

BLDC电机进入正弦时代

Paul Pickering

摘要：无传感器、正弦无刷直流电机控制可减少纹波，提高汽车应用的效率。

随着电子器件的不断增长，现代汽车非常注重节能设计。对于混合动力电动车和全电动车（HEV 和 EV）两者而言，电池是主要或唯一的能源。



图1 应该使用正弦控制：头盔电机中的扭矩纹波使 Darth Vader 感到困惑（来源：Sky.com）

与有刷电机相比，为了寻求更长的电池寿命，业界越来越多地采用无刷直流（BLDC）电机。在具有内燃机的传统汽车中，BLDC 电动配件有电动后视镜、通风和冷却风扇以及座椅电机；在混合动力汽车和电动汽车中，BLDC 的应用范围扩展到包括以前的机械和液压功能，如牵引电机、发电机、交流压缩机、水泵和动力转向执行器。而且我们不要忘记两轮汽车应用：BLDC 也正在进入摩托车和踏板车燃油泵控制系统。

BLDC 具有更高的效率、更高的扭矩重量比、更低的维护、更高的可靠性以及比有刷电机同类产品更低的噪音。缺点是它们需要更多的电子电路才能运行。

有刷直流电机在磁铁（定子）的磁极之间放置了绕线电枢（转子），并使用电刷机械地将电流切换到电枢并使其旋转，这一过程被称为换向。相比之下，BLDC 具有缠绕定子，该定子具有围绕永磁转子组件的多个绕组。控制器通过监视转子位置并以正确的顺序向定子绕组供电来提供电子换向，以启动和保持转子运动。

图2 比较了典型的有刷和无刷直流电机的驱动电路。有刷电机只需要一个栅极驱动器和功率 FET。另一方面，

具有电子换向的 BLDC 电机需要将六个 FET 布置成三个半桥对，而且每个 FET 需要一个栅极驱动器，以及需要用于控制开关顺序的监控装置。

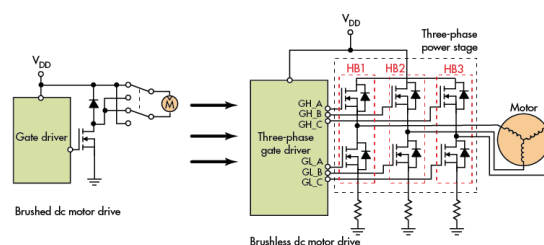


图2 BLDC 的驱动电路要比早期的有刷直流电机更复杂

最简单的控制算法是使用梯形换向，其中控制器每 60 度改变有效相位，以保持旋转。在任何时候，两个相位都会被驱动，而第三个相位被断开。每个有源绕组的电流波形遵循梯形波形，从零到正电流，然后到负电流并返回到零。但这个序列增加了 BLDC 扭矩曲线的纹波，因此梯形换向主要局限于更高的速度和应用，在这些应用中，电机和机械连杆有助于减少这种影响。

在低速应用中——例如 Sith 勋爵的头盔电机——梯形转矩纹波会导致操作不均匀和噪音。正如我们所看到的，正弦换向提供了更好的方法。

正弦换相概述

电机扭矩的一般公式是：

$$T = K_T \times I \times \sin(\alpha) \quad (1)$$

其中 K_T 是转矩常数， I 是通过相绕组的电流， α 是磁场中的转子位置。

对于三相 BLDC，电机转矩是所有三相的作用之和。相电流包括 I_U 、 I_V 和 I_W ：

$$T = K_T [I_U \sin(\alpha) + I_V \sin(\alpha + 120) + I_W \sin(\alpha + 240)] \quad (2)$$

等式 2 中的 T 值随转子旋转而变化，从而产生转矩纹波。

如果 I_U 、 I_V 和 I_W 是正弦曲线，幅度为 M 且相位角与上述公式相同：

$$\begin{aligned} I_U &= M \times \sin(\alpha) ; I_V = M \times \sin(\alpha + 120) ; \\ I_W &= M \times \sin(\alpha + 240) \end{aligned} \quad (3)$$

将这两个方程组合得出：

$$T = K_T M [\sin^2(\alpha) + \sin^2(\alpha + 120) + \sin^2(\alpha + 240)] \quad (4)$$

当然，通过三角学可得：

$$\sin(A+B) = \sin(A)\cos(B) + (\cos(A)\sin(B))$$

而且由于：

$$\sin^2(\theta) + \cos^2(\theta) = 1$$

因此，经过大量操作和常数替换后，公式 4 变为：

$$T = 1.5 K_T M \quad (5)$$

扭矩 T 现在仅取决于电机 - 转矩常数和电流大小，并且与转子角度无关。正弦换向解决了转矩纹波问题。

现实世界中的正弦换相：相间 (phase-to-phase) 法

纯正弦驱动电压在理论上听起来很棒，但在实际设计中很少使用，因为它们在每个接地 (respect to ground) 电机绕组上的效率比较低。在三相之间产生三个正弦电压是更好的方法。这是通过使用图 3 中的特性曲线而不是纯正弦波，来改变接地脉冲宽度调制 (PWM) 占空比 (以及因此驱动电压) 来完成的。当任何相位进行接地测量时，波形与三次谐波是正弦耦合的；驱动电机的相电流遵循相间电压的纯正弦波分布。

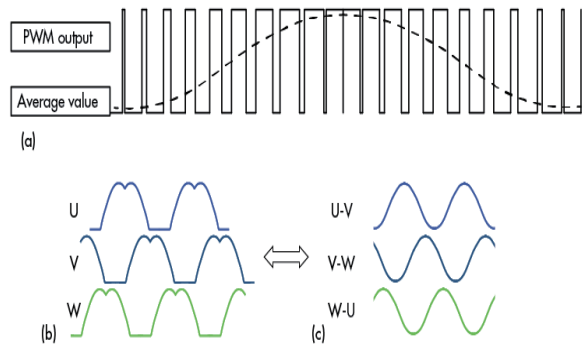


图 3 PWM 占空比 (a) 产生特征对地电压曲线 (b)，从而产生正弦相间电压和电流 (c)。

这种编码技术在下面讨论的 DRV10983-Q1 会使用到。一个相位保持在地，而另两个相位是脉冲宽度调制的。

无传感器控制降低成本

通过传感器，例如旋转变压器、光学编码器或霍尔效应器件，来确定 BLDC 控制系统中转子位置，这是传统方法是。前两个器件价格昂贵，但提供高精度；霍尔效应传感器的成本较低，提供中等精度。

然而，即使是廉价的传感器也会增加元件数量，增加 BOM 成本，并且是另一个潜在的故障源。为了降低成本和尺寸，BLDC 控制设计人员已经使用正弦算法消除了位置传感器，该算法使用旋转电机的反电动势 (BEMF) 来估算转子位置。

BEMF 与电机速度成比例。无传感器 BLDC 控制器不直接测量 BEMF。相反，它们连续采样相电流，用它来估算 BEMF 电压，然后确定转子速度和位置。

无传感器启动

控制系统必须估计 BEMF 的最小值，以准确估计转子驱动相位的位置。这在启动期间会出现问题：在零速时，没有 BEMF 信号，因此电机最初在开环控制下被驱动，直到其估计的 BEMF 足够高才能启用闭环操作。

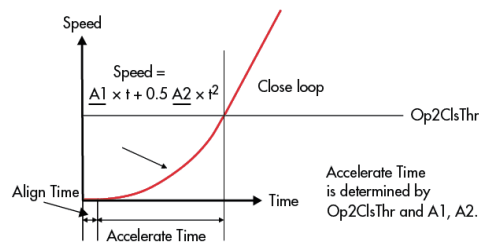


图 4 BLDC 无传感器启动曲线有三个部分：静止转子位置检测、开环操作和闭环操作。

无传感器系统中的 BLDC 电机启动有三个部分：第一，当电机处于静止状态时；第二，它在开环模式下开始加速而没有 BEMF 信息时；第三，当 BEMF 反馈大到可以进行闭环操作时。序列如图 4 所示。Op2ClsThr 是开环 - 闭环阈值，其中 BEMF 的速度足够大以至于有用。系数 A1 和 A2 设定加速度。

确定初始转子位置

如果电机静止，算法必须首先知道转子的位置，以便它能够以正确的顺序开始驱动相位。

有两种常见的方法 (图 5)。“对齐即通”方法将固定电流施加到一相，接地到第二相，接地或高阻抗施加到第三相。这迫使转子磁铁与通电线圈对齐。

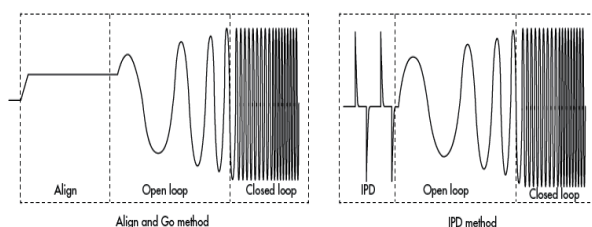


图5 IPD和“对齐即通 (Align and Go)”是在运动开始之前对齐 BLDC 转子的两种常用方法。

这是一种简单的方法，但它有两个缺点。首先，电流的大小和持续时间是因电机而定的，因此必须针对每个应用调整系统。其次，转子可以在向前或向后的方向上进行，然后在最终位置稳定；许多电机设计不允许反向旋转。

第二种方法，初始位置检测 (IPD)，使用电感测量来确定转子位置。驱动器以特定顺序在每对绕组上施加电压脉冲 (图 6)，并测量六对绕组中的每一对的电流上升到预设阈值所花费的时间。

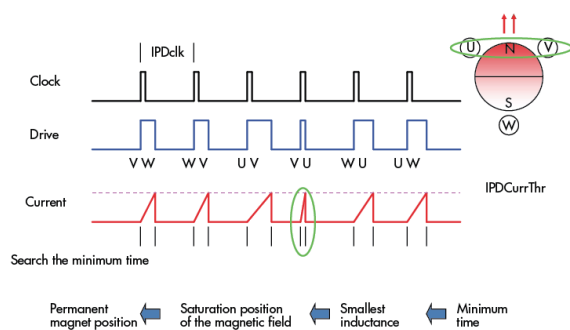


图6 IPD方法依赖于转子位置和电感饱和之间的关系

电流上升时间表示电机绕组中的电感。在特定绕组对之间测量的电感取决于相对于那些绕组的转子位置。最短时间表示最小电感，其发生在与图 5 中的转子北极相 V 和 U 最紧密对齐的两个绕组之间。

IPD 比对齐即通更快，但需要额外的硬件；像对齐即通，它必须针对每个系统进行调整。然而，在定位期间 IPD 具有转子不移动的优点。

这些启动技术使系统具有转子的特定对准，从而使它能够应用正确的驱动状态，使转子沿向前方向加速。

开环操作

在开环操作期间，电机没有关于转子位置的信息。开

环换向的这一阶段 (也称为盲换向) 是非常重要的，因为它与系统可靠性直接相关。如果未正确配置盲转换，则电机将启动，失去同步并停止。

至关重要，在开环状态期间，驱动器可以将电机加速到足够高的速度，以进行精确的 BEMF 估计，同时还支持负载。

在达到切换速度 $Op2ClsThr$ 后，驱动器从开环切换到闭环操作。 $Op2ClsThr$ 的值根据电机的转矩常数 K_T 而变化。具有较高 K_T 的电机需要较低的切换速度，反之亦然。

驱动器灵活性很重要。非常理想的功能包括支持开环加速的可变速度曲线，支持各种负载的可调电流以及可调节的切换速度。TI 的集成驱动器支持采用电机特定值 (存储在 EEPROM 寄存器中) 的不同电机配置。

无传感器控制器的实际方式

具有无传感器换向的 BLDC 控制器中的主要模块有：

- 用于运行无传感器算法的微控制器单元 (MCU) 或类似器件
- 三相半桥功率级
- 功率级栅极驱动器
- 一种准确估算 BEMF 的方法
- MCU 和其他模块的电源

有多种方法可以对 BLDC 控制器进行分区，每种方法都有相关的权衡。具有独立块的多芯片设计使得每个功能可以进行优化，以获得最高的整体性能，但也具有最高的成本，最多的部件数量和最长设计时间。相反，单芯片方法可最大限度地缩短设计时间和部件数量，并降低成本，

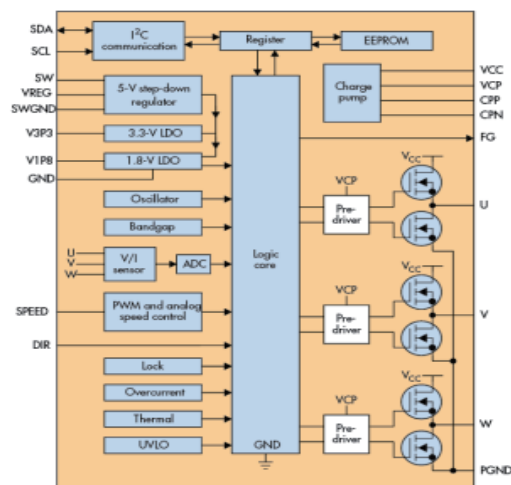


图7 集成的 BLDC 驱动器，如 DRV10983，包含了控制逻辑、功率 FET 和驱动器，以及保护和通信模块。

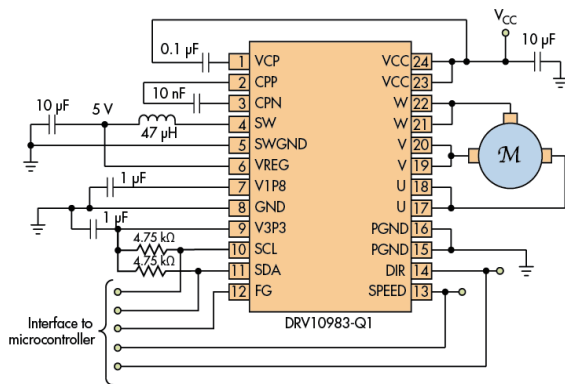


图 8 DRV10983-Q1 提供单芯片无传感器控制，具有正弦换向和数字或模拟控制。

但同时设计灵活性也受到限制。图 7 显示了典型单芯片智能 BLDC 控制器的内部模块。

德州仪器提供多种适用于汽车应用的智能 BLDC 控制器。例如，DRV10983-Q1 是一款带正弦换向的三相无传感器电机驱动器（图 8）。它包括集成功率 MOSFET，可提供高达 2 A 的连续驱动电流。

该器件可通过工业标准 I2C 接口进行配置，以适应不同的电机参数和配置文件，并具有广泛的保护和故障检测功能，以确保可靠的操作。

换向控制算法连续测量电机相电流并周期性地测量 VCC 电源电压。该器件使用此信息来估算 BEMF 的值，

并使其可通过工业标准 I²C 接口供外部使用。

降压开关稳压器有效降低电源电压，为内部电路和外部设备（如微控制器）供电。如果不需要外部电源，降压开关稳压器可配置为线性稳压器以节省成本。

DRV10983-Q1 可以支持模拟和数字控制输入。除了通过 I²C 进行数字控制外，它还包括方向控制（DIR）和速度命令（SPEED）输入，以及速度指示器输出（FG）。

该器件还集成了 EEPROM 存储器，用于预装电机参数和操作设置。寄存器在上电或退出休眠模式后会加载 EEPROM 数据。外部微控制器可以绕过 EEPROM 数据，通过 I²C 直接写入寄存器，动态更新电机参数和操作设置。

DRV10983-Q1 适用于许多低成本汽车应用。它符合严格的 AEC-Q100 认证标准，以及专业的汽车要求，例如能够处理高达 45V 的负载突降。

DRV10983Q1 评估模块 (EVM) 为评估 DRV10983-Q1 和 TI 的无传感器控制算法提供了便捷的方法。

结论

单芯片 BLDC 驱动器在竞争激烈的汽车市场中越来越受到关注，因为与有刷电机相比，它具有成本低、性能优越以及无传感器操作等优势。

德州仪器 (TI) 为各种汽车和其他应用提供一系列智能 BLDC 驱动器，包括 Sith 勋爵头盔。