

# BLDC 电机控制设计 与安全套件

*PAC52xxx/PAC55xxx*

## 目录

### [技术文章：融合尖端安全技术，打造耐用的 BLDC 电机控制应用](#)

下一代电池驱动工具需要配备更新的电机和控制器，以利用高电压驱动户外作业，同时集成安全功能来保护用户和设备。Qorvo 凭借其在无刷直流 (BLDC) 电机高压控制器方面的专业技术，在这一领域大显身手。Qorvo 全新推出的智能且高度优化的电源应用控制器 (PAC) SoC 产品家族将微控制器 (MCU)、电源、模拟前端，以及高阶硬件保护功能集成于单一集成电路 (IC) 之中，专为电压范围在 44V 至 600V 之间的 BLDC 电机或永磁同步电机 (PMSM) 应用而设计。

### [白皮书：无刷直流电机及其驱动器的设计挑战与注意事项](#)

本文探讨了无刷直流 (BLDC) 电机及其驱动器在设计过程中所面临的挑战与考量因素。文中回顾了各类型电机的发展历程及现状，着重指出了交流无刷感应电机在工业应用中的主导地位，以及 BLDC 电机在多个领域日益凸显的重要性。文章深入解读了不同类型电机的工作原理、优势和局限性，并特别聚焦于 BLDC 电机技术的进步，及其如何让此类电机具备高效能与精准控制等特点。此外，文章还讨论了整合智能控制系统所面临的挑战，以及遵守国际能效标准的问题。通过上述分析，强调了选择合适类型的电机与驱动器对于实现电机驱动系统最佳性能、能效及长期可持续性所具有的重要意义。

### [技术文章：面向无刷直流电机的磁场定向控制](#)

无刷直流 (BLDC) 电机驱动电路及其相关的控制、传感和反馈机制相当复杂。本文探讨了能够实现最顶级性能表现的磁场定向控制 (FOC) 技术。此外，随着新型集成控制器的出现，FOC 在各类应用中正变得越来越经济高效。

## 融合尖端安全技术，打造耐用的 BLDC 电机控制应用

### 借助 Qorvo 的即插即用解决方案，轻松融合安全技术

下一代电池驱动工具需要配备能够利用高电压驱动户外作业的电机和控制器，同时集成安全功能，以保护用户和设备。Qorvo 凭借其在无刷直流（BLDC）电机高压控制器方面的专业技术，在这一领域大显身手。Qorvo 高度集成的智能电源应用控制器（PAC）片上系统（SoC）产品组合，可以将 BLDC 或永磁同步电机（PMSM）可编程电机控制器和驱动器集成到单个集成电路（IC）中，以控制现今工作电压范围从 44V 至 600V 的动力工具。

BLDC 电机在需要高效率、高可靠性和精确控制的应用中得到了广泛应用。当这些应用涉及关键安全功能时，通常需要满足如 B 类认证等严格的安全标准；以下是 BLDC 电机控制应用需要 B 类安全认证的几个关键领域：

**电动工具：**包括电钻、电锯，乃至检测与测绘无人机等；以及为草坪和花园维护带来所需灵活性的最新型电动割草机、修剪机和吹叶机。

#### 汽车：

- 电动助力转向（EPS）：确保转向系统安全运行，降低事故风险。
- 电动汽车（EV）：用于车辆推进的电机控制系统，以及需要满足高安全标准，从而确保乘客安全和车辆可靠性的各类子系统。
- 电动自行车和自动驾驶汽车：在这些车辆中，精确控制和功率效率至关重要。

#### 工业自动化：

- 机器人和自动化设备：确保制造过程中的安全可靠运行，并跟踪仓库库存，从而保护工人及设备。
- 输送系统：需要安全且一致的运行，以确保物料处理过程中不发生事故。

#### 家用电器：

- 洗衣机：确保电机控制安全，防止过热或机械故障。
- 冰箱：可靠的电机运行对于保持恒定温度并避免食物变质至关重要。

#### 家庭自动化和智能设备：

- 暖通空调（HVAC）系统：安全的电机控制对于可靠、高效的供暖、通风和空调十分必要。
- 智能锁和安全系统：确保可靠运行，以维护安全并防止未经授权访问。

#### 航空航天和国防：

- 无人机：其电机控制系统需要高可靠性和高精度，以实现导航功能与稳定性。
- 飞机执行器：确保控制各种飞机部件的安全性及可靠性。

**B 类安全认证的关键要素：**

为获得 B 类安全认证，BLDC 电机控制系统必须解决几个关键方面的问题：

- **故障检测与管理：**实施强大的故障检测机制，以处理过流、过压和热过载等问题。
- **冗余设计：**采用冗余系统，确保在发生故障时仍能持续运行。
- **隔离措施：**确保适当的电气隔离，以防止安全隐患。
- **安全监控：**持续监控电机的运行参数，以监测和消除潜在故障。
- **合规性测试：**通过严格测试确保符合安全标准；如家用电器的 IEC 60730 标准或车载应用的 ISO 26262 标准。

Qorvo 不断推进智能电机控制器的技术革新；其 PAC52xxx/55xxx 系列便是这一领域的卓越典范。这些平台为运行于 44V 至 72V 的系统，配备集成式高阶防护功能，简化了稳固可靠的系统设计流程。该系列产品延续了公司一贯的高度集成化设计思路，将 ARM® Cortex® MCU、模拟前端、电源管理和驱动器集成到单个芯片；同时更增加了针对安全关键型应用的特性，超越了原始 PAC5xxx SoC 的功能集。

原始的 PAC5xxx 系列智能控制器能够处理大多数电动工具中的 BLDC 电机，内置 50MHz Arm Cortex-M0 32 位微控制器、带双自动采样定序器的高速 10 位 1 微秒 (μs) 模数转换器 (ADC)、灵活的时钟源、定时器、PWM 引擎和多个串行接口。该 SoC 还配备了可编程多模式电源管理器、可配置模拟前端和专用电源驱动器。

**多模式电源管理器 (MMPM)** 如同电源管理的“瑞士军刀”，能够高效地处理不同的电压，并包含一个可在降压或 SEPIC 模式下工作的多模式开关电源控制器，以及多达四个线性电源。

**专用电源驱动器 (ASPD)** 可利用高压电源驱动器执行特定的控制应用，如 H 桥、三相、智能功率模块 (IPM) 和通用驱动。

**可配置模拟前端 (CAFE)** 作为 SoC 的大脑，具有可编程增益放大器、比较器、数模转换器 (DAC) 等。此类功能允许灵活的信号采样、反馈放大和传感器监控。与微控制器一起，这些解决方案为高达 600V 的直流电源提供集成电源管理、驱动、反馈和控制功能等众多紧凑应用。

产品	最大输入电压	QFN 封装引脚数	A23 ARM Cortex	V <sub>DS</sub> 感测	nDRVDIS / nBRAKE	DC-DC	栅极驱动 (源 / 漏)	引脚对引脚兼容
PAC55713	72V	64	M4F	✓	✓	✓	1.2A / 1.8A	-
PAC55712	72V	64	M4F	✓	-	✓	1.2A / 1.8A	-
PAC55724	72V	64	M4F	-	-	✓	1.2A / 1.8A	✓ - PAC5524
PAC55711	72V	48	M4F	✓	✓	✓	1.2A / 1.8A	-
PAC55710	72V	48	M4F	✓	-	✓	1.2A / 1.8A	-
PAC55723	72V	48	M4F	-	-	✓	1.2A / 1.8A	✓ - PAC5523
PAC52711	72V	48	M0	✓	✓	✓	1.2A / 1.8A	-
PAC52710	72V	48	M0	✓	-	✓	1.2A / 1.8A	-
PAC52723	72V	48	M0	-	-	✓	1.2A / 1.8A	✓ - PAC5223
PAC52700	72V	48	M0	-	-	-	.75A / .75A	-
PAC52411	44V	48	M0	✓	✓	✓	1.2A / 1.8A	-
PAC52410	44V	48	M0	✓	-	✓	1.2A / 1.8A	-
PAC52422	44V	48	M0	-	-	✓	1.2A / 1.8A	✓ - PAC5222
PAC52400	44V	48	M0	-	-	-	.75A / .75A	-

**集成安全功能：**安全性是电机控制器设计的关键方面，特别是在运行条件苛刻的电动工具中。Qorvo 的控制器通过固件集成了安全性，为所有应用提供温度感测及保护功能。

**温度感测与保护：**SoC 内置温度传感器，可经由 CAFE 的 ADC 通道访问，并通过固件设置和测量参数。温度保护分为两个级别，包括过温警告和过温故障。当芯片温度达到 140° C 时触发温度警告；而当温度升至 170° C 时则会产生过温故障。固件中采用字母和数字系统来标识问题发生的位置、遇到的温度和电压读数，以明确警告和故障的性质。问题排除后，这些警告和故障可以被重置。

**VDS 感测：**新款控制器配备了 VDS 感测功能，用于实现快速过流和短路保护；该功能包含一个独立的比较器和电平移位器，适用于高压侧 MOSFET。此外，它还为每个 MOSFET 提供了可编程的 DAC 电平基准和可编程消隐间隔；由于 SOA 内的电流控制更为严格，这使得设计师能够选用更小的裸片和成本更低的电子元件；从而提高了可靠性，并在出现意外电流瞬变时保护 MOSFET。

**CBC 保护：**新款控制器系列还配备了逐周期（CBC）保护功能，确保能迅速响应操作周期内出现的任何不利条件或故障；助力设计人员保障电机和控制器的安全性及完整性，并显著降低功率损耗。同时，它还有助于缩减物料清单（BOM）成本、减少处理器开销，并帮助最大限度地简化整体设计复杂性。

**驱动器禁用与制动功能：**Qorvo 的电机控制产品通过栅极驱动器控制选项带来额外的安全功能，让设计人员能够在出现问题时停用或关闭为电机供电的驱动器电路。控制器配有一个 AIO2 引脚用于禁用栅极驱动器（nDVRDIS），

以及一个专用的 AIO4 引脚以便在出现问题时强制栅极驱动器对电机进行制动 (nBRAKE)。此外，控制器还配备了额外的 ADC 输入，包括具有可编程增益的单端专用缓冲馈电 AIO3 和 AIO5 引脚，进一步推动 BOM 成本的降低。

Qorvo 电机控制器产品家族不仅适用于电动工具，还可广泛应用于其它领域；如最新款电动自行车（其对电源效率要求极高）、仓库中用于跟踪库存的自主机器人，以及制造业中作为生产支柱的自动化系统。此外，包括家用电器、机器人技术、暖通空调（HVAC）系统、医疗设备、自动驾驶汽车和数控（CNC）加工等在内的众多领域，也将从 Qorvo 下一代 PAC 系列智能电机控制器中受益。展望未来，其前景一片光明。

## 无刷直流电机及其驱动器的设计挑战与注意事项

### 引言

电机是现代工业和技术不可或缺的一部分，承担着全球超过一半的电力消耗。随着对能源效率需求的日益增长，无刷直流（BLDC）电机已成为必不可少的关键设备，为减少电力需求和碳排放带来了巨大潜力。本白皮书深入探讨了各种电机类型，特别关注 BLDC 电机的设计挑战，以及能够为其带来性能优化的先进控制系统。

### 电机分类概述

电动机大致可分为几种类型，每种都具有独特的特性和应用场景：

- **交流感应电机：**交流感应电机在市场上占据主导地位，市场份额约为 70%，尤其在工业领域得到广泛应用。这些电机基于电磁感应原理工作，定子中的旋转磁场在转子中感应出电流，从而使其转动。它们坚固耐用且成本效益高，适用于如风扇、泵和传送带等恒速应用。然而，在需要变频时，则需使用变频驱动器（VFD）。VFD 通过调节供给电机的交流电频率来实现精确的速度控制。尽管 VFD 用途广泛，但也可能给电机的绝缘效果带来压力，产生电磁干扰（EMI），并引起共模电流，加速轴承磨损。
- **同步电机：**与感应电机不同，同步电机可不“打滑”运行，即转子以与定子中旋转磁场相同的速率转动。典型例子包括绕线转子同步电机（WRSM）和同步磁阻电机（SyRM）。这些电机在高精度机械等特定应用中更高效且性能更佳。不过，较高的成本和复杂性限制了它们的广泛采用。
- **有刷直流电机：**有刷直流电机结构简单且提供高启动转矩，适用于电动工具、汽车启动器和家用电器等应用。这些电机通过电刷和换向器机械地切换绕组中的电流方向，从而产生旋转。然而，电刷和换向器之间的物理接触会导致磨损，需要定期维护。此外，有刷电机容易产生电气噪声和声学噪声。
- **无刷直流电机（BLDC）：**BLDC 电机通过使用电子换向取代机械电刷来消除有刷电机的缺点。BLDC 电机的定子包含绕组，转子配备永磁体。电子控制电路切换定子绕组中的电流，产生旋转磁场以驱动转子。BLDC 电机效率极高，可达 96% 以上，并以其长寿命和低维护需求著称。由于能够实现精确控制和具备出色的转矩重量比，此类电机适用于从消费电子到工业自动化的广泛领域。

	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, 对同一制造商生产, 且外形尺寸相同的多种电机类型的主要技术特征进行对比分析

### BLDC 电机的设计与控制

BLDC 电机的设计涉及多个技术考虑因素, 以确保最佳性能:

- **电子换向:** 不同于依赖电刷进行换向的传统电机, BLDC 电机使用电子控制器来管理定子绕组中电流的切换。这种电子换向通过使用如 MOSFET 或 SiC-FET 等半导体开关实现; 开关以桥接配置排列, 提供六种电压组合, 并在每个相位之间设置适当的“死区”时间以避免“上下桥直通”现象。这些开关由微控制器或数字信号处理器 (DSP) 控制; 后者生成精确的脉冲宽度调制 (PWM) 信号以调节电机的速度和转矩。

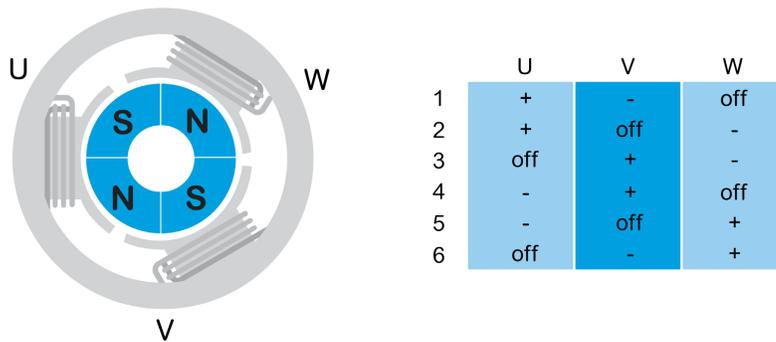


图 2, 三相无刷直流电机的外形和所需驱动电压时序; 此处所示为线圈的“梯形”模式驱动排列

随着转子旋转 360 度, 每个换向阶段依次触发, 并可由轴上的传感器或其它方式触发。在没有反馈的情况下, 电机转速达到由电源电压设定的最大值、转子位置感测和评估时的任何延迟, 以及绕组电感决定。随着速度增加, 施加电压持续时间相应减少,

电感限制了可达到的峰值电流，因此转矩逐渐降低。通过转子角度、速度和线圈电流的反馈，控制器应用正确的时序以最大限度地提高转矩，并将转矩纹波（即每转多次的周期性骤降，并产生振动）降至最低。

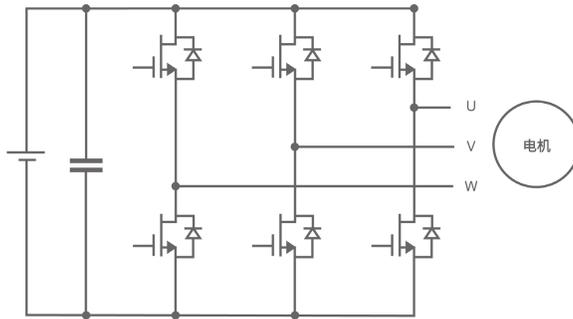


图 3，桥接配置的开关提供 BLDC 驱动电压

- 传感器反馈：**BLDC 电机通常依赖霍尔效应传感器或旋转编码器等传感器来提供转子位置的反馈信息。这种反馈对于实现换相与转子位置的同步至关重要，从而确保电机的平稳高效运行。在无传感器设计中，先进的算法基于反电动势信号来估算转子位置，减少了对物理传感器的需求，进一步简化了电机设计。
- 持续最大扭矩、间歇转矩和速度要求**将是选择 BLDC 电机时的考虑因素。BLDC 电机的一个优势在于其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会优化驱动信号发送到功率级的时机，通过调整重复率来设定速度，并经由脉宽调制设定转矩。
- 换相方式——**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电动势（图 4 左）和不可避免的转矩纹波。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电动势为正弦波（图 4 右）；理论上的零转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），以匹配反电动势的形状来获得最佳性能。PWM 的占空比设定了整体电压幅值，从而设定了转矩需求。

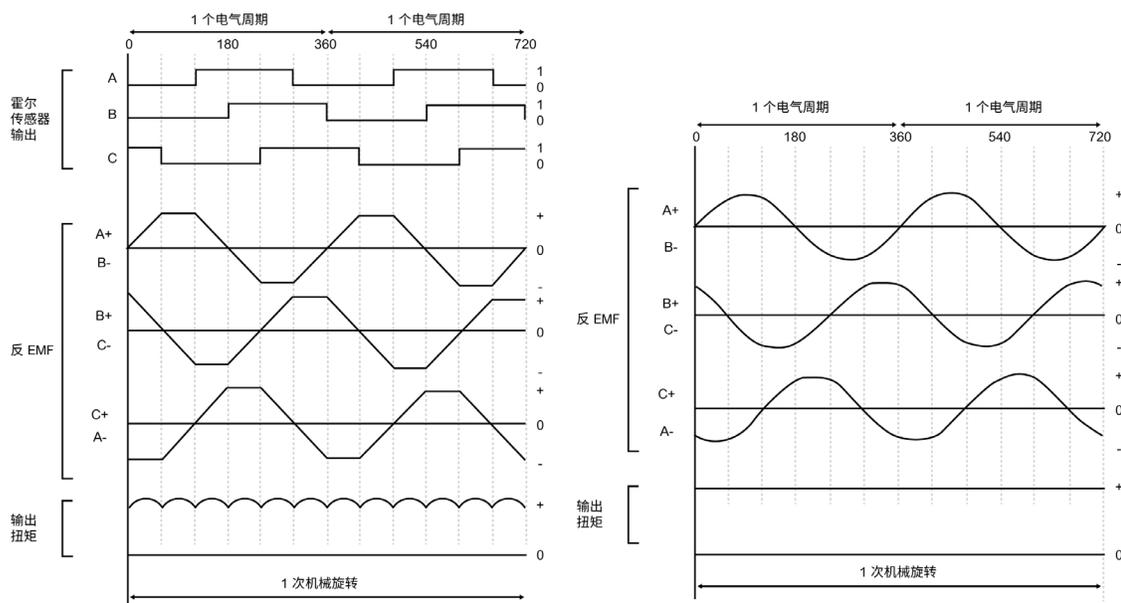


图 4, BLDC 电机和永磁同步电机的反电动势波形

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，并能在高转矩条件下启动。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、启动转矩有限，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转矩启动电机，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，可使用反电动势的零交叉点。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）。FOC 保证在整个速度范围内平稳运行，并带来快速加减速的卓越动态性能。转子位置可由传感器确定，或通过“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呈 90 度夹角，以获得最大转矩，同时在负载变化的情况下调节速度和转矩。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：磁场磁链和转矩。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  $I_\beta$  相对于定子静止。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），分别代表磁场转矩和磁链。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 PWM 可获得正弦驱动电流；其有效值与所需转矩相对应。

### Qorvo 的 BLDC 电机控制解决方案

Qorvo 的 PAC 系列代表了 BLDC 电机控制技术领域的重大进展。这些集成解决方案提供了一系列专为 BLDC 应用量身定制的功能，具体包括：

- **集成功能：** PAC 系列集成了诸如电源管理、传感器接口和 PWM 生成等关键功能，以紧凑的形式提供完整的电机控制解决方案。这种集成简化了设计过程，并缩短了新产品的上市时间。
- **多功能性和可扩展性：** PAC 系列旨在支持从小型电池供电设备到高功率工业机械的广泛应用。这些控制器能够处理高达 600V 的输入电压和最高 6kW 的输出功率，适用于如暖通空调系统（HVAC）、泵和压缩机等要求严苛的应用。
- **定制化及灵活性：** Qorvo 的控制器允许轻松定制控制算法，让制造商能够优化特定应用中的电机性能。此外，PAC 系列支持空中（OTA）更新，确保电机控制系统可以轻松升级以纳入最新的特性和改进。
- **功率电子与集成：** 所有驱动和控制功能现在都可以集成到 Qorvo PAC5xxx 系列等 PAC（电源应用控制器，Power Application Controller™）中。这些控制器基于 Arm® Cortex®-M4F 内核运行在 150MHz 下，配备 128kB 闪存和 32kB SRAM，以及 2.5MSPS 的 12 位 ADC；一些产品基于 -M0 内核，运行在 50MHz，配备 32kB 闪存和 8kB SRAM，以及 1MSPS 的 10 位 ADC（图 5）。



图 5, Qorvo PAC 系列 BLDC 控制器的功能

## 应用与参考设计

Qorvo 推出了各种参考设计，以帮助制造商在不同行业中实施 BLDC 电机控制。这些参考设计展示了 PAC 系列的适应性和易于集成的特点：

- **消费电子产品**：在无人机和电动工具等应用中，紧凑尺寸和高效能至关重要；Qorvo 的解决方案为集成 BLDC 电机控制提供了简化的途径。
- **工业自动化**：对于 HVAC 系统、泵和压缩机等大型应用，PAC 系列提供了有效控制高性能 BLDC 电机所需的功率及灵活性。
- **家用电器**：在洗衣机、冰箱等对能效和可靠性要求极高的产品中，Qorvo 的集成电机控制解决方案可帮助制造商在保持产品性能的同时满足严格的能耗标准。

## 结论

随着各行业越来越重视能效和可持续性，BLDC 电机因其卓越的性能、可靠性和低维护成本而成为首选。Qorvo PAC 系列等先进控制解决方案的集成，简化了 BLDC 电机的设计和实施，使其能够广泛应用于各种场景。随着电机控制技术的不断发展，BLDC 电机将在减少全球能源消耗和减轻环境影响方面发挥关键作用。

## 面向无刷直流电机的磁场定向控制

### 摘要

无刷直流 (BLDC) 电机因其高效、可靠和低维护需求而得到广泛应用。然而，控制这类电机面临诸多挑战，尤其是在实现平稳、高效运行方面。本文探讨了磁场定向控制 (FOC) 作为一种先进的方法如何优化 BLDC 电机性能、减少转矩纹波并提升整体效率。

尽管 BLDC 电机具有诸多优势，但其控制的复杂性——涉及精确的电子换向和反馈机制——给设计工作带来了巨大挑战。

BLDC 电机通过在定子中产生旋转磁场并与转子中的永磁体相互作用而工作。不同于传统电机使用机械电刷进行换向，BLDC 电机依赖电子控制器来切换定子绕组中的电流。这种电子换相对于精确控制至关重要，但也增加了系统的复杂性。

电气驱动相对复杂，通常需要高频率的三相 120 度相位差交流电，并利用脉宽调制 (PWM) 来产生所需的转速和转矩。

BLDC 电机在可控性、效率及重量方面的潜力，推动了新型集成驱动解决方案的开发；这些解决方案已应用于从工业到家用电器等多个市场，以及无人机和电动自行车等新兴领域。

### BLDC 电机基础知识

最简单的 BLDC 电机控制方式是六步或梯形波驱动；其中三个定子绕组按固定顺序依次通电。尽管这种方法易于实现，但由于转子和定子磁场的非理想对齐，会导致转矩纹波的产生。理想的解决方案是使用正弦波驱动方式以产生平滑的旋转磁场，使其始终与转子完美对齐。然而，实现这一点需要复杂的控制算法和准确的转子位置反馈。

转子所受的力并非始终处于期望的切线方向——随着电机旋转，会存在周期性的径向分量。这不仅不会产生轴转矩，反而只会降低效率、造成发热，并导致所谓的“转矩纹波”（图 1，左）。这种简单的驱动被称为六步或“梯形波”。理想情况下，应使用正弦波而非通过通断驱动来激励绕组（图 1，右），以使定子线圈产生平滑旋转的磁场，然后控制交流励磁电流，使得由此产生的磁场角度始终垂直于转子磁铁的磁场。

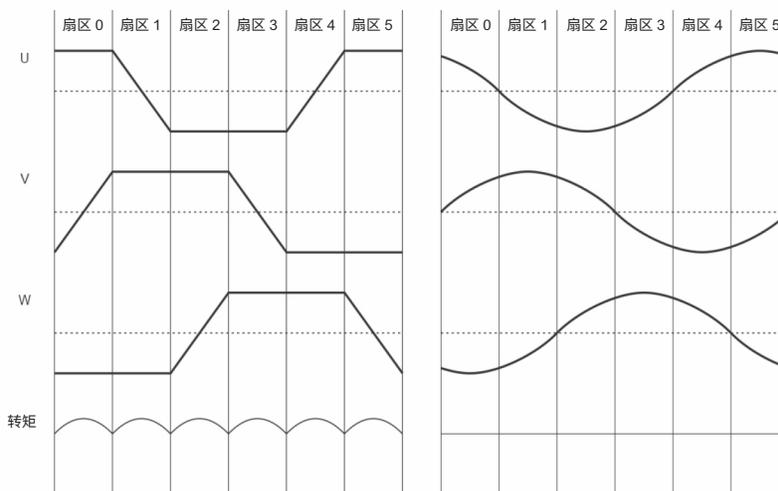


图 1，BLDC 电机的六步梯形波驱动与正弦波驱动波形对比

这样可以通过 360 度旋转获得最大切向力和转矩，从而实现最小的转矩纹波和最高的效率。为达成这一目标，不仅须精确确定转子的角位置，同时还必须控制定子电流，因为这决定了在任意时刻，由三个绕组共同作用所产生磁场的强度与方向。图 2 给出了一个示例——当转子处于该位置，且磁场方向为 N-S 时，如果定子磁场方向与灰色双箭头方向一致，即呈 90 度角，则磁体将获得最大转矩。这种情况发生在 W 和 V 绕组产生的磁场在某一极性下相等，而 U 绕组产生的磁场在相反极性下达到最大值之时；对应于驱动电流波形中的 A-B 位置。

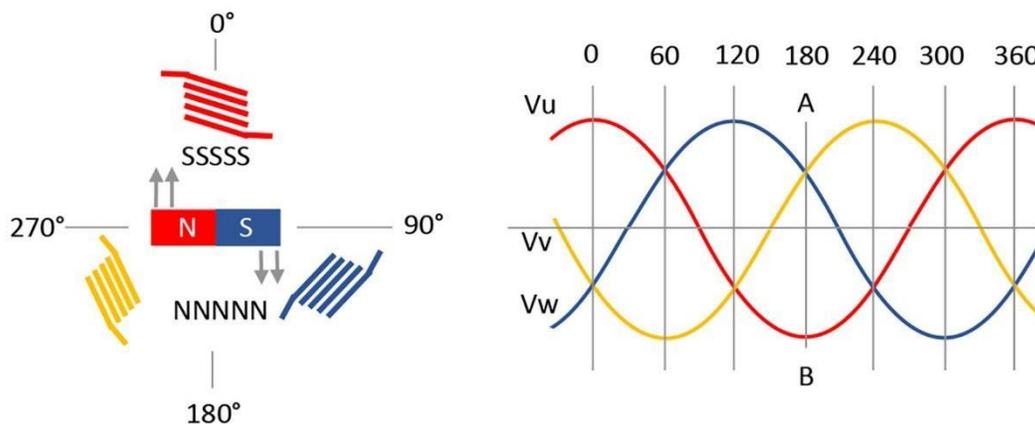


图 2，转子转矩应为切向，以发挥最大效果

仅仅在正确的相位上对三个绕组施加和控制正弦电压并不能实现精确控制，因为绕组电感、反电动势和其它效应会导致电流及磁场发生相移。这正是磁场定向控制（FOC）的作用所在；它通过优化绕组电流来动态校正定子磁场的幅度与方向，以匹配实时测量的转子位置。

### 利用磁场定向控制优化转矩

FOC 通过将三相定子电流转换为两个正交分量来工作：一个代表产生转矩的分量（IQ），另一个代表磁化分量（ID）。这两个分量可以独立控制，以实现所需的电机性能。

FOC 涉及多个数学变换。首先，“克拉克（Clarke）”变换将三相电流转换为两轴系统（I $\alpha$  和 I $\beta$ ）。然后，“帕克（Park）”变换将这些轴旋转，与转子位置对齐，得到直轴分量（ID）和正交分量（IQ）电流。通过控制这些电流，FOC 在整个电机运行过程中保持最佳转矩输出。

定子绕组电流以及由此产生的磁场强度和方向可以在一个共同的静态坐标系中表示为三个相隔 120 度的旋转矢量。如果电流 I $u$ 、I $v$  和 I $w$  始终保持平衡，总和为零，则可以通过“克拉克”变换将其简化为两个在静态框架中相隔 90 度的旋转矢量，即幅度为 I $\alpha$  和 I $\beta$  的矢量：

$$I\alpha = \frac{2}{3}(Iu) - \frac{1}{3}(Iv - Iw) \quad \text{Eq.1}$$

$$I\beta = \frac{2}{\sqrt{3}}(Ib - Ic) \quad \text{Eq.2}$$

接下来，需要将这些转换为在旋转参考平面上的静态矢量 ID（直轴分量）和 IQ（正交分量），以便将其与转子旋转时的位置相关联。我们通过“帕克”变换实现这一点，其中  $\theta$  为转子相对于静态 I $\alpha$  和 I $\beta$  框架的角度：

$$Id = I\alpha \cos(\theta) + I\beta \sin(\theta) \quad \text{Eq.3}$$

$$Iq = I\beta \cos(\theta) - I\alpha \sin(\theta) \quad \text{Eq.4}$$

在稳态条件下，ID 和 IQ 为恒定值，可分别解释为定子绕组电流中表示切向转矩和不需要的径向转矩分量。这些值现在可以作为反馈环的输入，通常使用比例积分（PI）控制器来工作，以最大化 IQ 并最小化 ID 至零。由此产生的误差放大器输出 VD 和 VQ 经过反向帕克变换及反向克拉克变换，随后进行脉宽调制，以驱动功率级，生成三个正弦波定子绕组电流。PI 控制器中的可编程增益值 K $p$  和 K $i$  需要分别针对瞬态响应和稳态精度进行优化，并且很大程度上取决于实际的电机参数，特别是绕组电阻和电感。然而，Qorvo 等公司提供的高级 FOC 控制器具有自动调谐功能，能够“学习”所连接电机的特性。使用 FOC 的 BLDC 电机控制器的框图如图 3 所示。

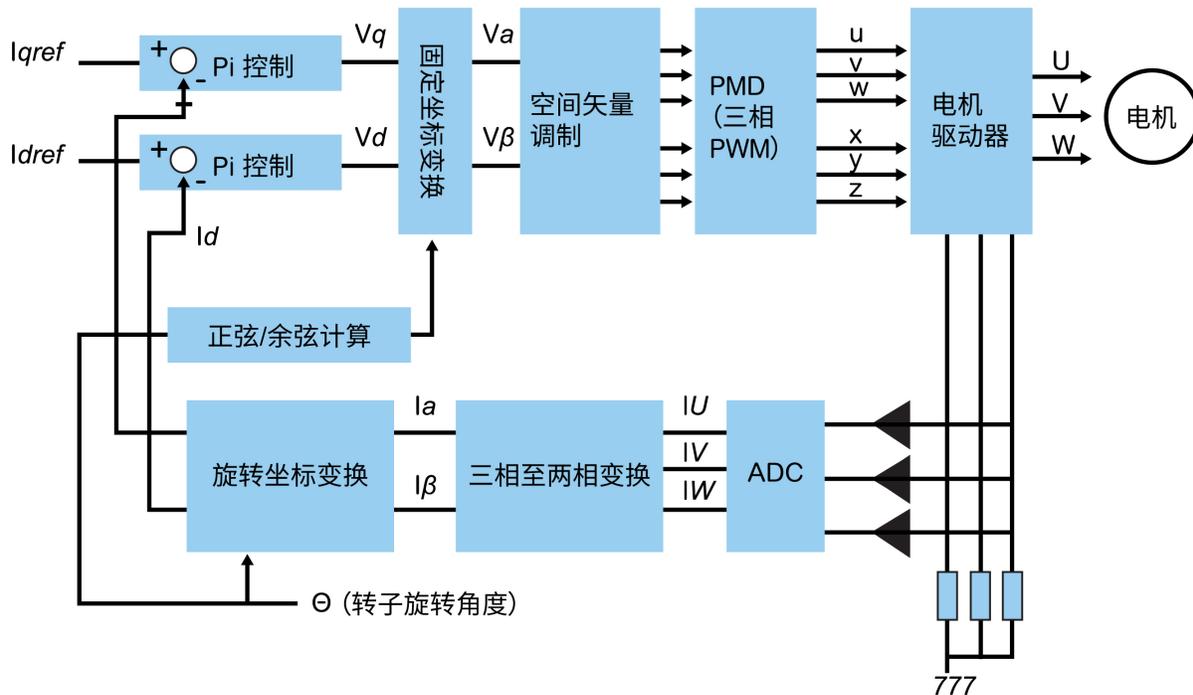


图 3，使用磁场定向控制（FOC）的典型 BLDC 电机控制器

从 FOC 中获益最多的应用包括那些要求噪音和振动最小、谐波含量最低以及能够以高于额定转速运行的应用。在 FOC 中，这通过一种称为“磁场削弱”的技术来实现，即减小  $I_d$  电流至负值来有意降低反电动势。这就削减了转子有效磁场，从而允许更高的速度，但以牺牲转矩为代价。

### 测量转子位置和定子绕组电流

FOC 的关键在于准确确定转子的位置，可以通过使用霍尔效应传感器或旋转编码器等传感器来实现。在无传感器设计中，转子位置是基于反电动势信号进行估算的，但这种方法精度较低，需要复杂的算法。

高性能 FOC 依赖于对转子角位置和定子绕组电流的精确测量。转子角位置可以通过多种方式来确定。在使用梯形波驱动时，当一个绕组断电时，可以利用反电动势的过零点来指示角位置；这种方法成本低且精度高。然而在 FOC 中，所有绕组都持续通电驱动，因此需要采用其它方法。一种“无传感器”技术通过绕组电流、电压和电机特性模型来推断位置，但这种方法在高负载下不易启动，并且需要控制器提供强大的处理能力。另一种途径是先从梯形波驱动开始，感应反电动势，然后在电机开始旋转后切换到正弦 FOC。对于基于传感器的解决方案，霍尔传感器通过简单的接口解决了这个问题，允许在高负载条件下启动并实现更精确的转矩控制。另一种确定位置测量的方法是利用具有正交输出的磁解析器或编码器，这是一种较昂贵但精度极高的解决方案，同时还能感应旋转方向。

绕组电流的测量也可以通过不同的方式进行。最准确的方法是利用电阻感测和三个 ADC 同时采样三个绕组电流。

然而，采样的时点至关重要，以避免受到嘈杂的 PWM 开关边沿的影响。为获得最佳精度，可将电阻直接串联在绕组上；但由于测得的电压没有接地参考，且存在高共模波形电平，处理起来较为困难，因此更好的解决方案是测量逆变器支路电流（图 4 左侧）。对于成本敏感型应用，可以使用单个分流电阻，因为它可以有效地测量直流链路电流（图 4 右侧）。单分流方法仅需要一个 ADC，但该技术存在局限性——如果活动矢量持续时间小于最小测量时间，则电流测量将不准确。为了纠正这一点，可能需要采用“非对称”电流采样来提供更好的信号质量。

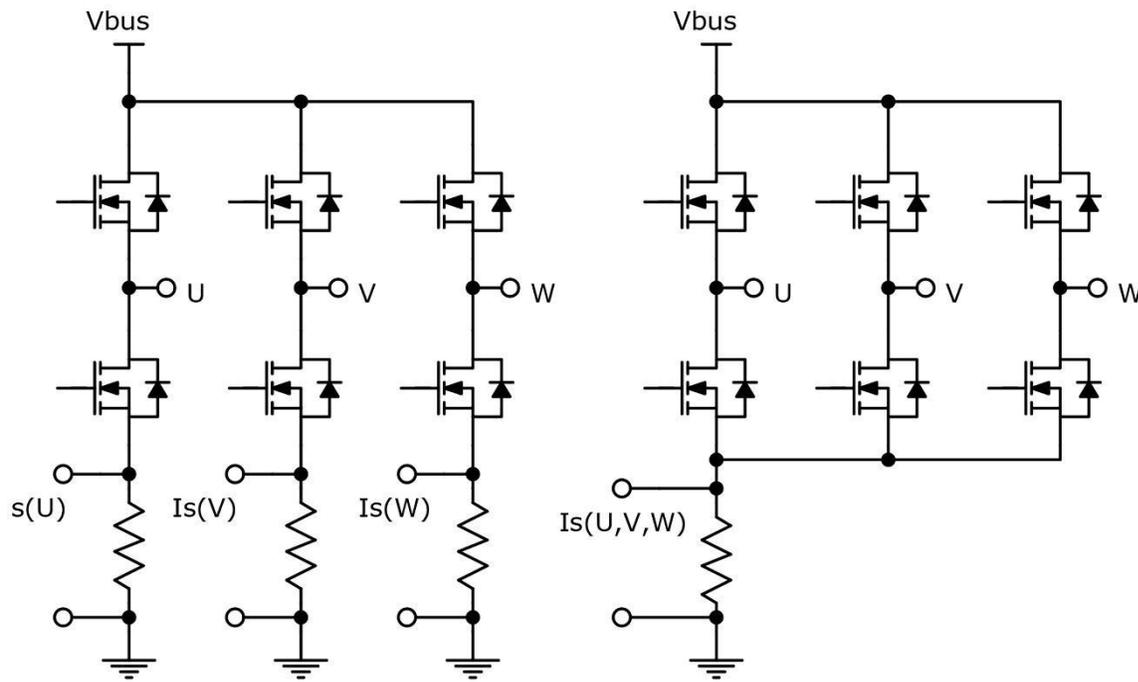


图 4, BLDC 电机电流监测方法; 左侧为三分流法, 右侧为单分流法

### BLDC FOC 控制的集成解决方案

实施 FOC 的关键在于精准调控电机定子电流，而绕组的电感特性与反电动势等因素则增加了这一过程的挑战性。Qorvo 推出的 PAC5xxx 系列等现代集成电路将所有必要功能集成到单一芯片中，以简化这一过程。该系列 IC 不仅提供自动调谐、无传感器操作，还拥有全面的诊断功能，从而使 FOC 技术变得更加易于应用，并适用于更广泛的领域。

除了基本的电机控制功能外，这些先进的控制器还支持如磁场削弱等高级功能；该功能允许电机通过降低转子磁场强度而超越其基础速度运行。这在电动汽车或工业机械等需要较宽转速范围的应用中尤为有用。

所有用于 BLDC 电机的梯形波控制或磁场定向控制功能均可集成至单芯片控制器中；典型产品如 Qorvo 基于 ARM® Cortex® 处理器架构的 PAC5xxx 系列控制器。这些器件高度可配置，适用于最高达 3kHz 的电气转速。

控制模式包括转矩、速度和功率，同时拥有无传感器、霍尔传感器或正交编码器位置感测选项，并可使用单分流或三分流电流感测。为确保顺利启动，控制器还包含梯形波 /FOC 混合模式，并具有自动调谐功能，可识别电机参数以实现最佳性能。控制器支持磁场削弱，并提供如欠压、过温、堵转和开相检测等多种保护特性；所有问题均由板载诊断功能报告。其中一个版本甚至包括适用于低功耗应用（如手持设备和工具）的电机驱动 MOSFET。各项功能均可借助图形用户界面（GUI）进行配置，并通过参考固件、应用笔记、编程指南、软件开发套件和硬件评估套件带来全面支持。

FOC 特别适用于对精度、效率和平稳运行要求极高的应用；包括电动汽车以及工业自动化领域——对于前者，平稳的转矩传递对于舒适性和性能至关重要；对于后者，能源效率和可靠性则是关键考量。此外，在家用电器中使用 FOC 也有助于满足严格的能效标准，同时保持性能水平。

### 结论

磁场定向控制 (FOC) 为优化 BLDC 电机性能提供了一种先进的解决方案，可实现更高的效率、更小的转矩纹波，和更高的控制精度。随着集成解决方案变得越来越先进且成本效益更高，FOC 有望成为各种应用中 BLDC 电机控制的标准。