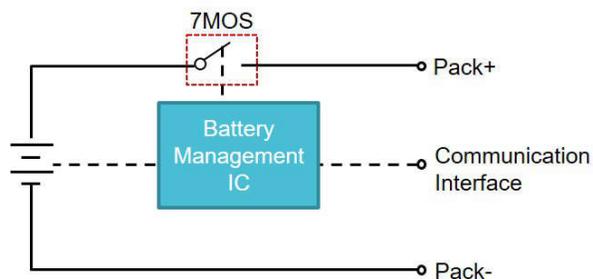


图 4. 电池侧 7MOS 控制
方法：高侧

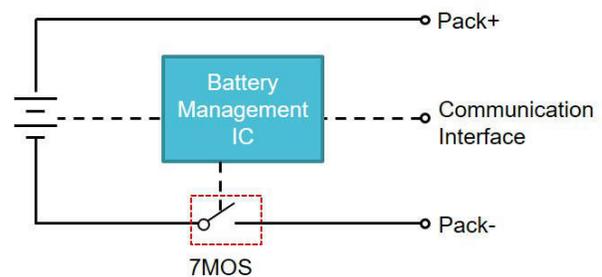


图 5. 电池侧 7MOS 控制
方法：低侧

当使用 NMOS 在低侧实现时，开关不需要比电源电压更高的栅极电压即可导通，可节省成本并减小额外电路所占面积。但是，缺点是当开关断开时，电路其他部分（通信、电机驱动器等）将失去接地基准。悬空接地是不安全的，并且在这种情况下，通信需要隔离。

尽管高侧 NMOS 开关需要驱动器电路生成高于电源的电压，但这种实现可以在整个系统中始终保持相同的接地基准。

表 2. NMOS 控制：高侧还是低侧

	接地基准	驱动器电路设计	系统成本
高侧 NMOS 控制	始终保持	需要生成高于电源的电压	高
低侧 NMOS 控制	在 NMOS 断开时切断	简单	低

FET 驱动器：集成还是外部？

需要驱动器电路来为 7MOS 生成控制信号。一些电池管理 IC 已经集成了 FET 驱动器，而另一些需要外部电路来实现此功能。

无论电池管理 IC 中是否集成了驱动器电路，此功能都必须是**低功耗的**。在电池侧，关断模式下电路板功耗受到严格控制，可在运输或长期存储期间实现较低的电池电量损耗。

集成 FET 驱动器的电池管理 IC 在设计阶段就已将驱动器功率纳入考量。因此可以实现低功耗目标。此外，集成驱动器可**节省成本，减小电路板尺寸和设计电路所需的额外工作量**。

可以使用**低成本**无源器件来构建用于低侧控制的外部驱动器电路，以传输来自 MCU 的控制信号。该电路**功耗低，但会占用一定的 PCB 面积**。

在设计用于高侧控制的额外驱动器电路时，通常使用驱动器器件来生成高于电源的控制电压，从而简化设计并减小面积。**驱动器器件需要审慎选择**，以便在关断模式下控制功耗。仍然需要无源器件来为 IC 构建外设电路。可以为驱动器器件配置**额外的保护功能**（过压保护、过流保护等），但会增加**总成本**。

表 3. 电池侧 7MOS 控制：高侧与低侧、集成与外部 FET 驱动器

	控制方法	PCB 大小	主要成本
集成式 FET 驱动器	高侧	小	电池管理 IC
	低侧	小	电池管理 IC
外部 FET 驱动器	高侧	驱动器器件（小型）+ 无源器件（中型）	电池管理 IC + 驱动器器件
	低侧	无源器件（中型）	电池管理 IC

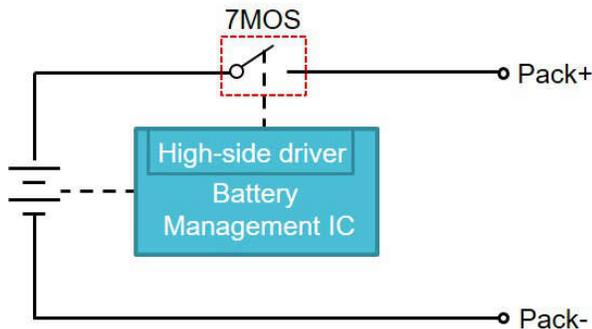


图 6. 适用于电池侧 7MOS 的 FET 驱动器
：集成式

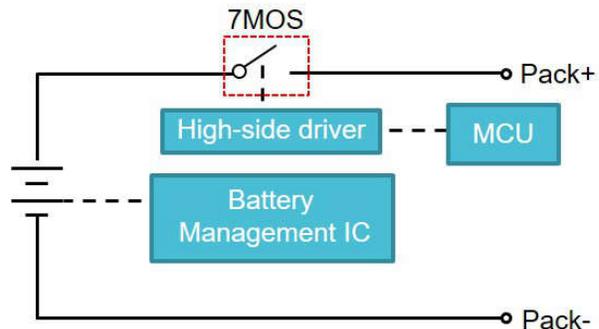


图 7. 适用于电池侧 7MOS 的 FET 驱动器
：外部

电机侧 7MOS

电机侧的情况与电池侧类似。可以对 7MOS 使用高侧或低侧控制，在关断模式下**对功耗的限制较小**。

对于低侧控制，由于电机驱动器 IC 通常未集成低侧 MOSFET 驱动器，因此可以使用**低成本**无源器件（像电池侧 7MOS 中一样）构建外部驱动器电路。

对于高侧控制，电机驱动器 IC 通常集成了 FET 驱动器，以驱动电机逆变器中的高侧 NMOS。不同的电机驱动器 IC 中的驱动器结构不同。有些驱动器支持额外的负载电流，有些则不支持。对于支持额外负载的驱动器，高侧控制仅需要含有低成本无源器件的简单外设电路。对于不支持额外负载的驱动器，则必须使用额外的驱动器。此驱动器可通过驱动器器件或无源电路来实现。驱动器器件的尺寸比无源电路更紧凑，并且可能具有额外的保护功能，但成本更高。

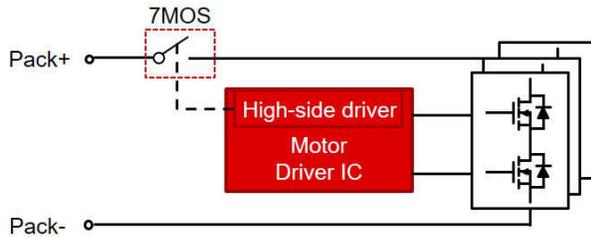


图 8. 适用于电机侧 7MOS 的 FET 驱动器：高侧

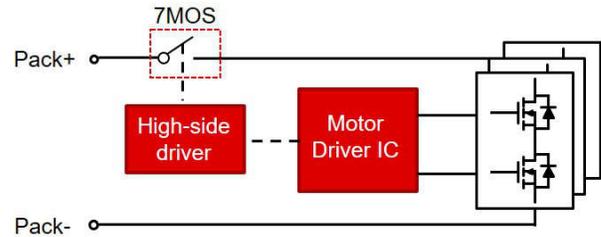


图 9. 适用于电机侧 7MOS 的 FET 驱动器：高侧

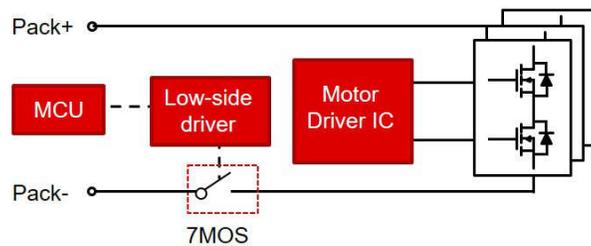


图 10. 适用于电机侧 7MOS 的 FET 驱动器：低侧

表 4. 电机侧 7MOS 控制：高侧还是低侧

	驱动器结构	PCB 大小	主要成本
高侧	支持额外负载	无源器件 (中型)	电机驱动器 IC
	不支持额外负载	驱动器器件 (小型) + 无源器件 (中型)	电机驱动器 IC + 驱动器器件
		驱动器电路 (大型) + 无源器件 (中型)	电机驱动器 IC
低侧	无	无源器件 (中型)	电机驱动器 IC

通过电源开关实现 7MOS 控制

高侧电源开关 IC 的内部具有电荷泵，可生成高于电源的电压。配置为 7MOS 控制器时，开关可由来自 MCU 的信号和相应引脚上的输出栅极电压触发。这些开关易于实现，并且集成度高，可节省 PCB 面积。如果不想更改电路板上的其他 IC，此设计非常有用。

尽管许多电源开关都集成了 MOSFET，但可能存在散热问题，因为电动工具应用中的峰值电流可能达到数十安培。因此，我们为此应用设计了具有分立式 NMOS 的电源开关。

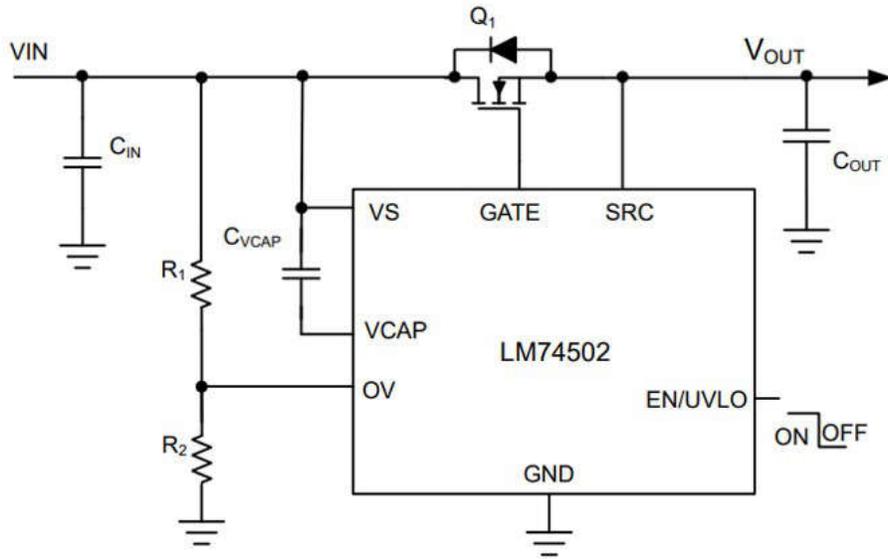


图 11. 通过电源开关实现 7MOS 控制 (LM74502)

不同类型的 IC 还会集成各种保护功能，例如反极性保护 (RPP)、反向电流阻断 (RCB)、过压保护 (OVP)、欠压锁定 (UVLO)、过流保护 (OCP) 等。

建议使用两种类型的电源开关：理想二极管/ORing 控制器和热插拔控制器。选择器件时，可以考虑以下规格：输入电压、功耗、封装面积、成本和所需的保护功能。

表 5. 建议的理想二极管、ORing、热插拔控制器

器件型号	输入电压 (V)	关断电源电流 (uA)	封装面积 (mm ²)	成本	保护特性
LM74502	65	1.5	8.12	低	RPP、UVLO、OVP 等
LM74500-Q1 , LM74501-Q1	65	1.5	8.12	低	RPP、UVLO 等
LM5050-1	80	475	8.12	中	RPP、RCB 等
LM5060	65	15	14.7	中	OVP、UVLO、OCP 等

德州仪器 (TI) 高侧 7MOS 控制设计

如前所述，实现高侧 7MOS 控制的一个主要挑战是生成高于电源的栅极控制电压。本节重点介绍如何解决这一挑战。

可以考虑以下方法：

电机侧

- 添加电源开关
- 使用集成了 FET 驱动器的电机驱动器 IC

电池侧

- 添加电池保护器或低功耗电源开关
- 使用集成了 FET 驱动器的电池监控器

通过电机驱动器 IC 实现 7MOS 控制

大多数 BLDC 电机驱动器 IC 都集成了电荷泵或自举结构，用于导通电机逆变器中的高侧 NMOS。这部分电路也可重复使用来控制 7MOS。

- 集成了电荷泵的电机驱动器 IC

应用手册《高电流电机驱动应用中的关断开关》介绍了这一设计。电机驱动器 IC 的 VCP 引脚可以提供电源 +10V 的电压来导通 7MOS，这要借助低成本但会占用面积的分立式电路来实现。

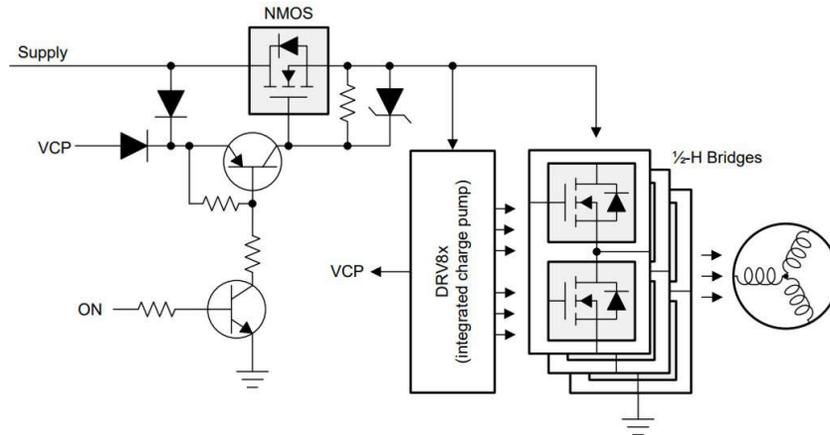


图 12. 通过电机驱动器 IC (集成电荷泵) 实现 7MOS 控制

- 具有集成自举功能的电机驱动器 IC

单独的自举架构无法生成电源 +10V 的电压来控制 7MOS，因为这需要依赖电机逆变器的开关操作来保持恒定的电压。具有自举架构的德州仪器 (TI) 器件 (例如 DRV8328 和 DRV8329) 中使用了涓流电荷泵，以便在输入 PWM 占空比接近 100% 时提供高侧 NMOS 栅极电压 (电源 +10V)。不过，涓流电荷泵只能承受极轻的电流负载，难以直接驱动 7MOS。可以使用驱动器电路来驱动 7MOS，下面是使用 DRV8328 和驱动器电路来驱动 7MOS 的一个示例：

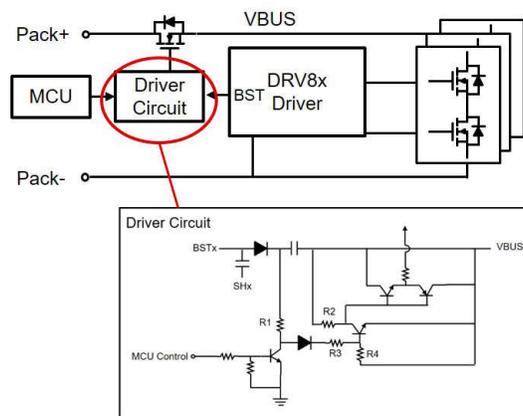


图 13. 通过电机驱动器 IC (集成自举结构) 实现 7MOS 控制

电阻器 R1、R2、R3 和 R4 需要审慎选择，因为这些电阻器可能会形成从自举架构到 VBUS 的无用电路并承载负载电流。

此外，最好使用大电阻值来减轻涓流电荷泵的负载电流负担。高电阻也会使电路容易受到噪声和干扰的影响，并减慢开关速度。

演示中选择了 MΩ 级的电阻器作为 R1、R2、R3 和 R4。在实际应用中，可以选择较小的电阻值 (100kΩ 级)，但需要先导通逆变器中的低侧 NMOS 一段时间，以确保自举电容器充满电。

我们构建了一条演示电路，测试结果如图 14 所示，其中通道 1 是 MCU 控制信号、通道 2 表示电机逆变器中高侧 NMOS 的漏极电压 (VBUS)：

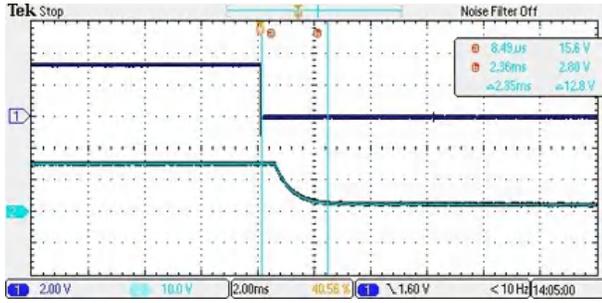


图 14. 使用驱动器电路导通 7MOS

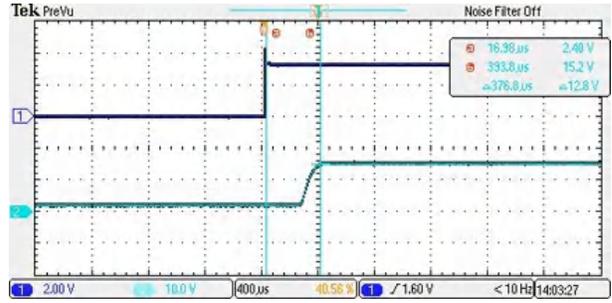


图 15. 使用驱动器电路关断 7MOS

当 7MOS 导通时，电池电源 (15V) 连接到电机逆变器，VBUS 等于电源电压；当 7MOS 关断时，电池电源断开，VBUS 通过接地负载电阻器下拉至低电压电平。这样，MCU 就可以成功控制 7MOS，以通过此驱动器电路连接或断开电源。

演示设计采用低成本无源器件和 JEFT 构建，但占用的 PCB 面积约为 30mm×30mm，这对紧凑型设计来说是一个问题。

以上只是一个示例。在这种情况下，MOS 无法非常快速地导通和关断，也无法支持完全 100% 占空比运行。我们需要注意这一点。

表 6 列出了建议的器件：

表 6. 建议的电机驱动器 IC

器件型号	驱动器结构	最大输入电压
DRV8320 、 DRV8323	电荷泵	60V
DRV8350 、 DRV8353	电荷泵	100V
DRV8328 、 DRV8329	自举	60V
DRV8334	自举	60V
DRV8161 、 DRV8162	自举	100V

对于具有自举架构的电机驱动器 IC，德州仪器 (TI) 的未来产品可以升级驱动器设计，以支持更高的负载电流并实现更小尺寸的外设电路。

通过电池保护器或低功耗电源开关实现 7MOS 控制

如 [FET 驱动器：集成还是外部？](#) 中所述，在电池侧必须使用低功耗器件，以便在关断模式下节省电池电量。为此，设计人员可以使用具有驱动器功能的电池保护器或低功耗电源开关。

德州仪器 (TI) 的电池保护器 BQ76200 在关断模式下消耗的电流低于 9.5µA。该器件集成了一个电荷泵并可以由外部信号 (来自 MCU 或电池监控器) 控制，符合 7MOS 控制的要求。

也可以在此处使用 [通过电源开关实现 7MOS 控制](#) 中介绍的低功耗电源开关。凭借低于 20µA 的关断电流消耗，这些器件还可以帮助控制功率预算。

表 7. 建议的电池保护器或低功耗电源开关

器件型号	类型	关断电源电流 (uA)	最大输入电压 (V)	封装面积 (mm ²)	成本	保护特性
BQ76200	电池保护器	9.5	27.5	32	高	无
LM74500-Q1、 LM74501-Q1	理想二极管	1.5	65	8.12	低	RPP、UVLO 等
LM74502	理想二极管	1.5	65	8.12	低	RPP、UVLO、 OVP 等
LM74700-Q1、 LM74701-Q1	理想二极管	1.5	65	8.12	中	RPP、RCB、 UVLO 等
LM5060	热插拔控制器	15	65	14.7	中	OVP、UVLO、 OCP 等

结语

7MOS 提供了一种连接或断开无绳电动工具电源的可靠方法。7MOS 可以通过采用高侧或低侧控制的 NMOS 晶体管来实现。实现高侧控制的主要挑战在于生成高于电源的栅极电压。表 8 总结了德州仪器 (TI) 的 7MOS 控制设计并对性能进行了比较。

表 8. 德州仪器 (TI) 的高侧 7MOS 控制设计

TI 设计	架构	建议的器件
电机侧		
通过电源开关控制 (理想二极管/ORing 控制器)	电机驱动器和电源开关	LM74502、LM7450x-Q1、LM7470x-Q1、 LM5050-1
通过电源开关控制 (热插拔控制器)		LM506x、TPS249x
通过电机驱动器 IC 控制 (电荷泵)	电机驱动器	DRV8320、DRV8323、DRV8350、 DRV8353
通过电机驱动器 IC 控制 (自举)		DRV8328、DRV8329、DRV8334、 DRV8161、DRV8162
电池侧		
通过电池保护器控制	电池监控器 + 电池保护器	BQ76200
通过低功耗电源开关控制	电池监控器 + 电源开关	LM74502、LM7450x-Q1、LM7470x-Q1、 LM5060
通过电池监控器控制	电池监控器	高侧：BQ769x2 低侧：BQ76905、BQ76907

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

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