

Application Brief

使用霍尔效应传感器的 无刷直流电机换向



Carolus Andrews, Manny Soltero, Mekre Mesganaw

为了推动系统运动，可以使用各种类型的电机，例如有刷直流 (DC) 电机、无刷直流电机 (BLDC)、交流 (AC) 电机、通用电机、步进电机或伺服电机。在这些电机中，BLDC 电机具有以下特定优势：

- 高效率
- 可靠性和长寿命
- 紧凑的尺寸
- 低噪声
- 支持各种电机速度
- 不会产生火花

BLDC 电机的诸多优势使其适用于各种应用，这些应用包括：无绳电动工具、空调输出单元以及楼宇安防系统中的自动门。BLDC 电机还可用于汽车中的各种位置，例如滑动门模块、车窗模块、车顶电机模块、雨刮器模块、座椅位置和舒适模块、发动机风扇和泵。

BLDC 换向

为了详细了解 BLDC 电机的工作原理，图 1 显示了 BLDC 电机的简化模型，该模型使用两个磁极（一个北极和一个南极）和三个线圈。在此模型中，转子（电机的旋转部分）上的永磁体被定子（电机的静止部分）上的线圈包围。磁体的运动带动转子旋转。线圈将根据注入其中的电流的方向改变磁极（北或南）。电磁体和永磁体的磁极吸引和排斥作用促使永磁体和转子转动，从而产生了扭矩。

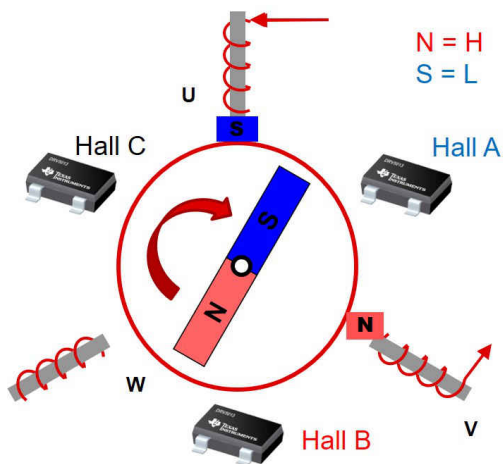


图 1. BLDC 电机模型，换向步骤 1

举例来说，如果磁体位于图 1 中所示的位置，并想要使磁体沿顺时针方向转动，则向线圈 U 注入电流，使其相当于磁体的南极，并向线圈 V 注入电流，使其相当于磁体的北极。线圈 U 产生的南极会排斥永磁体的南极，而线圈 V 产生的北极会吸引永磁体的南极，从而使永磁体和转子顺时针旋转，直至达到图 2 中所示的磁体位置。从图 2 的磁体位置开始，向线圈 W 注入电流，使其相当于磁体的北极，并向线圈 U 注入电流，继续充当磁体的南极，从而使转子再次顺时针旋转。为了使磁体和转子连续作圆周运动，必须按照特定的顺序将电流依次注入不同的线圈中。切换要注入电流的线圈而使转子运动的过程称为换向。

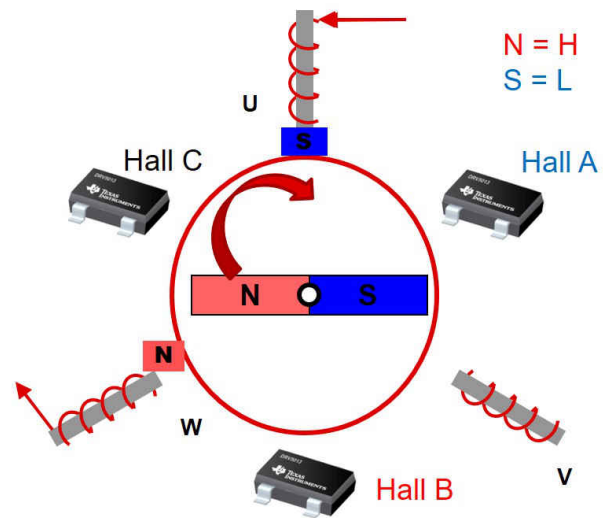


图 2. BLDC 电机模型，换向步骤 2

如图 1 和图 2 所示，要注入电流的相应线圈和注入电流的极性取决于磁体的当前位置。BLDC 换向的工作原理是：首先确定转子的位置，然后根据该转子的位置施加磁场，从而使转子按所需方向旋转。确定转子位置的方法有两种。第一种方法使用位置传感器。第二种方法是无传感器方法，即根据反电动势 (EMF)（电机在旋转时产生的电压）确定位置。电机生成的反电动势波形的振幅与电机速度成正比。

有传感器换向包括以下优势：

- 由于电机生成的反电动势波形的振幅与电机速度成正比，因此在低速时不能使用无传感器换向方案，这是因为反电动势太小而无法测量以确定转子位

置。如果系统在零速度下需要较大的扭矩，则需要使用有传感器换向。

- 在很高的电机速度下，使用反电动势时很难发生转换。如果电机以很高的速度转动，使用有传感器换向来缓解此问题。
- 有传感器换向相对简单，不需要像无传感器换向那样的复杂计算。

对于有传感器换向，可以使用霍尔位置传感器、编码器或旋转变压器。在这些器件中，霍尔位置传感器因其成本相对较低而广泛使用。在不同类型的霍尔位置传感器中，霍尔锁存器用于提供简单的六步换向法。使用这些霍尔锁存器时，需要南北极交替来切换器件的输出，如图 3 所示。

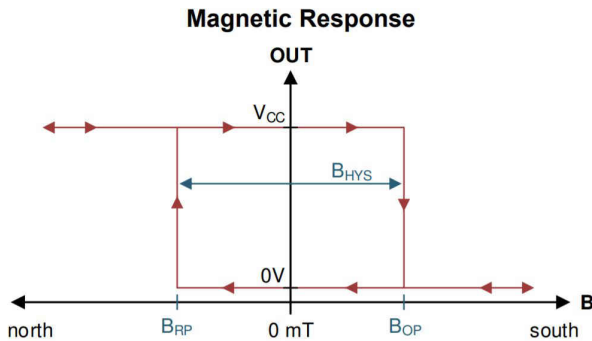


图 3. 霍尔锁存器的输出

对于图 3 中所示的锁存器，只有当器件检测到磁体南极且感应到的磁通密度大于磁通密度工作点（在图中用 B_{OP} 表示）时，输出才会被置为低电平。在器件检测到磁体北极且感应到的磁通密度大于锁存器的磁通密度释放点（在图中用 B_{RP} 表示）前，输出将保持低电平状态。在没有磁输入的情况下，锁存器的最后一个状态为有效。

图 4 显示了使用三个霍尔锁存器的有传感器六步电机换向控制方案的输出波形。在此方案中，一次仅驱动两个相位，第三个相位处于高阻态。在图中，数字表示换向步骤。具体而言，步骤 1 与图 1 中所示的状态对应，步骤 2 与图 2 中所示的状态相对应。图 4 中的霍尔 A、霍尔 B 和霍尔 C 波形对应于不同换向步骤中霍尔锁存器的输出。相位 U、相位 V 和相位 W 波形表示要应用到相位的波形，以便磁体移动到下一个换向步骤。在图 4 中，“+”表示注入电流以便将南极施加到相位，“-”表示注入反向电流以便将北极施加到相位，而“Z”是指处于高阻态的相位。该图显示了六个独立的霍尔状态，其中每个状态对应一个不同的选项，用于驱动相位以保持电机旋转。因此，霍尔状态可提供有关如何驱动相位以保持电机旋转的信息，其中霍尔传感器的状态可用作软件查找表的索引，用于获取有关如何根据转子当前位置驱动不同相位的信息。

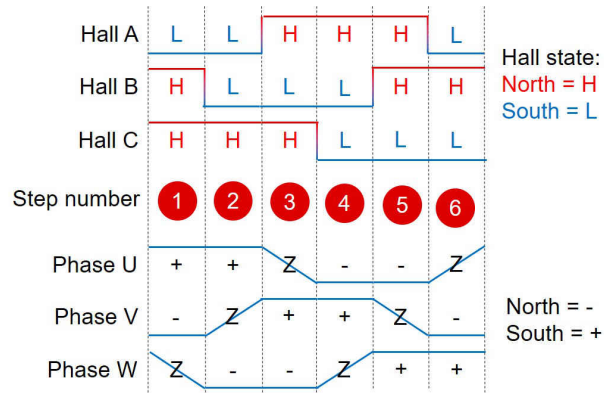


图 4. 六步电机换向控制方案

前面的示例使用 BLDC 电机的简化模型。通常，BLDC 电机具有的磁极和线圈比图中显示的要多。使用的线圈和转子磁极越多，越能有效控制磁体。磁体可使用多个相邻的条形磁体，其中相邻磁体的极性彼此相反。使用的磁体越多，霍尔传感器在给定时间内的状态转换次数也越多，从而减少霍尔传感器完成状态周期所需的转子旋转角度。

应放置三个霍尔位置传感器，使其各自输出的角度差 120° 。该角度称为电角，它可能与各器件机械放置的实际角度不同。从电机轴的中心，每个传感器间距的度数（机械角）可设置为 $2/[\text{极数}] \times 120^\circ$ ，以产生所需的 120° 电角。

在图 1 和图 2 的简化双极示例中，机械角和电角相等。但是，对于磁极数较多的系统，由于磁极数增加，电角和机械角不相等，从而缩短了霍尔输出状态的周期时间。为了说明这一点，假设系统中有 12 个磁极（6 个北极和 6 个南极）。为了使 12 磁极系统中的霍尔锁存器之间实现 120° 电气隔离，可以放置霍尔位置传感器，使其之间的机械角为 $\pm 20^\circ$ 。

BLDC 电机系统架构

图 5 显示了 BLDC 电机控制的系统方案。三个半桥电路用于将电机各相连接到 VCC 或 GND，从而在线圈中注入电流，以便为不同相位创建必要的磁场。在此系统中，使用电机控制器来指示换向。控制器可以是微控制器、FPGA、DSP、数字状态机或纯模拟电路。电机驱动器用于实现控制块与半桥电路连接，从而允许电机驱动器通过半桥电路来指示换向。霍尔位置传感器向电机控制器提供转子位置信息，供电机控制器用于确定应如何驱动半桥电路。作为图 5 中所示系统架构的替代方案，某些电机驱动器具有集成半桥电路，因此无需使用图中所示的外部半桥电路。

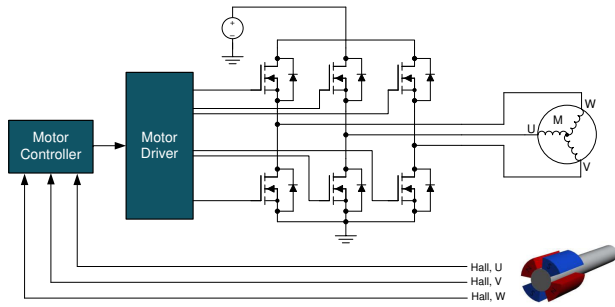


图 5. 用于 BLDC 电机控制的闭环系统

为 BLDC 电机换向选择合适的霍尔锁存器

通常根据以下规格选择用于 BLDC 换向的合适霍尔锁存器：

- **灵敏度：**锁存器的灵敏度是指 B_{OP} 和 B_{RP} 规格，该规格会使暴露于磁体中的锁存器切换输出状态。锁存器检测到的磁通密度取决于磁体的尺寸、磁性材料以及磁体到传感器的距离。高灵敏度锁存器具有低 B_{OP} 和 B_{RP} 规格，支持电机使用更小的磁体来创建更紧凑的电机设计。在使用相同磁体的情况下，高灵敏度锁存器还具有比低灵敏度锁存器更大的磁体到霍尔传感器距离。
- **电流消耗：**如果应用由电池供电，则霍尔位置传感器应具有低电流消耗，以便更大程度延长电池寿命。
- **工作电压范围：**由于各种系统具有不同的可用电源电压，因此应选择一个在系统电压范围内工作的霍尔锁存器。如果系统的可用电源电压均超出霍尔位置传感器的工作电压范围，则需要一个额外的电压稳压器来生成一个电压轨，以便为霍尔位置传感器供电。
- **开漏与推挽输出：**当需要使逻辑高电平输出电压与霍尔位置传感器的 VCC 电压处于不同的电压电平时，选择开漏输出。与开漏输出相比，推挽输出不需要上拉电阻器，从而减小了解决方案尺寸。
- **频率带宽：**器件频率带宽决定了可检测到并转换为输出的超快速变化磁场，从而确定霍尔锁存器仍可检测到的电机旋转速度。
- **抖动：**霍尔锁存器的抖动是当电机以恒定速度旋转时输出脉冲宽度发生的变化。抖动会在转子位置的测量中引入角度误差。
- **输出延迟，刷新周期：**输出延迟定义为磁场超过 B_{OP} 或 B_{RP} 阈值的时间与输出反映其新值所需的时间之间的值。在采样器件中有一个刷新周期，也称为采样率，这是器件在采集新磁性采样之前所需的一段时间，用于视需要更新输出。采样器件往往会受到较长的输出延迟时间的影响，因为用户还必须考虑输入采样时的刷新周期以及更新输出所需的输出延迟。
- **温度：**如果高温电机应用采用霍尔传感器，则霍尔传感器需要在高温下运行。
- **尺寸：**在设计紧凑型电机时，器件的物理尺寸非常重要。医疗和牙科领域使用的电池供电型手持式钻机是一个适合使用紧凑型电机的系统示例。在该系

统中，较小的电机可降低系统的总重量，从而缓解最终用户的疲劳和压力，同时提供相同的扭矩和电池寿命。因此，较小的霍尔位置传感器非常有用，因为它们可以巧妙放置在电机外壳内，而不会影响电机设计的总直径。为了说明这一点，下面以 TO-92 和 X2SON 封装类型为例说明。传统的 TO-92 封装（图 6）围绕转子的圆周合理布置。对于内部转子电机设计，这通常不是问题，因为定子有足够的空间放置霍尔传感器（未显示定子）。这种方法的缺点是，它可能会导致电机设计的直径更大。在无槽 BLDC 电机中，电机绕组内没有空间。霍尔位置传感器的理想位置是直接放置在电机上方，在转子轴轴向中心的 PCB 上（图 7）。此配置表明，此封装类型支持开发出更小的电机设计。

有关所涵盖的某些锁存器规格的更多深入信息，请参阅关于霍尔效应锁存器规格的精密实验室视频。



图 6. 使用 TO-92 霍尔传感器的转子位置

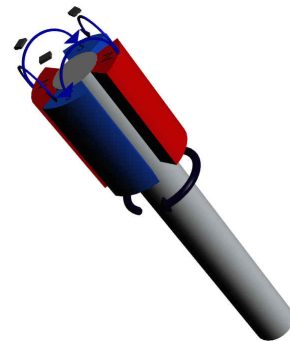


图 7. 使用表面贴装霍尔传感器的转子位置

TMAG5115 是一系列高性能数字霍尔效应锁存器，旨在实现高性能。该器件可为需要高磁精度的系统提供低抖动和低输出延迟。此外，由于电机系统可能会产生高于电源的电压，因此 **TMAG5115** 能够处理 2.5V 的宽输入电压、绝对最大值为 30V。更宽的电压范围还允许用户在无需额外稳压器的情况下从主电源线运行器件。**TMAG5115** 还提供 TI 霍尔效应锁存器产品组合中可用的最高频率带宽，支持在快速电机应用或具有高磁极数的电机中使用传感器。

DRV5011 是一款数字霍尔效应锁存器，专为电机和其他旋转系统而设计。此器件具有高效低压架构，工作电压范围为 2.5V 至 5.5V，采用标准 SOT-23 封装以及薄型 X2SON 和 DSBGA (WCSP) 封装。与 X2SON 相比，DSBGA 封装的尺寸减少了 58%。表 1 显示了不同封装的比较。

表 1. 封装比较

封装	封装尺寸
SOT-23 (3 引脚)	2.92mm × 1.3mm
X2SON (4 引脚)	1.1 mm × 1.4 mm
DSBGA (WCSP) (4 引脚)	0.8mm × 0.8mm

该器件的数字输出是一个推挽驱动器，无需使用外部上拉电阻器，使系统更加紧凑小巧。

备选器件建议

选择规格符合系统性能和功能要求的霍尔位置传感器。对于空间较宽松的应用，[DRV5015](#) 提供了一个采用 SOT-23 封装、高带宽的良好解决方案。在 TI 的产品系列中，[DRV5015](#) 还提供了灵敏度超高的解决方案，并支持使用更小的永磁电机。另一个受欢迎的产品是 [DRV5013](#)，采用 SOT-23 和 TO92 封装。DRV5013 是一款工作电压高达 38V VCC 的高压解决方案。[表 2](#) 中的链接提供了有关这些备选器件规格的更多详细信息：

表 2. 备选器件建议

器件	特性
DRV5013	高压
DRV5015	高敏感度、低压

为了快速评估 BLDC 电机中的 TI 霍尔效应锁存器，TMAG5115EVM 遵循各种 NEMA17 BLDC 电机中霍尔效应传感器板的标准外形。这意味着该 EVM 可用作这些板的直接插入式替代产品，并可用于以这种方式评估器件性能。如需更多信息，请参阅 [TMAG5115 评估模块](#) 用户指南。

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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司