

关于电机开关霍尔的应用方案分析

引言

在现代电气驱动领域，电机作为将电能转换为机械能的核心装置，其性能和控制精度直接决定了整个系统的能效与智能化水平。特别是在无刷直流电机（Brushless DC Motor, BLDC）——这一基于电子换向的先进电机中，开关型霍尔效应传感器（以下简称“开关霍尔”）扮演着不可或缺的角色。它如同电机的“眼睛”，实时侦测转子位置，为精确的换向控制提供最关键的逻辑依据。本文将从电机入手，深入剖析其工作原理，系统分析开关霍尔在电机中的应用的工程奥秘。

三相无刷电机的结构

要理解霍尔的作用，必须先理解无刷电机的工作原理。我们以最常见的三相无刷直流电机（BLDC）为例。

基本结构

定子：由硅钢片叠压而成，其上嵌有三相对称的绕组（A, B, C相），各相绕组在空间上相隔120度分布。

转子：由永磁体（如钕铁硼）构成，形成固定的磁极（N极和S极）。

核心原理——换向

传统有刷电机通过电刷和机械换向器，在恰当的时机改变转子绕组中的电流方向，从而产生持续的旋转力矩。无刷电机则反其道而行之：转子是永磁体，定子绕组通电产生磁场。要使转子持续旋转，就必须按一定顺序、在特定时刻给不同的定子绕组通电，使得定子产生的磁场始终“牵引”或“推动”转子磁极前进，这个过程称为电子换向。

图1为无刷电机内部结构简图。

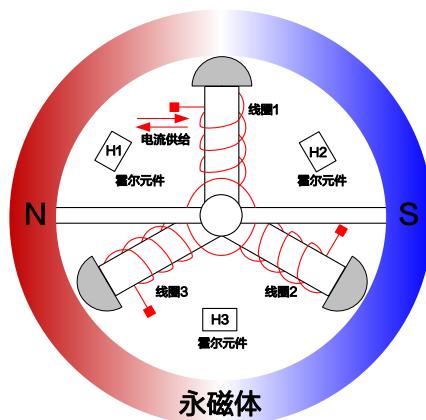


图1.无刷电机内部结构简图

三相无刷电机的旋转原理

转矩的产生

电机转矩的最大化产生，遵循一个基本原则：定子磁场轴线与转子磁场轴线应始终保持一个近似90度的夹角，如果两者对齐，则只有吸力而无转矩。因此，控制器需要精确地知道转子当前的位置，以便决定下一时刻应该给哪两相绕组通电，从而产生最大的推动转矩。

下面将按照步骤①~⑥，如图2~图3所示，来说明无刷电机的旋转原理。为了易于理解，这里将永磁体从圆形简化成了矩形。

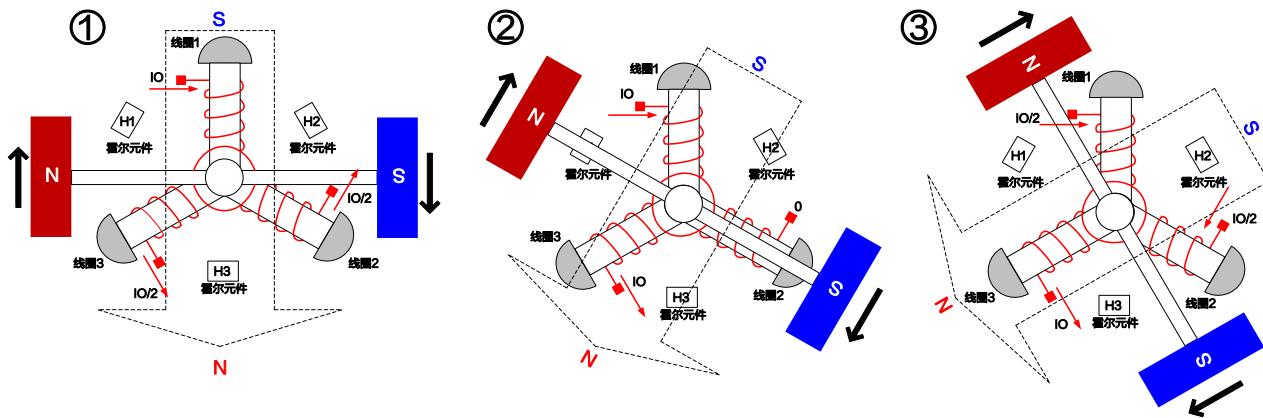


图 2. 无刷电机的旋转原理 (①~③)

①转子旋转 0 度时

在三相线圈中，设线圈 1 固定在时钟的 12 点钟方向上，线圈 2 固定在时钟的 4 点钟方向上，线圈 3 固定在时钟的 8 点钟方向上。设 2 极永磁体的 N 极在左侧，S 极在右侧，并且可以旋转。使电流 IO 流入线圈 1，以在线圈外侧产生 S 极磁场。使 $IO/2$ 电流从线圈 2 和线圈 3 流出，以在线圈外侧产生 N 极磁场。

在对线圈 2 和线圈 3 的磁场进行矢量合成时，向下产生 N 极磁场，该磁场是电流 IO 通过一个线圈时所产生磁场的 0.5 倍大小，与线圈 1 的磁场相加变为 1.5 倍。这会产生一个相对于永磁体成 90 度角的合成磁场，因此可以产生最大扭矩，永磁体顺时针旋转。

当根据旋转位置减小线圈 2 的电流并增加线圈 3 的电流时，合成磁场也顺时针旋转，永磁体也继续旋转。

②转子旋转 30 度时

在旋转了 30 度的状态下，电流 IO 流入线圈 1，使线圈 2 中的电流为零，使电流 IO 从线圈 3 流出。

线圈 1 的外侧变为 S 极，线圈 3 的外侧变为 N 极。当矢量合成时，产生的磁场是电流 IO 通过一个线圈时所产生磁场的 $\sqrt{3}$ (约 1.72) 倍。这也会产生相对于永磁体的磁场成 90 度角的合成磁场，并顺时针旋转。

当根据旋转位置减小线圈 1 的流入电流 IO 、使线圈 2 的流入电流从零开始增加、并使线圈 3 的流出电流增加到 IO 时，合成磁场也顺时针旋转，永磁体也继续旋转。

③转子旋转 60 度时

在转子旋转了 60 度的状态下，电流 $IO/2$ 流入线圈 1，电流 $IO/2$ 流入线圈 2，电流 IO 从线圈 3 流出。

线圈 1 的外侧变为 S 极，线圈 2 的外侧也变为 S 极，线圈 3 的外侧变为 N 极。当矢量合成时，产生的磁场是电流 IO 流过一个线圈时所产生磁场的 1.5 倍 (与①相同)。这里也会产生相对于永磁体的磁场成 90 度角的合成磁场，并顺时针旋转。

④~⑥以①~③相同的方式旋转。

这样，如果不断根据永磁体的位置依次切换流入线圈的电流，则永磁体将沿固定方向旋转。同样，如果使电流反向流动并使合成磁场方向相反，则会逆时针旋转。

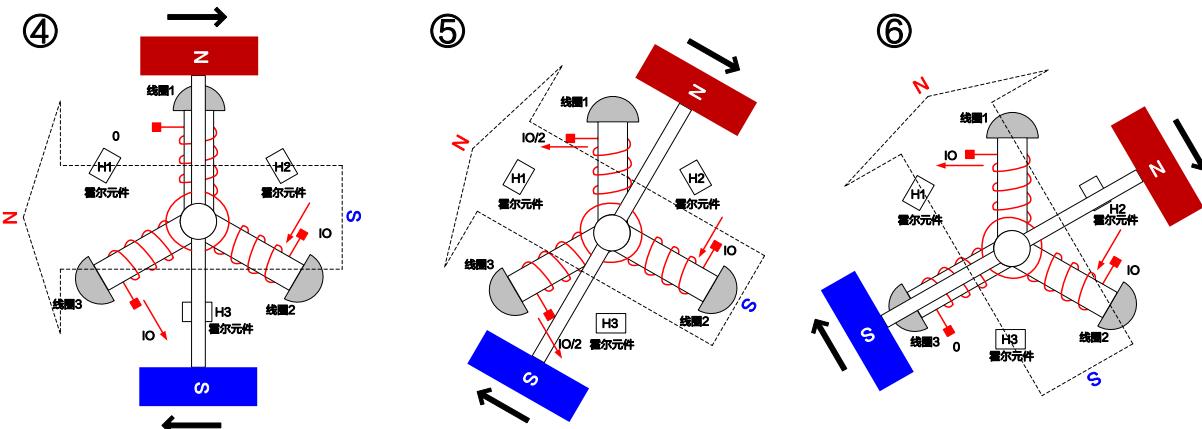


图 3. 无刷电机的旋转原理 (④~⑥)

锁存型霍尔在三相无刷电机中的应用

如上所述，三相无刷电机通过按特定顺序给三个线圈通电来产生旋转磁场，从而驱动永磁转子旋转。霍尔传感器的作用就是精确检测转子永磁体的实时位置，以便控制器在正确的时刻切换电流（换向）。

对称的开关信号

电机的转子磁铁是南北极交替排列的。锁存型霍尔对 S 极和 N 极分别做出“开”和“关”的响应，这正好产生了一个占空比接近 50% 的对称方波信号。这对于生成均匀的换向点至关重要，能确保电机运行平稳、转矩均匀，图 4 为锁存型开关霍尔的输出特性。

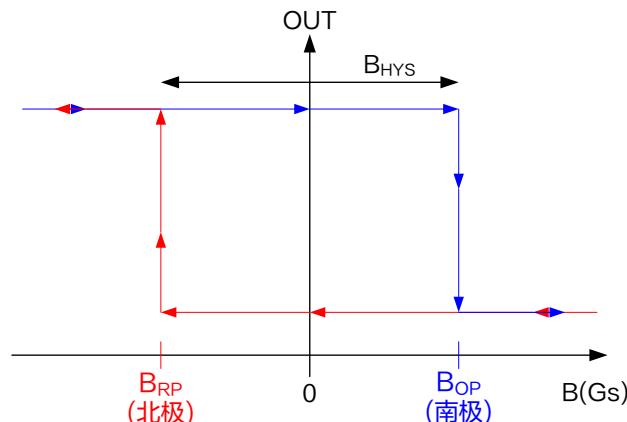


图 4. 锁存型开关霍尔的输出特性

明确的换向点

三个锁存型霍尔传感器以特定电角度间隔时，转子的旋转会使它们依次感应到 S 极和 N 极，从而输出三路相位互差 120 度的方波信号。控制器通过解读这三路信号的组合（如表 1 所示共有 6 种状态），可以精确地知道转子在任意时刻处于哪个 60 度扇区，并执行相应的换向操作。

表 1. 控制器信号状态

霍尔元件输出电平 转子旋转角度（度）	H1	H2	H3
60	1	0	0
120	1	1	0
180	0	1	0
240	0	1	1
300	0	0	1
360	1	0	1

120 度电角度与 60 度电角度的解析

由上表可知，当三个霍尔传感器间隔 120 度电角度时，转子每转动 60 度，霍尔状态变换一次，霍尔输出仅有以上 6 种有效状态，没有 000 和 111 这两种输出状态。当三个霍尔传感器相互间隔 60 度电角度时，同样转子每转动 60 度变换一次状态，霍尔输出状态包括：000、001、101、111、110、010，包含 000 和 111 这两种特殊状态。120 度电角度控制更常见，控制逻辑相对简单，控制器根据霍尔安装方式匹配相应的控制算法即可。相较于 120 度电角度控制，60 度电角度控制方案易导致错误换相，可能造成电机抖动、效率下降甚至损坏，但当极对数增加时，120 度电角度控制无法均匀分割电气角度，需采用 60 度电角度控制。

三相无刷电机的驱动

图 5 为随着转子转动 360 度，霍尔元件感受到的电压波形。当对霍尔元件施加 N 极磁场时产生高电平，当施加 S 极磁场时产生低电平，并且磁场的强度根据永磁体的旋转位置呈正弦波变化，霍尔元件电压被差分放大器转换为矩形波形（图 5 中的 H1/H2/H3 矩形波形），通过运算合成输出电流波形，如图 5 中的线圈电流波形所示。各线圈在各相位差 120 度的状态

下，在120度期间导通并使电流流入线圈，在60度期间关断，并在120度期间导通使电流流出，再在60度期间关断，并重复这样的周期循环（垂直虚线每格增量为30度），这个激励期间为120度，故被称为“120度激励”。因此，控制器可以精确地知道转子当前的位置，以便决定下一时刻应该给哪两相绕组通电，从而产生最大的推动转矩。

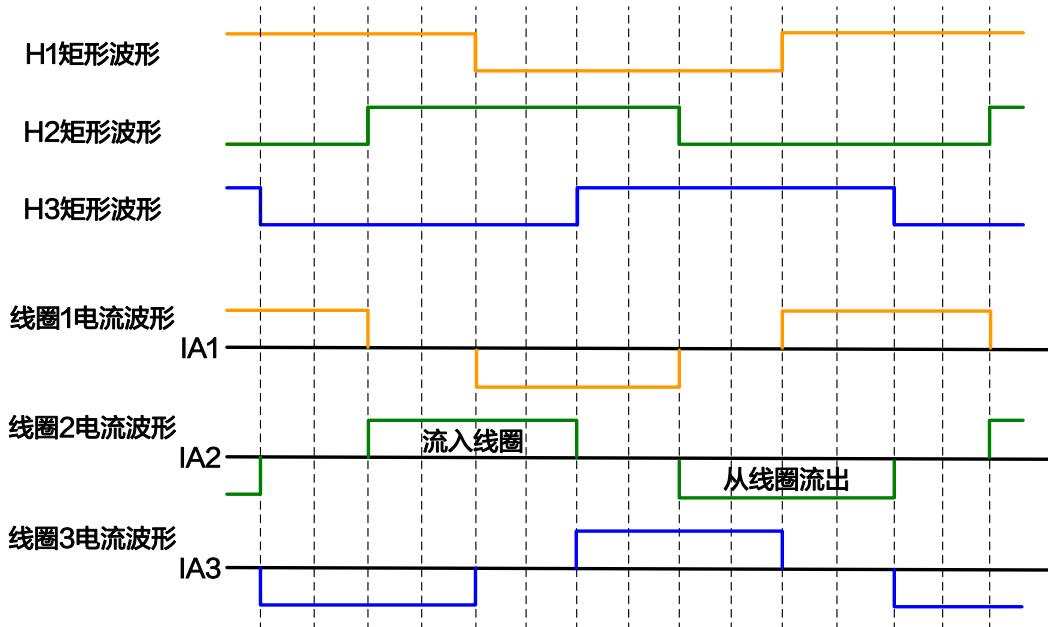


图 5.三相无刷电机驱动波形

芯龙技术高压锁存型霍尔芯片：电机应用中的高可靠性解决方案

随着工业4.0与新能源技术的迅猛发展，市场对霍尔芯片提出了更高要求：宽工作电压、强抗干扰能力、优异的温度稳定性以及卓越的可靠性。针对这些挑战，我司研发的高压锁存型霍尔芯片通过创新设计，成功突破了传统霍尔元件的技术瓶颈，为电机应用提供了全方位的解决方案。

卓越的抗浪涌性能

电机在运行过程中产生的反电动势与电磁干扰是霍尔芯片失效的主要原因。我司研发的高压锁存型霍尔芯片通过特殊的保护电路设计，实现了输入端130V、输出端90V的最小抗浪涌电压能力，这一指标远超市场同类产品（通常为60V–80V），能够有效抑制电机线圈切换时产生的瞬态高压，有效钳制电机换向过程中产生的高频脉冲干扰，显著提高了在恶劣环境下的可靠性。

温度稳定性与可靠性保障

电机工作环境温度变化剧烈，对霍尔芯片提出了严峻挑战。我司研发的高压锁存型霍尔芯片采用温度补偿技术，在-40℃至150℃的全温度范围内，磁工作点变化不超过10%，而市场标准产品通常在15%–25%之间。这一特性确保了电机在整个工作温度范围内保持一致的换相精度。这一指标通过精心设计的温度补偿网络实现，能够调整霍尔偏置电流，抵消温度对磁工作点的影响。在极端高温条件下，我司研发的高压锁存型霍尔芯片的磁滞特性表现出卓越的稳定性。传统霍尔芯片在125℃以上时往往出现磁滞窗口缩小甚至失效的现象，而我司研发的高压锁存型霍尔芯片通过特殊的磁滞生成电路与温度适应算法，确保即使在150℃工作温度下，仍能保持较宽的磁滞宽度。这一设计保证了电机在高温运行状态下换向信号的精确性和稳定性，避免了因霍尔信号抖动导致的电机抖动、效率下降或异常停转问题。

结论

开关型霍尔效应传感器，以其结构简单、成本低廉、可靠性高的特点，在永磁无刷电机，特别是无刷直流电机（BLDC）中奠定了其作为核心位置反馈元件的地位。我司研发的高压锁存型霍尔芯片通过宽电压供电、卓越的抗浪涌能力、优异的温度稳定性以及坚固的输出架构，为电机应用提供了全方位的解决方案。其设计专注于解决电机控制系统中的实际工程挑战，在可靠性、精度和耐用性方面树立了新的行业标准，是各类严苛电机应用环境的理想选择。