

# 无刷直流电机及其驱动器的设计挑战与注意事项

作者：José Quiñones

## 简介

（利用电力）产生旋转运动是 18 世纪进行的首批电力实验之一——所发明的“电动旋转”装置实际上是一种静电反应电机，当时也只是被视为一种新奇的事物。如今，根据“4E 电机系统报告附件”（EMSA）[1]的数据，全球发电量的 53%由电机消耗。国际能源署（IEA）的另一份报告指出，电力成本通常构成了电机生命周期成本的 95%。如果用户改用最高效的电机和驱动器，全球电力需求到 2030 年可减少 24-42 太瓦时（TWh），相当于减少 16-26 千兆吨（Gt）二氧化碳排放。根据 2020 年的市场分析，这一市场价值近 1420 亿美元，预计年复合增长率为 6.4% [2]。

因此，无论从资本支出回报、运营成本，还是环境负担的长远角度考虑，我们都有充分的动力更新并采用性能最佳的智能电机控制器。此外，监管方面也面临着改进的压力，与效率相关的国际标准正在实施，例如针对线控交流电机的 IEC 60034-30-1，按效率高低将等级划分为 IE1 至 IE4。然而，理想的电机取决于具体应用，并且有一个可供选择的范围。Qorvo [4] 估计，在典型的西方富裕家庭，可能有 48 台感应电机、14 台有刷直流电机、4 台通用交流-直流电机和 26 台无刷直流电机。总共有 61 个线路供电和 31 个电池供电。

## 电机的分类

交流感应电机在包括工业在内的整个市场中占主导地位，份额约为 70%；以略低于供电线路交流频率的固定倍数的值“打滑”运行。单相电机用途广泛，但效率不高，需要借助电容器、开关或继电器的特殊启动模式。相比之下，三相电机功率更大、效率更高，且能够自启动。交流感应电机非常可靠又成本低廉，但其最简单的形式仅适用于恒速/恒载应用，如风扇和泵。在需要变速和变矩的情况下，可以选择变频驱动器（VFD）来驱动；这样可以使过程控制更为高效，用途更加广泛。理论上，VFD 可以加装到任何交流同步或异步电机上，但在实际应用中，如果不采取预防措施，它们会给绝缘效果带来压力，产生过多的 EMI 并引起共模电流和相关磨损。

真正的不“打滑”的同步电机也是一种选择，例如绕线转子同步电机（WRSM）或同步磁阻电机（SyRM）；此种电机效率高，但成本也较高，应用不太广泛。

“自换向”电机不直接依赖交流电源逐步旋转磁场而产生吸引力和排斥力来随之转动。这类电机通常使用“电刷”，在转子转动时依次给转子上的线圈通电，从而保持持续的旋转扭矩。在该类别中，有刷直流或通用交直流类型的电机性能良好、结构紧凑，且启动扭矩大，初始成本低。因此，它们在包括小家电和工具在内的广泛应用中很受欢迎。其缺点在于需要对磨损的电刷进行维护，还通常会产较高的声学 and 电气噪音。有刷电机的速度控制相对简单，最高可达数万 RPM；但在直流电源的条件下，其控制方式通常效率较低，只采用“线性”稳压器或“直流斩波器”降低电压。对于使用交流电源的有刷电机，速度同样由所施加的电压控制，因此相位角控制通常使用三段双向可控硅，或者通过切换励磁线圈抽头进行粗略控制。直流和交流有刷电机都可以利用从传感器反馈至输入电压的闭环控制，来实现随负载变化的转速调节。

为了追求更高的效率、性能和更长的寿命，无刷直流 (BLDC) 电机脱颖而出。这些类型的电机通常有定子线圈和转子磁铁，需要可变电压和频率的多相交流电源才能运行，也就是 VFD 的一种。这可能会增加初始成本，但因其性能优势和节能效果（效率可能超过 96%），可以快速收回成本，同时维护费用非常低且使用寿命长。定子线圈驱动电子器件可使用电池作为便携式设备（如工具）的电源，也可以使用具有功率因数校正 (PFC) 的升压电源（适用于较大的电器）。由于设备的可控性和能效要求越来越高，BLDC 电机的潜在市场十分广阔，因此必要驱动电路的集成度和成本效益也越来越高。图 1 比较了一家制造商某些相同物理尺寸电机类型的简要特性。

|          | 通用电机          | 直流有刷电机      | 交流电机        | BLDC 电机 |
|----------|---------------|-------------|-------------|---------|
| 电压       | AC, DC        | DC          | AC          | 直流控制器   |
| 转速 (RPM) | 8,000-20,000+ | 1,000-5,000 | 1,600-3,400 | >50,000 |
| 马力       | 极高            | 中           | 中低          | 高       |
| 效率       | 55-70%        | 60-70%      | 40-80%      | >90%    |
| 使用寿命     | 中             | 中           | 极高          | 极高      |
| 维护       | 高             | 中           | 极低          | 极低      |
| 转速调节     | 差             | 中           | 良好          | 优秀      |
| 启动扭矩     | 高             | 极高          | 中低          | 极高      |

图 1，一家制造商的电机性能比较（资料来源：Groschopp）。

## 无刷直流电机：一探究竟

现在，我们将细致研究 BLDC 电机，特别是为定子绕组产生多相交流电所需的电子器件，以及如何实施控制以获得最佳性能。

三相 BLDC 的外形如图 2 所示；图中显示了“梯形”模式驱动下三个线圈的电压施加时序。驱动通常由六个半导体开关组成，通常为 MOSFET 或桥接配置的 SiC-FET 等带隙越来越宽的器件；其提供六个电压组合，每个相位之间有适当的“死区”时间，以避免“上下桥直通”（图 2）。当转子旋转 360 度时，相位切换通过轴上的传感器或其它方式触发，并依次启动。在没有反馈的情况下，电机最高转速由电源电压、转子位置检测与评估所导致的延迟，以及绕组电感决定。随着转速的增加和外加电压持续时间的缩短，电感会限制可达到的峰值电流，从而让扭矩逐渐降低。通过转子角度、速度和线圈电流的反馈，控制器必须精确把握正确的切换时点，以最大限度地提高扭矩，并将扭矩纹波（每转会产生多次周期性骤降，从而引起振动）降至最低。

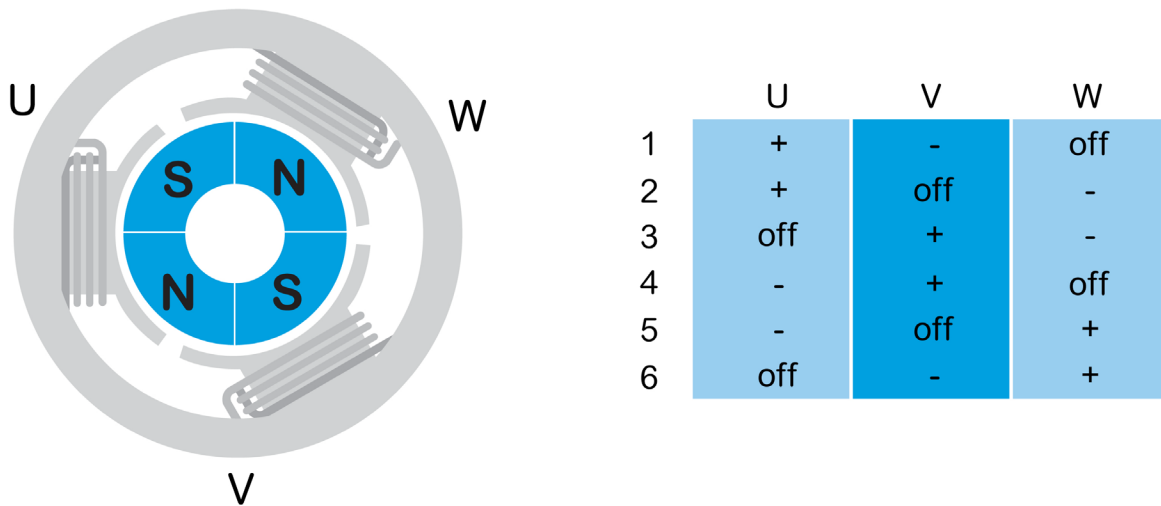
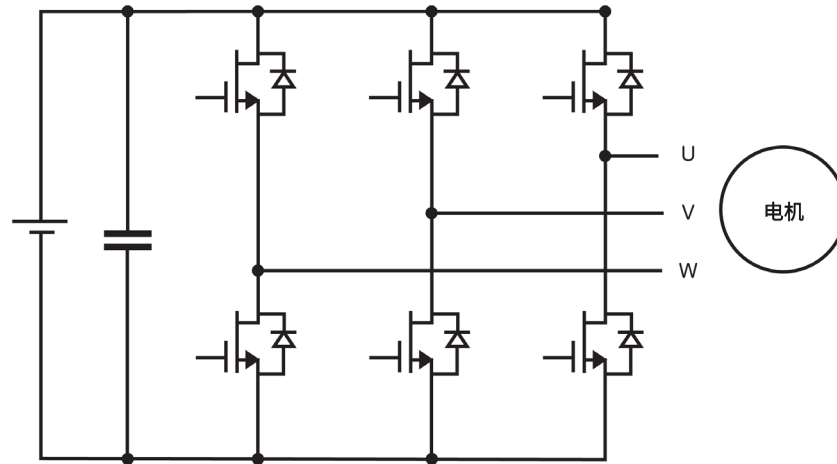


图 2，三相无刷直流电机的外形和所需驱动电压时序；此处所示为线圈的“梯形”模式驱动排列。



QORVO

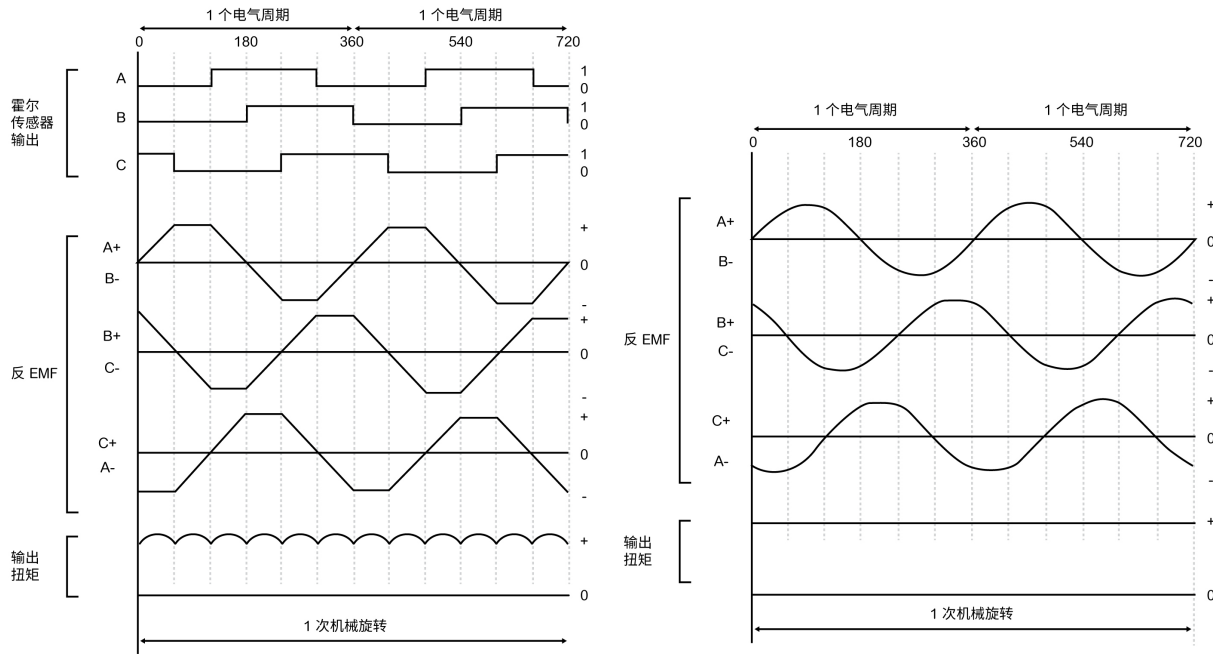
© 2023 Qorvo US, Inc.

图 3，桥接配置的开关提供 BLDC 驱动电压；此处所示为 Qorvo 的 SiC-FET 开关产品。

基于不同的应用，可根据连续最大、间歇扭矩以及速度要求等参数选择不同的 BLDC。BLDC 的优点在于最大扭矩与速度无关。额定功率和工作电压将被指定；其它参数可能包括绕组和传感器的绝缘额定值（以满足安全标准），以及内置位置传感器的类型（如有）。上述特性确定了 BLDC 驱动器在输出电压范围、频率范围（确定速度）和电流能力（包括过载条件）方面的性能要求。驱动器的控制器需要这些参数按比例缩放，并且必须根据可用的转子位置传感器类型进行设置。控制器软件中的算法基于重复率优化驱动信号到功率级的时间，以设置速度和脉冲宽度调制来设置扭矩。下面，我们将讨论可使用的换向方法和位置传感技术，以及它们之间的相互作用。

## BLDC 电机控制

首先，可以选择换向方式，即驱动定子线圈以确保连续旋转的模式。“六步梯形波”驱动方式在任何时候都将电流同时通过两个绕组，并使第三个绕组浮动，显示反电动势，以及可用于确定转子位置的过零点。所谓“六步梯形”是指图 2 中所示的六种驱动状态，以及定子绕组的物理集中分布；定子绕组会产生梯形的反 EMF（图 4 左）和不可避免的扭矩波动。与此相反，电机的绕组线圈可以更复杂的机械排列方式分布，在这种情况下产生的反 EMF 为正弦波（图 4 右）；理论上的零扭矩纹波使其在低速下运行更平稳，尽管实际实现中达到最大值的 1% 左右。此种 BLDC 电机被称为永磁同步电机（PMSM），其峰值扭矩和功率密度低于梯形换向的 BLDC 电机。PMSM 的所有绕组在任意时刻都被驱动，因此没有“浮动”绕组来指示转子位置，而通常需要一个单独的传感器。对于这两种换向方案，功率驱动器都均以高载波频率进行脉宽调制（PWM），形成所需的电压形状（梯形或正弦），以匹配反 EMF 的形状来获得最佳性能。PWM 的占空比设定了整体电压幅值，从而设定了扭矩需求。



QORVO

© 2023 Qorvo US, Inc.

图 4，BLDC 电机和永磁同步电机的反 EMF 波形。

电机换向类型的最佳选择取决于应用，六步梯形换向更容易实现，并能高扭矩条件下启动。驱动器中必须减少开关损耗，但它适用于电动工具等非常高速的情况。正弦换向电机成本较高，驱动算法也更为复杂，适用于对性能要求较高、启动扭矩有限，以及需要低速稳定运行的场合，例如通风机等。有些驱动方案采用梯形换向以高扭矩启动电机，然后在电机旋转时切换至正弦模式。

三个霍尔效应转子位置传感器可以与六步梯形换向一起使用；但针对成本敏感型应用，可使用反 EMF 的零交叉点。对于正弦换向，也可采用更昂贵的光学编码器或旋转变压器，以获得更佳的性能。

### 矢量或磁场定向控制

控制正弦换向 BLDC 电机的一种技术是矢量或磁场定向控制 (FOC) [3]。FOC 保证在整个速度范围内平稳运行，并带来快速加速减速的卓越动态性能。转子位置可由传感器确定；也可以通过“无传感器”方案测量绕组电流和电压，并结合电机特性“模型”来近似确定位置。对终端用户来说，FOC 的益处在于带来更高的精度和更小的电机，以及更低的成本与能耗。然而，FOC 比较复杂，需要电机控制器具备强大的处理能力。其启动时无法获得位置信息，因此有时会使用单独的开环驱动模式来“启动”电机，直到传感器或电流采样能提供有效反馈。

FOC 是一种正弦变频换向方法，可实现在任何条件下均保持转子和定子磁场成 90 度的理想状态，以获得最大扭矩，同时在负载变化的情况下调节速度和扭矩。为达成这一目标，需要对以下两个参数进行推导和优化控制：磁场磁链和扭矩。这些参数必须分离为正交分量（在定子静态坐标中相差 90 度），并可从转子位置和绕组电流中推导出来。三相绕组电流  $I_U$ 、 $I_V$ 、 $I_W$  首先通过 A-D 转换器，然后利用“克拉克 (Clarke)”变换法转换为等效的两相电流  $I_\alpha$  和  $I_\beta$ 。

$I_\alpha$  和  $I_\beta$  相对于定子是静止的。现在，我们通过“帕克 (Park)”变换法和旋转角  $\Theta$  得出旋转坐标  $I_q$ 、 $I_d$  ( $q$ =交轴， $d$ =直轴)，分别代表磁场扭矩和磁链。确定  $I_q$  和  $I_d$  后，可将其与目标值  $I_{qref}$  和  $I_{dref}$  比较，以及通常由比例积分 (PI) 控制器生成的补偿误差信号进行比较。输出的信号与实际值和参考值间的差值成正比，也与差值的积分成正比；结果是良好的动态响应，几乎没有过冲和欠冲。现在要将补偿信号转换回用于电机绕组的三相驱动电流，因此要进行反向帕克变换和反向克拉克变换，并为功率桥的开关生成驱动信号。采用脉宽调制可获得正弦驱动电流；其有效值与所需扭矩相对应。图 5 给出了一个典型的 FOC 方案框图。

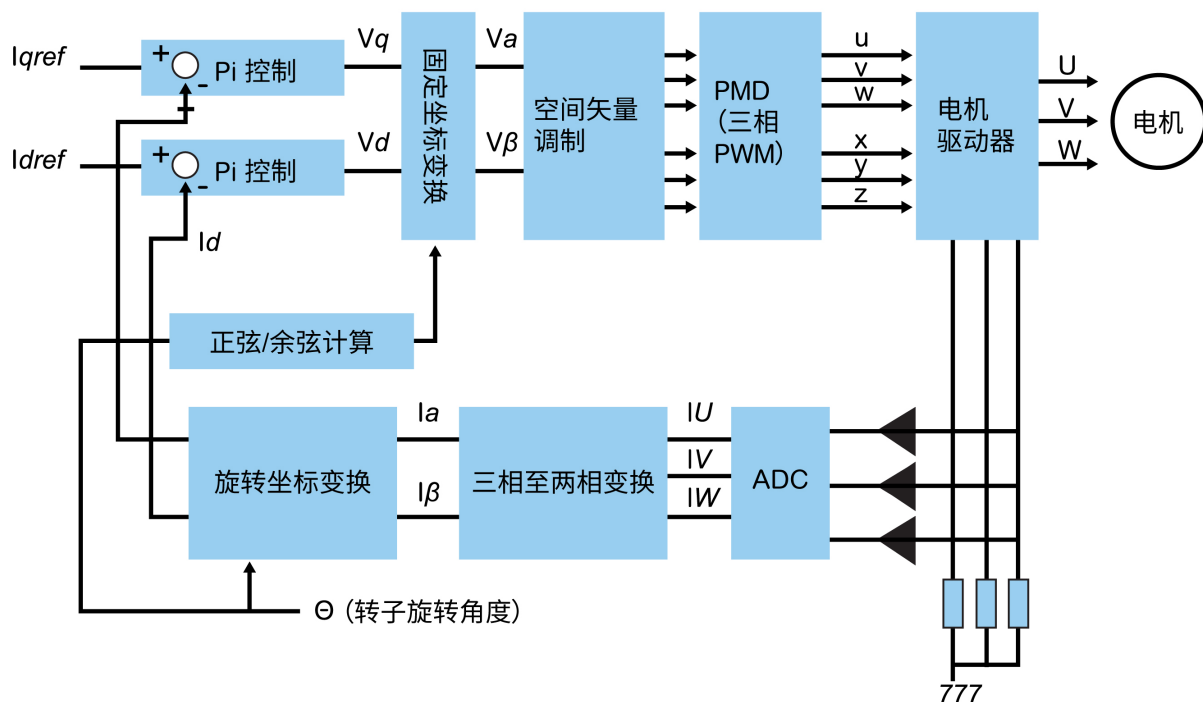
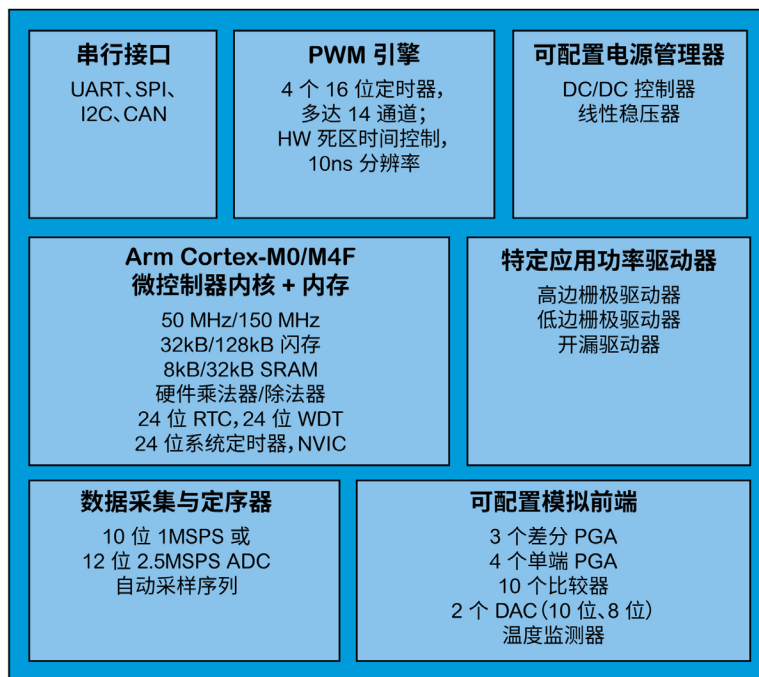


图 5, BLDC 电机的 FOC 或“矢量”控制。

## Qorvo BLDC 电机控制解决方案

为 BLDC 电机提供最佳驱动非常困难，因为需要感测大量参数和利用复杂的算法来生成适当的多相 PWM 波形。在实际应用中，电源电压可以为小型电池工作时的 8V 上下，也可以是家用电器整流和功率因数校正后的 400V。电机可能需要能够反转，也可能内置或不内置传感器，而且用户越来越希望设备能够进行现场更新，以更改电机控制特性。幸运的是，目前所有的驱动和控制功能都可以集成至电源应用控制器（Power Application Controller™，PAC）中；例如 Qorvo [4]公司推出的 PAC5xxx 系列产品。这些控制器基于运行频率为 150MHz 的 Arm® Cortex®-M4F 内核，拥有 128kB 闪存和 32kB SRAM 存储器以及 2.5 MSPS 12 位 ADC；或运行频率为 50MHz 的-M0 内核，包含 32kB 闪存和 8kB SRAM 以及 1 MSPS 10 位 ADC（图 6）。



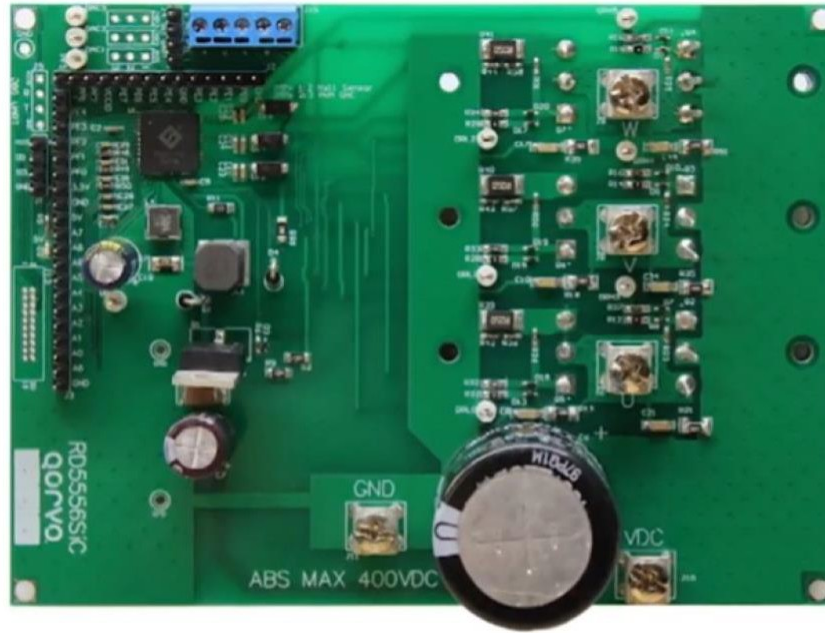
© 2023 Qorvo US, Inc.

图 6, Qorvo PAC 系列 BLDC 控制器的功能。

PAC 器件集成了多个传感器和通信接口，适用于任何 BLDC 电机控制应用，能够以“电机参数自识别”模式针对特定电机进行配置、任意更新和 PWM 优化，分辨率极高。具有高峰值电流额定值的三相栅极驱动器集成了电压额定值高达 600V 的高端驱动器；这在市场上尚属首次。此外，其还包含内部线性 and 开关稳压器，以最大限度地减少电路板空间和 BOM 成本。可配置模拟前端（CAFE）包括差分可编程增益放大器、单端可编程增益放大器、比较器、数模转换器、用于可编程和相互连接的信号采样的 I/O、反馈放大，以及多个模拟输入信号的传感器监控。面向低功耗 BLDC 的 PAC5285 还集成了功率 MOSFET，为手持工具和设备等应用构建了最紧凑的解决方案。PAC 系列的所有器件都具有全面的保护功能，包括过流、欠压、过压和过热。

## 参考设计简化新品开发方案

Qorvo 还可提供参考设计；举例来说，RD5556 展示了 Qorvo 的 PAC5556 电机控制器和碳化硅 SiC FET 共源共栅结构电源开关。该设计可用于高达 600VDC 和 3kW 的三相电机控制，例如交流电器中的电机控制。在工业领域，这一设计适用于泵、压缩机和风扇的电机控制（图 7）。



QORVO

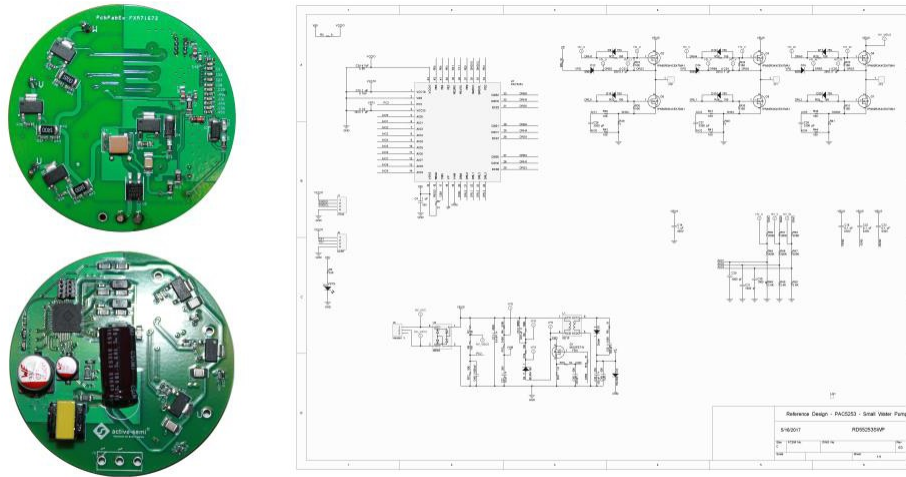
© 2023 Qorvo US, Inc.

图 7，Qorvo RD5556 参考设计采用 SiC FET，适用于 600V/6kW 的应用。

Qorvo 基于 PAC5223 器件，面向无人机电机驱动器等应用提供了参考设计；该器件展示了尺寸仅 9 毫米 x15 毫米的“微型”FOC 解决方案；其输入电压为 4.5-18V，输出电流有效值高达 17A。另一款参考设计 RD5223PT 演示了 PAC5223 如何在电动工具中利用单电阻检测法；该方案尺寸为 24 毫米 x10 毫米，可安装在设备手柄中。

对于 240VAC 应用，可在 64 毫米直径的 4 层 PCB 上使用 PAC5253，从而获得水泵用 BLDC 电机的参考设计，如图 8 所示。





qorvo

© 2023 Qorvo US, Inc.

图 8，用于 240 VAC 水泵的 Qorvo BLDC 电机控制器参考设计。

Qorvo 推出的 PAC 器件是其硬件和软件支持生态系统的一部分，提供了完整的数据表、参考手册、编程 GUI 及指南、软件开发工具包和应用说明。所有参考设计均拥有原理图、BOM 及布局图。

## 结论

无刷直流电机的高效率使其成为小尺寸、低重量、高可控性和高扭矩等应用的理想选择；如家电、电动工具及各种工业和消费类应用。过去，先进控制和驱动装置的复杂性及成本一直是 BLDC 电机广泛应用的障碍；而如今，Qorvo 的 PAC 系列控制器和 SiC FET 开关已成为多功能且经济高效的集成驱动解决方案。得益于全面的支持，超高性能 BLDC 电机控制器现可以在工业与消费市场的广泛应用中快速、轻松地实施，从而降低设计过程的风险，并缩短产品上市时间。



**José Quiñones** 在电机技术领域的工作经验已超过 25 年，拥有波多黎各大学电子学学士学位和电力电子学硕士学位。作为一名嵌入式系统设计师，José 为有刷、无刷直流和步进电机提供运动控制设计；作为一名应用工程师，他也乐于帮助客户设计各种功率等级和尺寸的电机驱动与控制应用。从构思到硬件和软件/固件的实施，他帮助客户利用最高效的电源管理解决方案打造更卓越、更新颖的产品。

## 参考资料

- 1) <https://www.iea-4e.org/emsal/>
- 2) <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/electric-motor-market>
- 3) [https://en.wikipedia.org/wiki/Vector\\_control](https://en.wikipedia.org/wiki/Vector_control)
- 4) <https://www.qorvo.com>

QORVO 和 POWER APPLICATION CONTROLLER 是 Qorvo US, Inc. 的商标。Bluetooth® 字标和标识是 Bluetooth SIG, Inc. 的注册商标，Qorvo US, Inc. 在获得许可的情况下使用这些标识。其他商标和商号分别归属于各自所有者。