

AED



马达的基本认识 与驱动





大纲

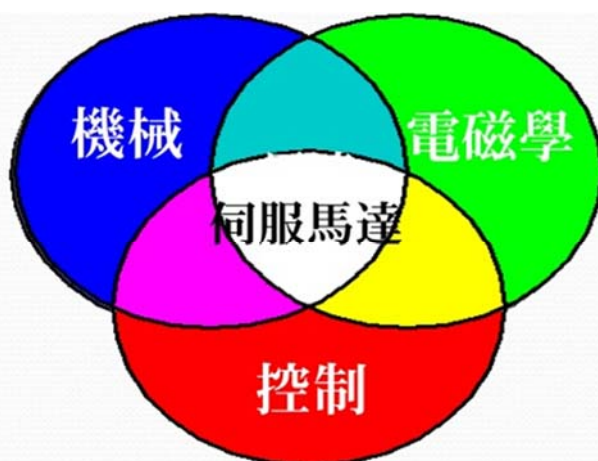
- 马达基础原理
- 马达分类及运转原理
- 脉冲宽度调节技术(电源管理)
- **MOSFET & IGBT 简介**
- **BLDC 驱动电路**
- **BLDC 驱动原理**



马达基础原理

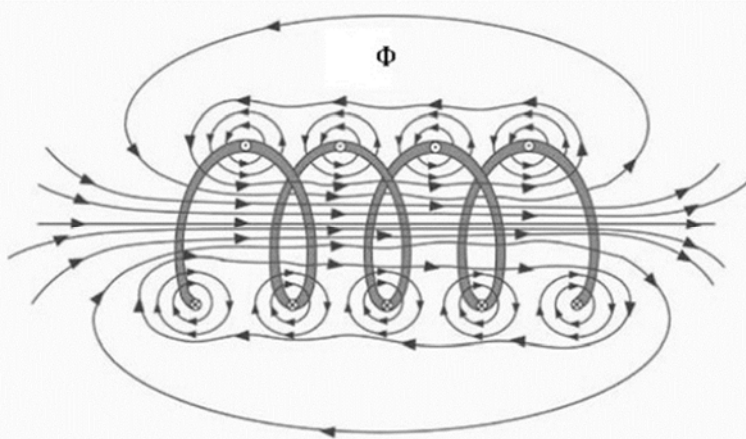
马达与电机整合：

- 马达是许多**电动机**的动力来源，是一个能将**电能**转换成**机械能**的装置。
- 若再将**控制理论**应用于马达上，就成了现今工业界使用最广泛的电机整合系统，也就是**伺服马达(Servo Motor)**



电磁關係：

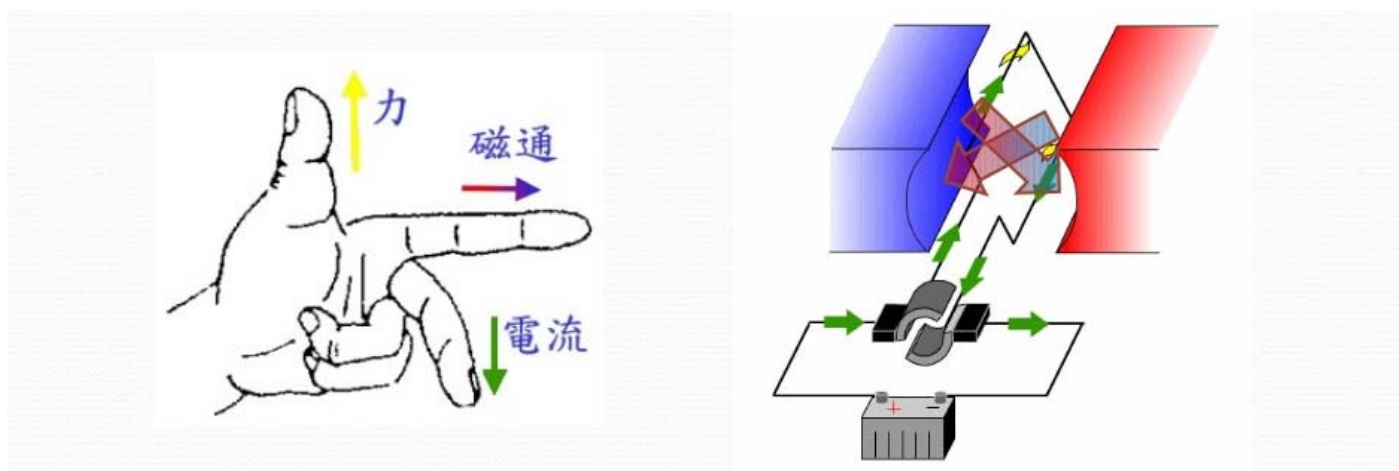
- 根据电磁学理论，我们知道线圈在通电后，可使线圈产生磁场，藉由改变线圈内**电流的流向与大小**，即可改变线圈的磁场方向与大小，产生磁力控制马达转子旋转。





基础旋转原理(DC Motor)：

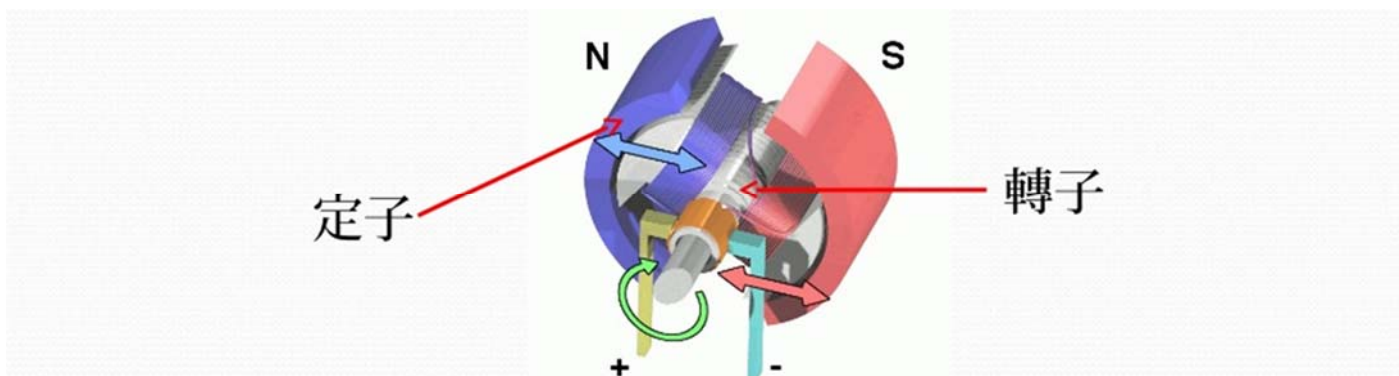
- 下图中二个固定的场磁铁提供恒定的磁通方向，而中间的线圈利用电刷令其旋转至对应角度时，**反转自身的电流流向**，根据电动机左手定则，线圈电流的换相使磁力恒产生令线圈旋转的定向力矩。



马达分类及运转原理

基本构造：

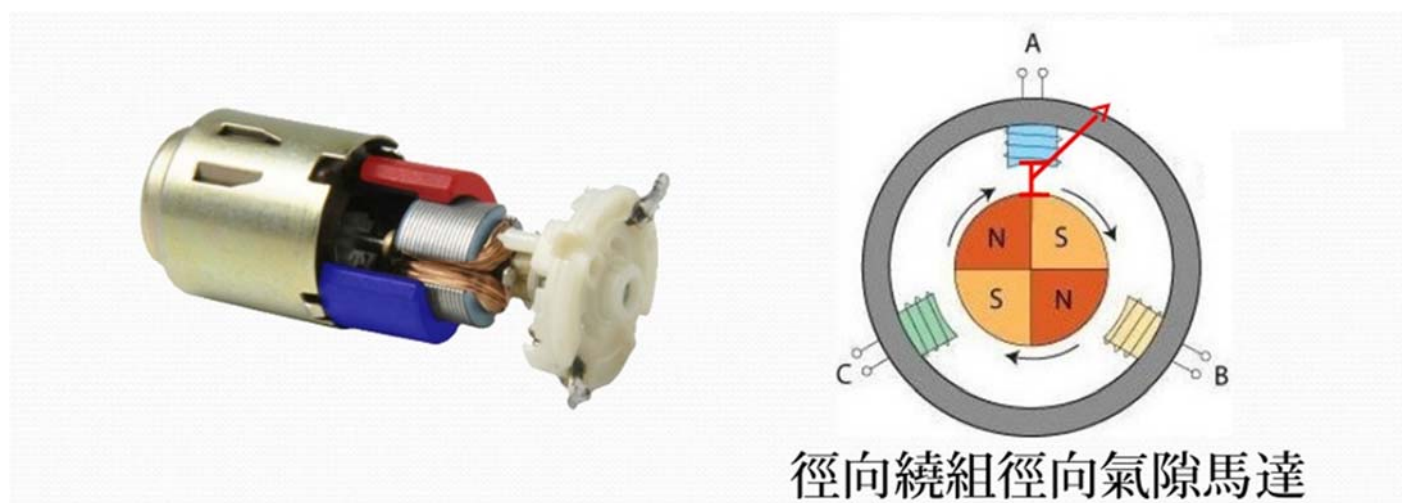
- 马达的种类很多，以基本结构来说，其组成主要由**定子(Stator)**和**转子(Rotor)**所构成，定子在空间中静止不动，转子则可绕轴转动，由轴承支撑。
- 定子与转子的磁遇面之间会有一定的**空气间隙(气隙)**，以确保转子能自由转动。



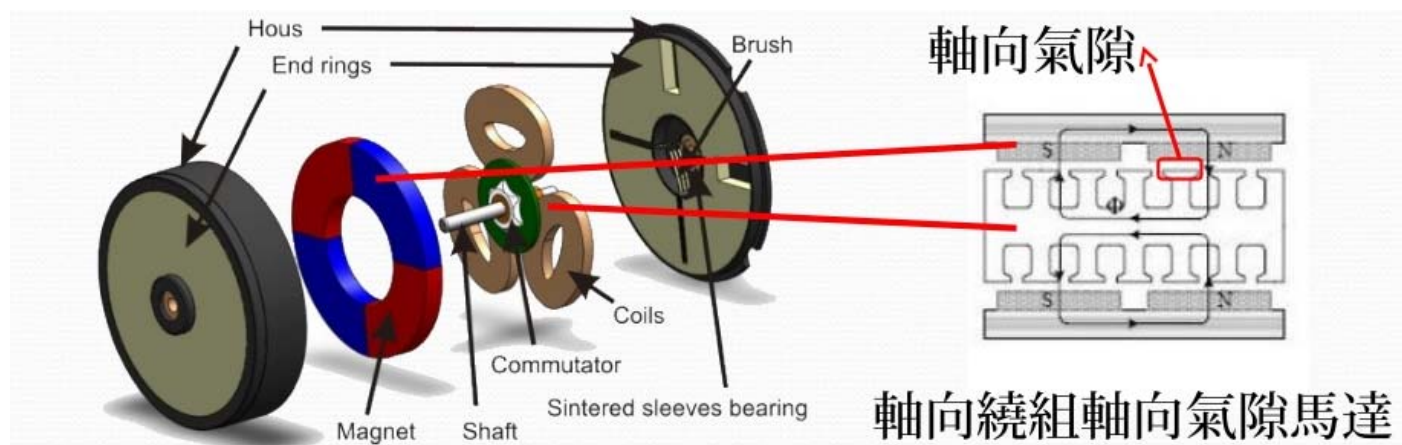


绕组与气隙：

- 一般的马达其气隙及绕组通常为径向的，但是由于马达的应用范围广泛，因此也渐渐发展出不同的需求，径向绕组径向气隙的马达在外型上常受限为圆筒状。

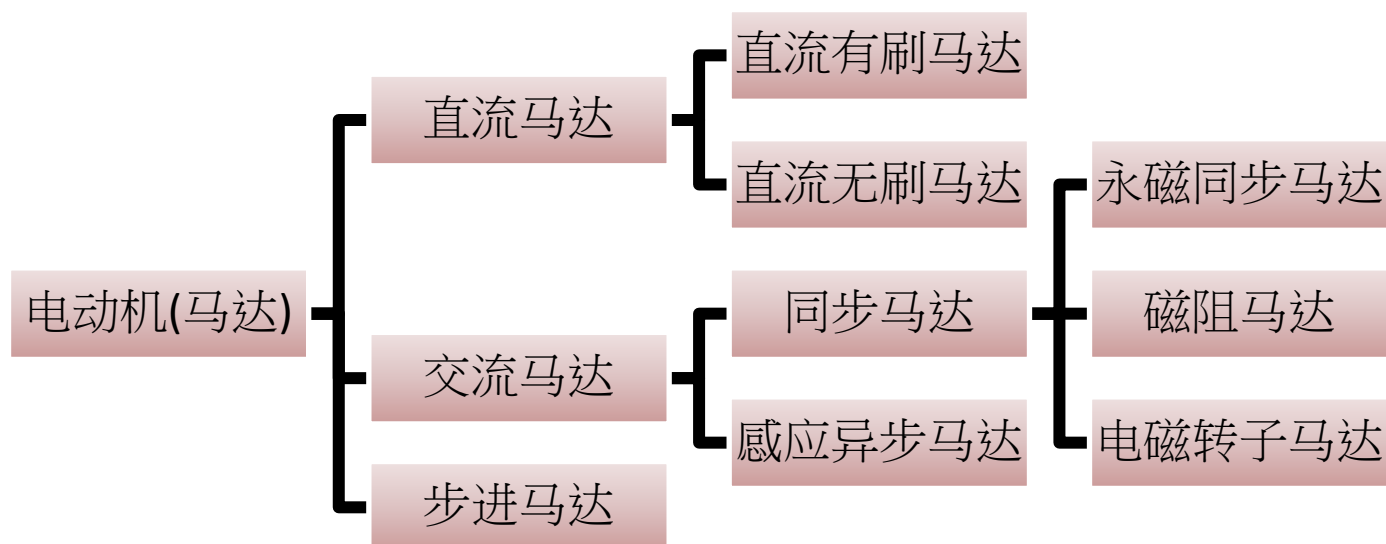


- 为了让马达能在外型上有更多的选择，因而发展出了轴向绕组与轴向气隙的马达，依下图所示如马达外型需为扁平形状，则轴向绕组轴向气隙的马达比径向的更能胜任。



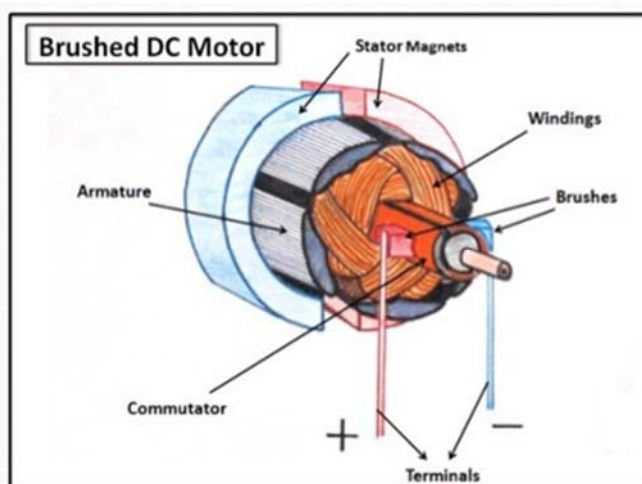


日常馬達的簡單分類：



直流有刷马达(DC Motor)：

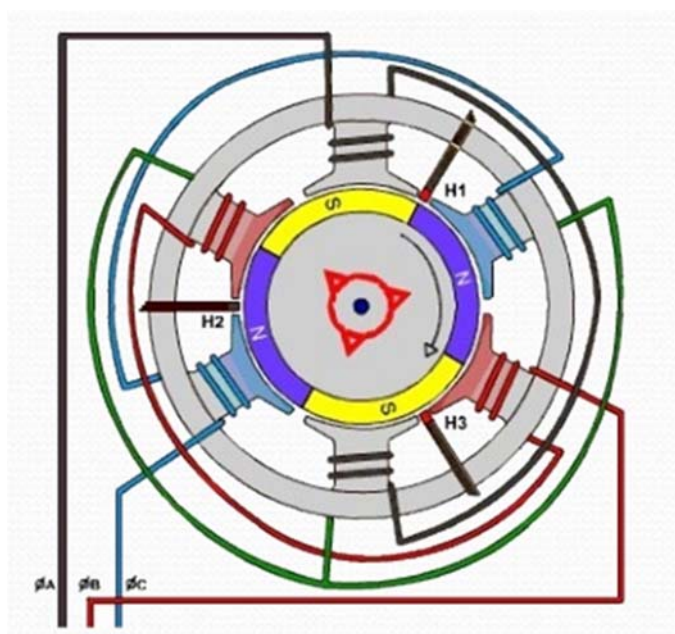
- 最初也是构造及控制最简单的一种马达。转子线圈利用**电刷**令电流在正负相间换相，转速由绕组线圈的电压决定，驱动电路简单，如不须对马达进行控制，直接以直流电供电即可使马达旋转，**无须驱动电路**即可旋转。



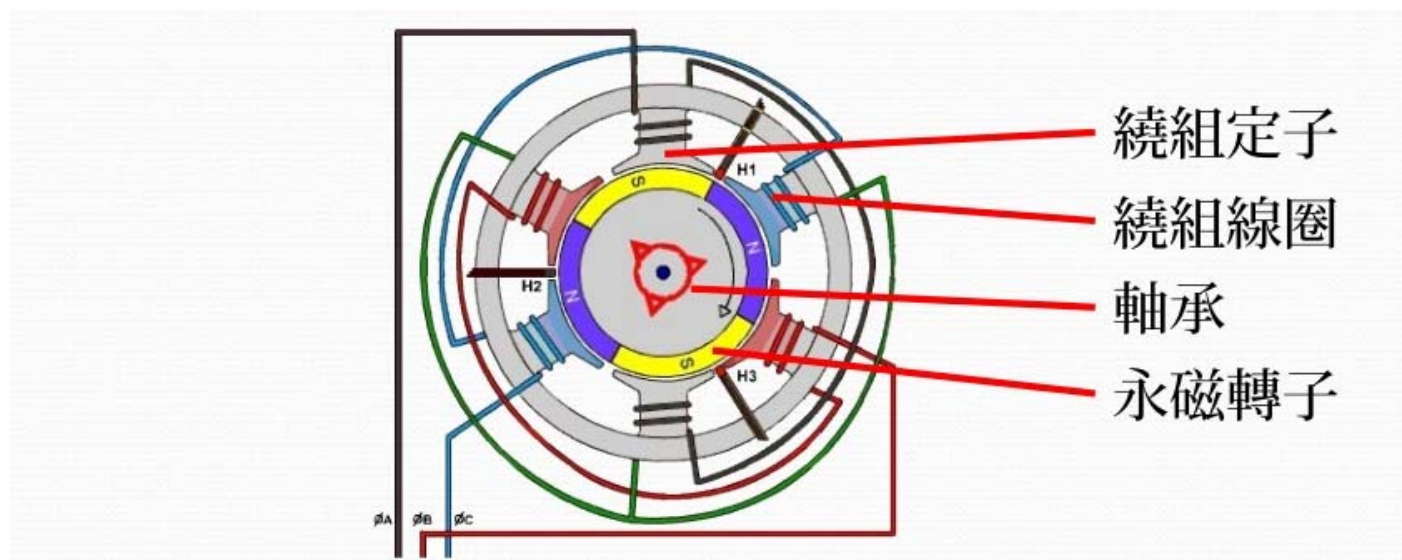


直流无刷马达(BLDC Motor)：

- BLDC 之所以称无刷直流马达是因为 BLDC 无须透过电刷进行电流换相，且马达特性与 DC Motor 相同，转速同样由绕组线圈的电压决定，与 DC Motor 相比少了噪音与电刷磨损的问题。
- BLDC 无法直接通电旋转，需透过驱动电路将单一直流电转换成三相电流，三相直流马



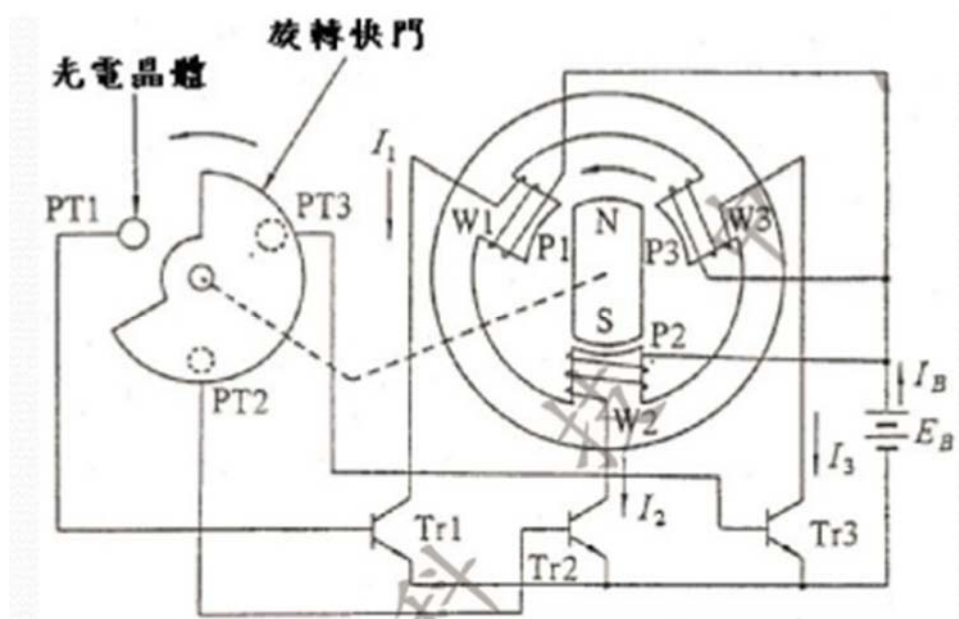
- BLDC 以绕组线圈为定子，其实在各种马类型中，除了 DC Motor 因为具有电刷构造，，因而是以绕组线圈为转子外，其他类型马达的绕组线圈皆为定子，除非你希望在马达旋转时，电源与电线跟着一起旋转。



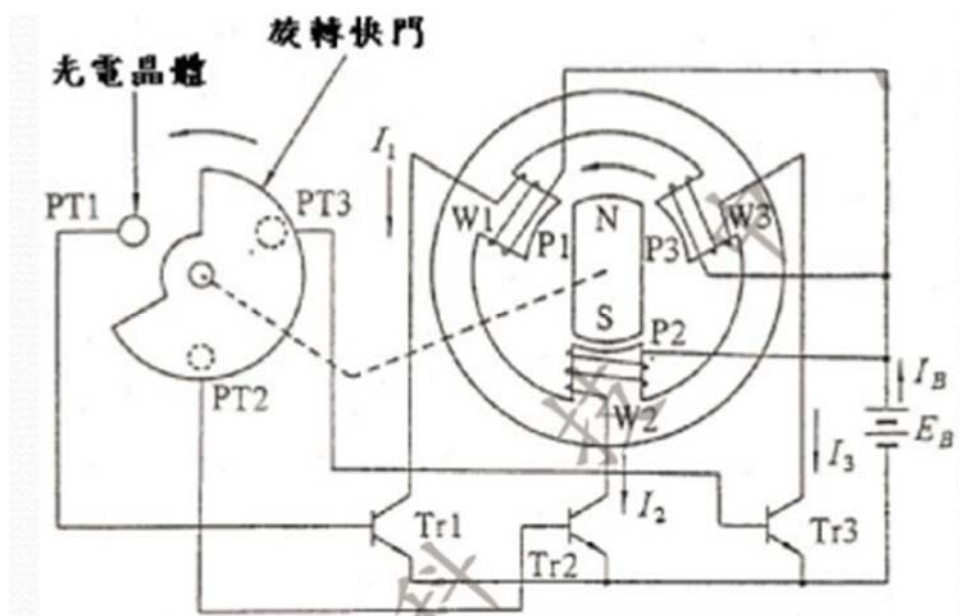


三相单极马达(BLDC Motor)：

- 在 BLDC 发展初期，积体电路技术尚未普及，当时的 BLDC 大多为三相单极型驱动电路透过与马达转子连动的**旋转快门**与**光电元件**可以达成 120°。机械式换相，下方图中为例，当 PT1 未被旋转快门遮蔽时，则电路开关单独 Tr2 与 Tr3 为断路，W1 因此通电产生磁场吸引转子磁铁的 N 极，只要电路通电转子就会持续转动。



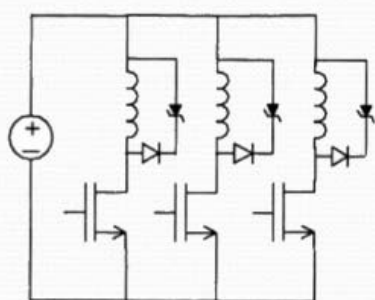
- 单极型 BLDC 虽然电路简单且可进行机械式换相，但随着积体电路的普及与微处理器的出现为了提高 BLDC 的效能，此种类型的马达已渐渐的不符合大部分的需求。



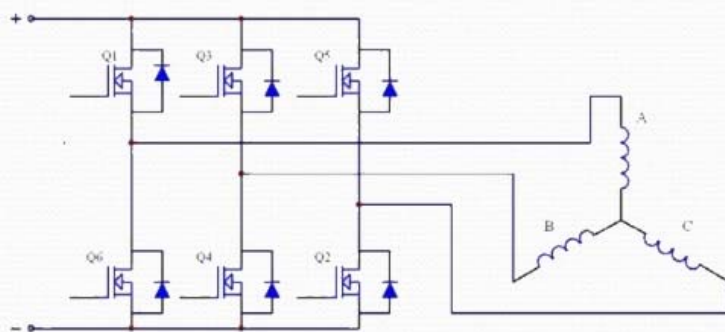


三相双极马达(BLDC Motor)：

- 双极型 BLDC 采用三相电桥式电路进行驱动之所以称单极型、双极型两者之间的主要差异在于单极型线圈的电流为直流电，双极型线圈的电流则是在正负间转换的交流电。



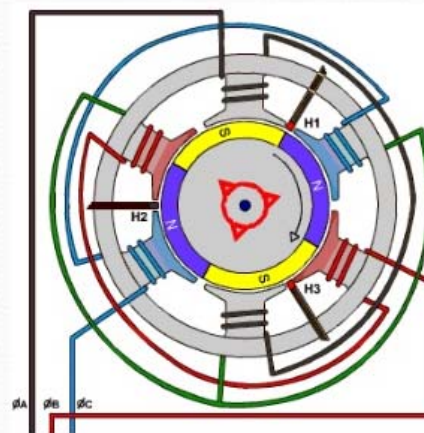
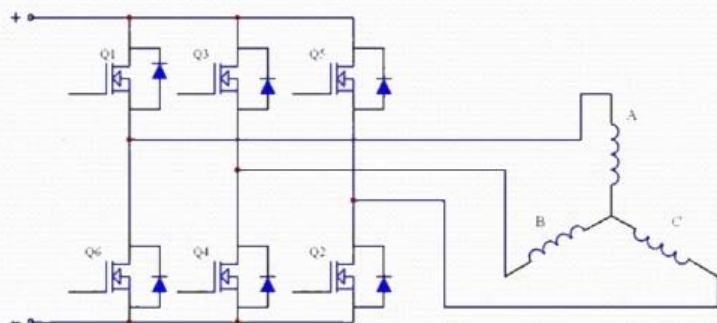
單極型驅動電路



雙極型驅動電路

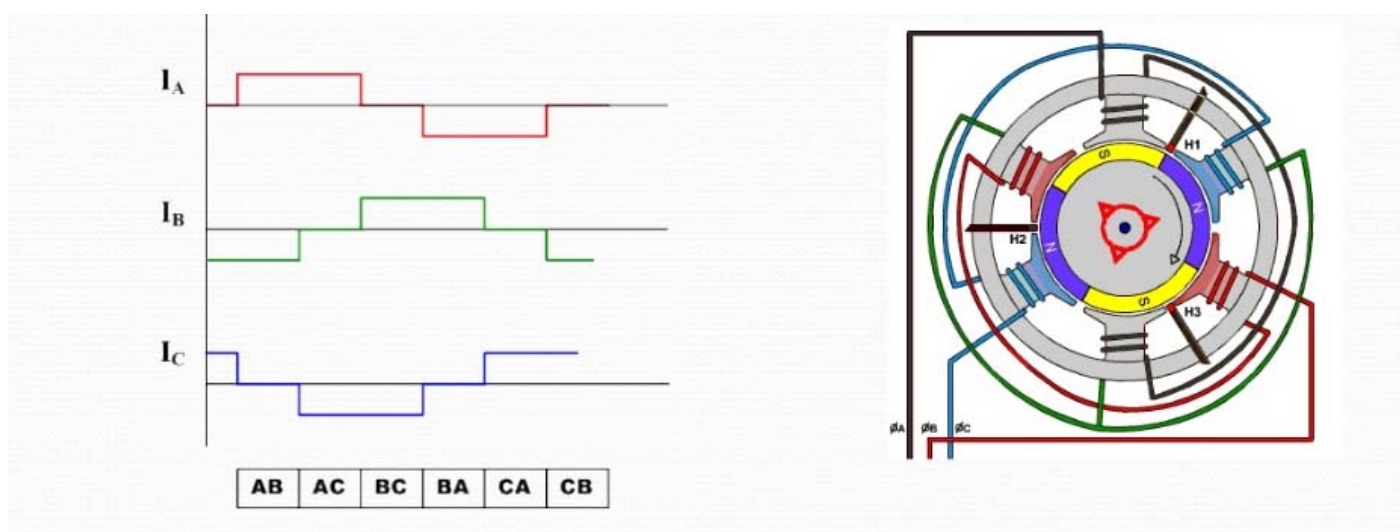
三相双极马达驅動方式：

- 双极型 BLDC 使用桥式电路与功率开关进行三相的电流换相，而换相的时机透过霍尔元件侦测马达永磁转子的角度得知。



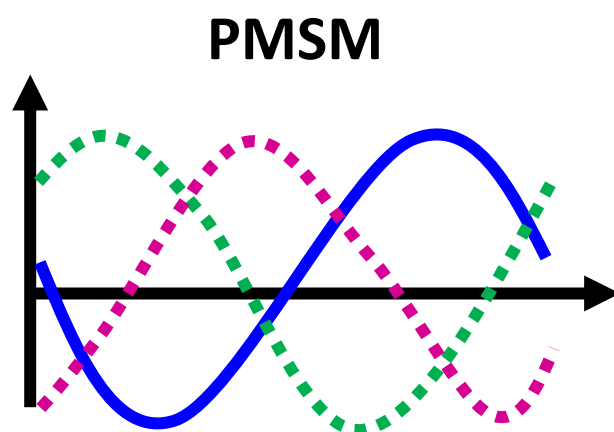
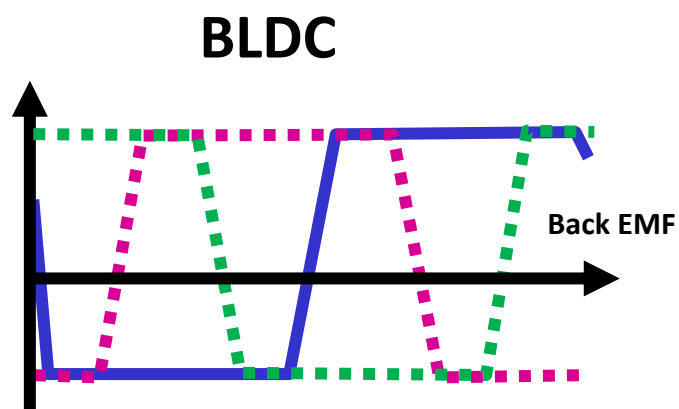


- 下图为 BLDC 普遍的电流驱动方式圈中当线图变为红色时表示电流经该线圈流入马达变为蓝色时表示电流经该线圈流出马达黑色则表示该线圈此时无电流流通。



PMSM(永磁同步马达):

- PMSM 与 BLDC 构造相似差异仅在于定子绕组不同，PMSM 的定子绕组方式使马达的反电动势(感应电动势)为弦波电压，BLDC 则为方波电压。
- PMSM 与 BLDC 同样为三相电流驱动各相弦波电流的相位差为 120°。





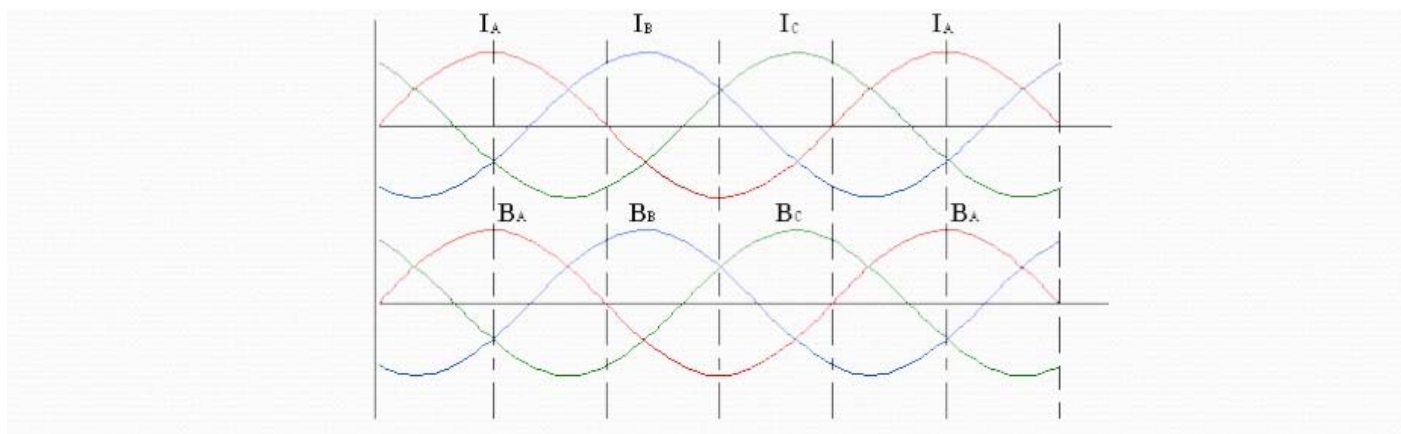
马达的感应电动势：

- 马达是一种利用电磁原理进行能量转换的装置马达除了消耗 电能产生转矩(机械能)外，也可以反过来转动马达转子产生电能， 感应电动势即是转子旋转时产生的感应电压，接着 就让我们试着旋转一颗马达，并接上示波器，看看会发生什么现象？



PMSM 的驱动：

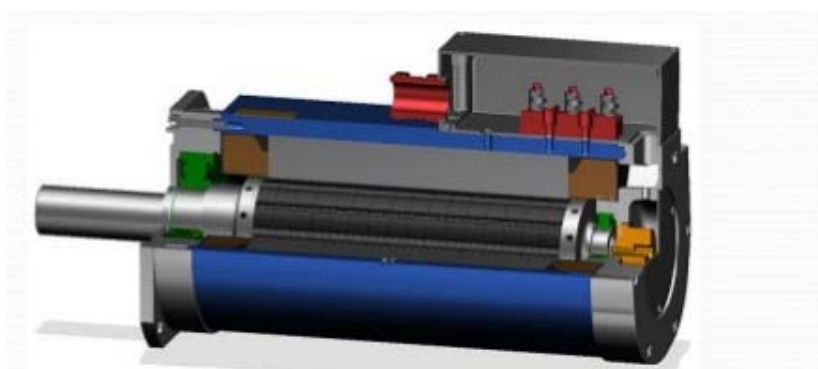
- PMSM 因为感应电动势为弦波并不适合单纯的电流正负换相驱动，需要利用脉冲宽度调变技术 (PWM)去产生弦波电流，因此控制上较 BLDC 复杂许多。





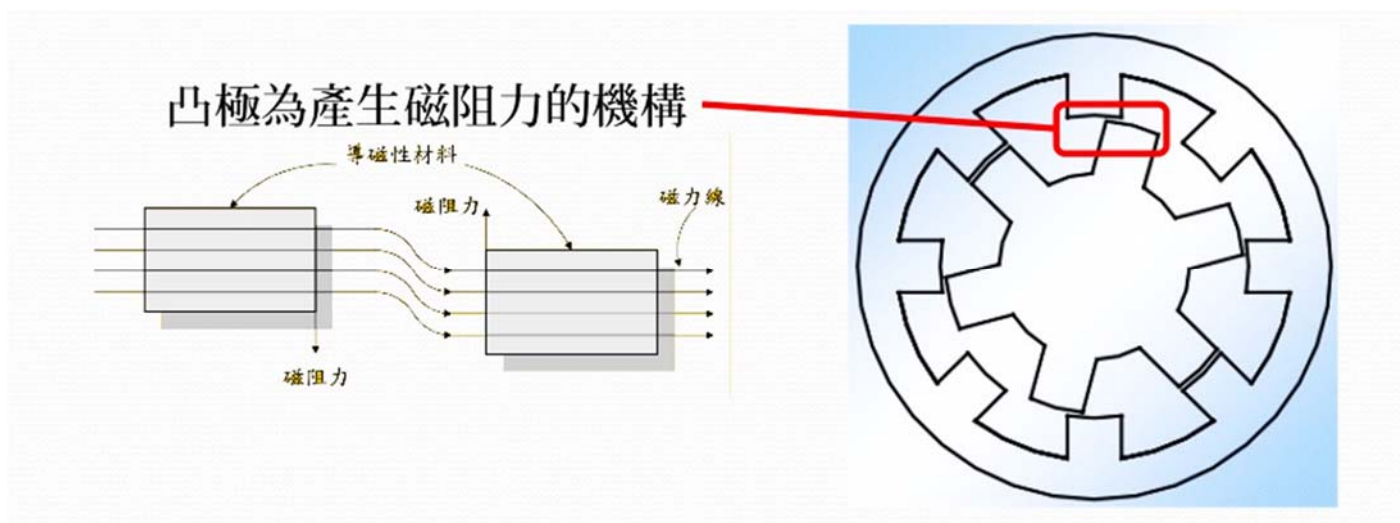
PMSM 与 BLDC :

- PMSM 与 BLDC 本质上是相同的马达实际应用上常因为性能上的需求设计各种介于弦波与方波间的反电动势马达，而驱动电流的控制，也常常不一定是标准的方波或弦波。随着微处理器与电子技术的进步 BLDC 为求降低转矩涟波与进行精密控制也越来越朝 PMSM 发展使得两者间的分界也越来越模糊。



切换式磁阻马达：

- 磁阻马达发展初期利用切换各相电流开关，依序对各相线圈激磁来驱动马达转子，后来便将此类马达归类为切换式磁阻马达。

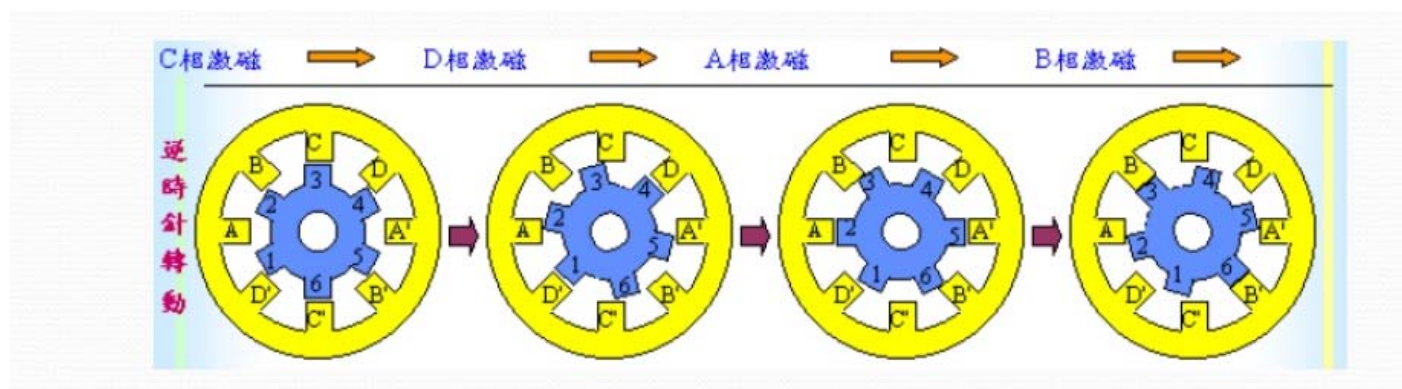




切换式磁阻马达的驱动：

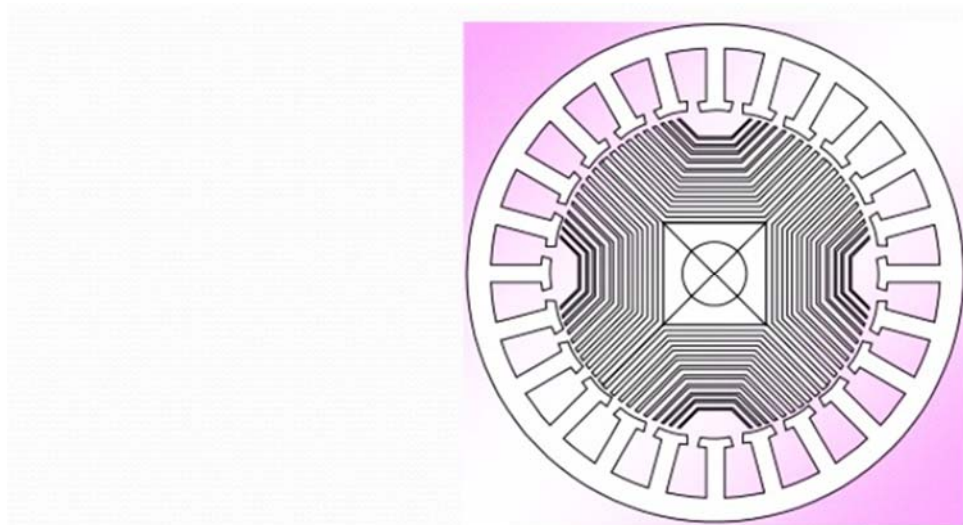
● 切换式磁阻马达的驱动主要有以下特征：

1. 定子磁场旋转方向与马达转子转向相反但两者的旋转速度相同。
2. 定子绕组线圈电流为直流电且通常为单相激磁。



同步式磁阻马达：

● 随着电子技术的发展开始出现了以PWM技术产生弦波电流驱动的磁阻马达这类型的马达称之为同步式磁阻马达。

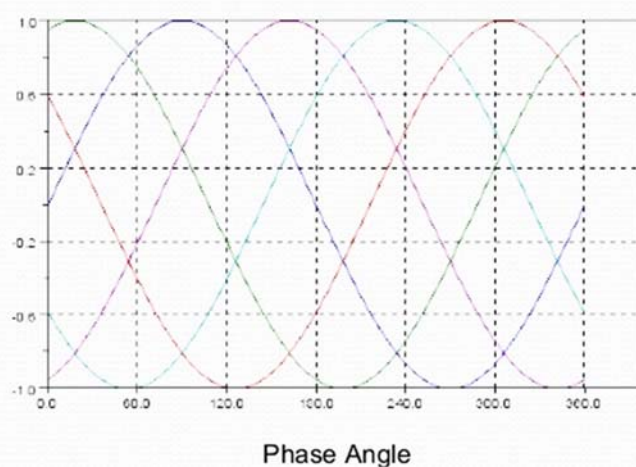




同步式磁阻马达：

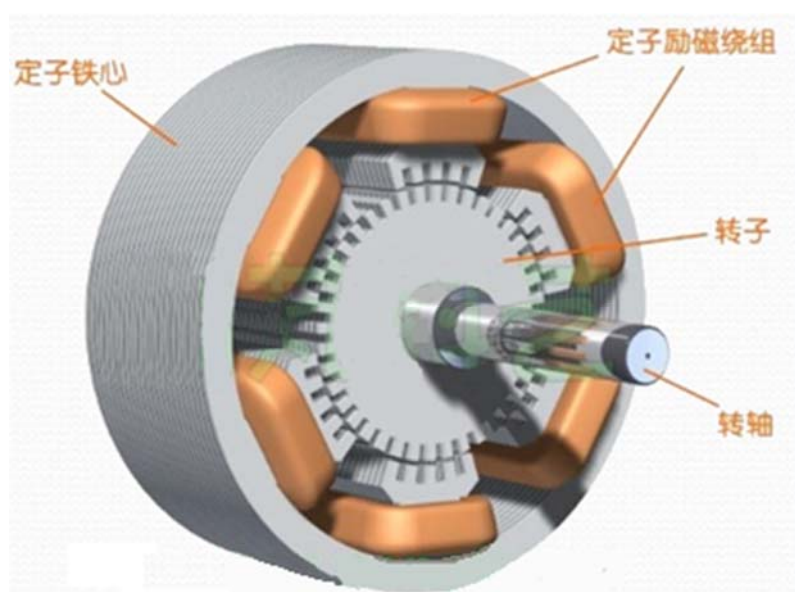
● 同步式磁阻马达的特征：

1. 定子绕组磁场旋转方向与转子 旋转方向相同且同步。
2. 必须同时以多相 的弦波电流激磁驱动在 驱动上较切换式复杂但转矩输出 较稳定且电能效率较高。



步进马达：

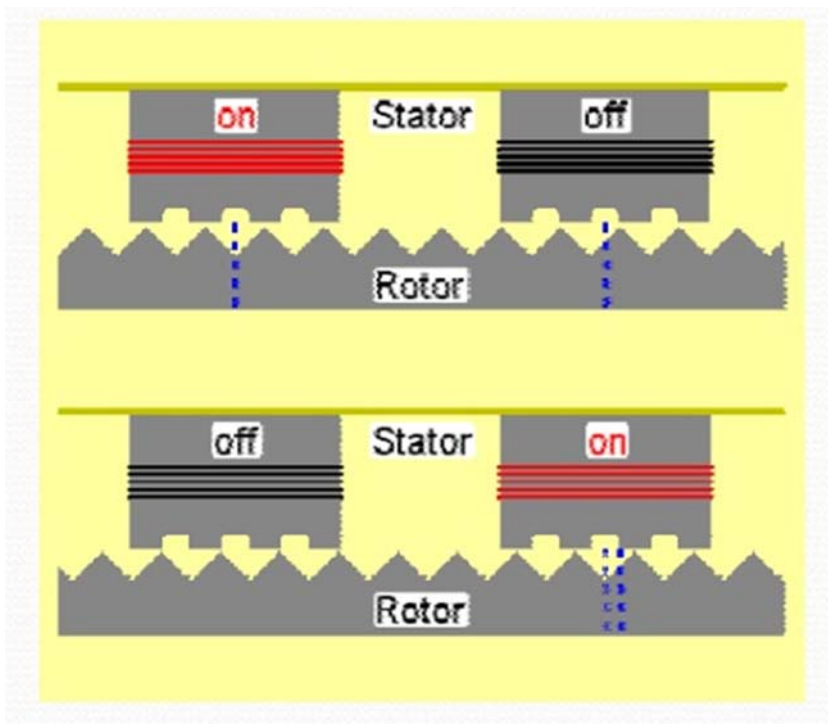
- 步进马达的特征是采用脉波 讯号进行开回路（Open Loop）控制，无需进行转子角度的侦测与反馈，只要符合上述特征的 马达皆可称为步进马达。但随着步进马达的发展，现在几乎都是以磁阻马达为主流。





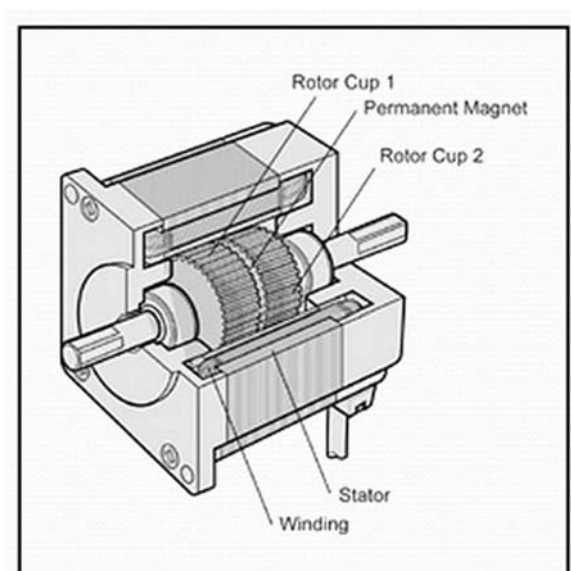
VR 型步进马达(可变磁阻)：

- 随着步进马达的发展，现在几乎都是以磁阻马达为主流，应用最小磁阻原理运转的磁阻马达可透过如齿轮状突起的小齿结构达到高解析度的定位。



HB 型步进马达(混合型)步进马达：

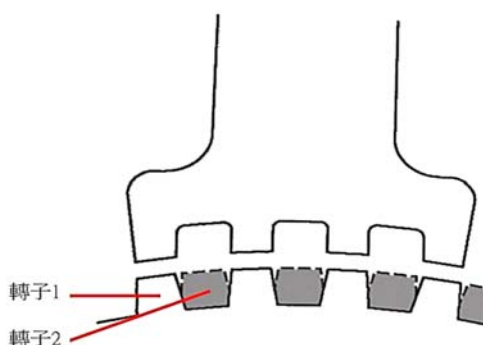
- 一般磁阻马达内部并不具备永久磁错，因为使用导磁材料 即可产生磁阻力然而为了进一步提升步进马达的解析度，会在转子中间加装一永久磁铁，如右图所示中间的永久磁铁会分别把转子 1 与转子 2 磁化成不同的磁极。





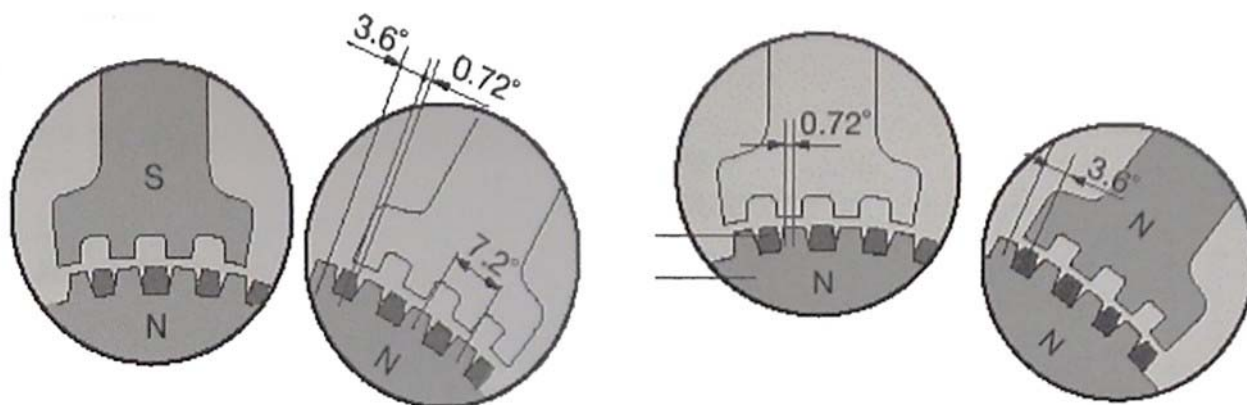
HB 型步进马达 (混合型):

- 转子 1 与转子 2 除了**磁极相反**之外,与定子小齿的对应方式也相反,如图所示当定子与转子 1 为极凸极时,定子与转子 2 则为凸极对凹槽,使得 HB 型步进马达可提供较 VR 型双倍的解析度。



HB 型步进马达的定位:

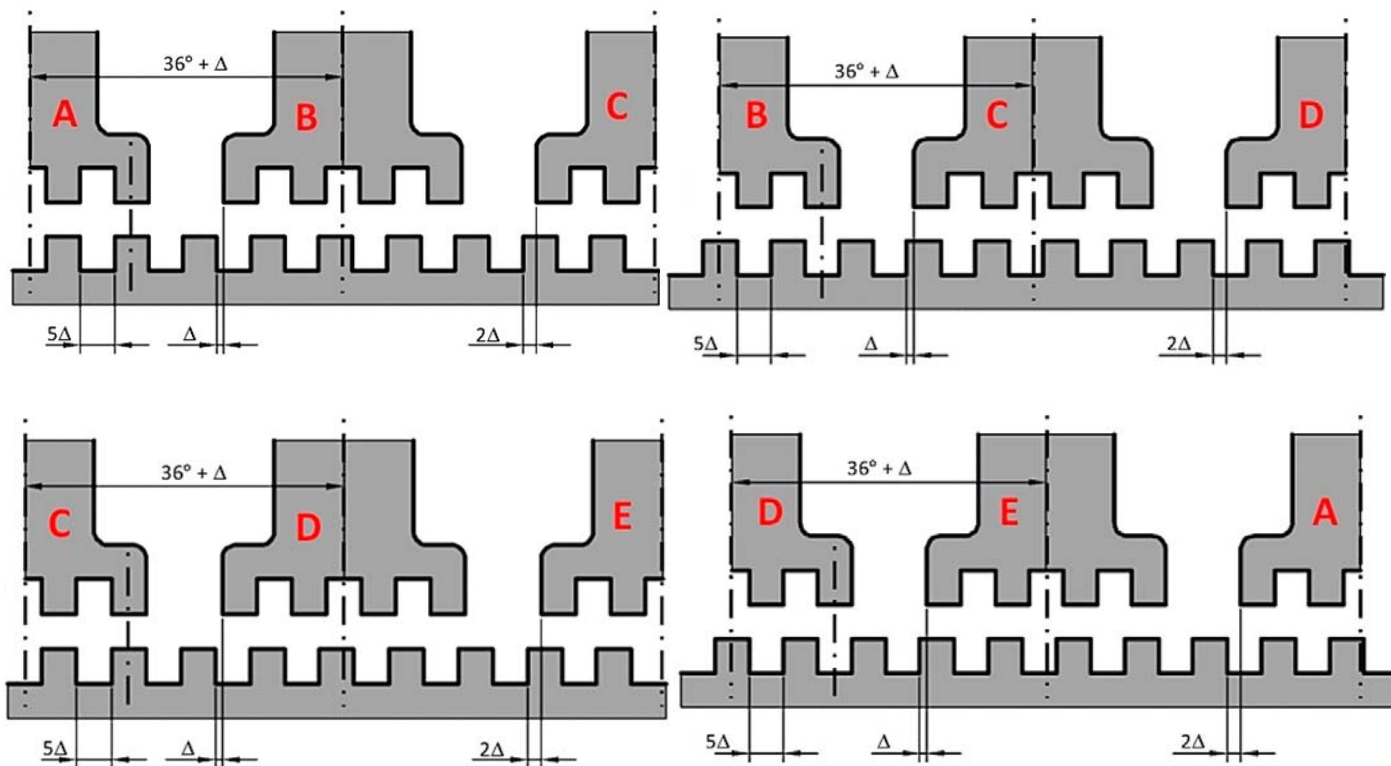
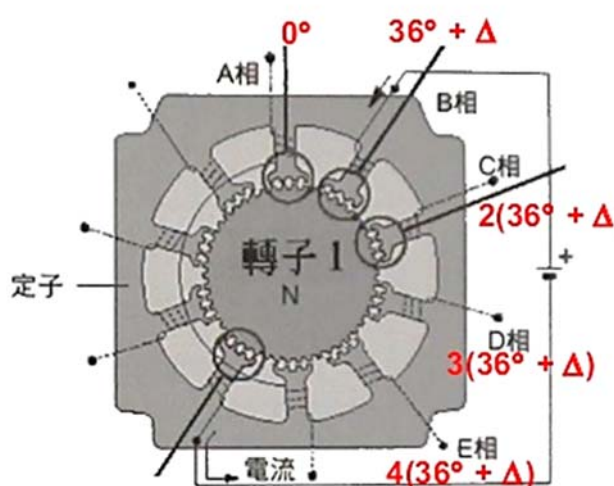
- 转子 1 与转子 2 各磁化为 N 极与 S 极,下图中 A 相定子先激磁为 **S 极**, 转子 1 凸极与 A 相定子凸极相吸,接着换 B 相定子激为 **N 极**,转子 2 凸极与 B 相定子凸极相吸,而转子只位移了十分之一的径节(diametral pitch)无偏差





HB 型步进马达的定位：

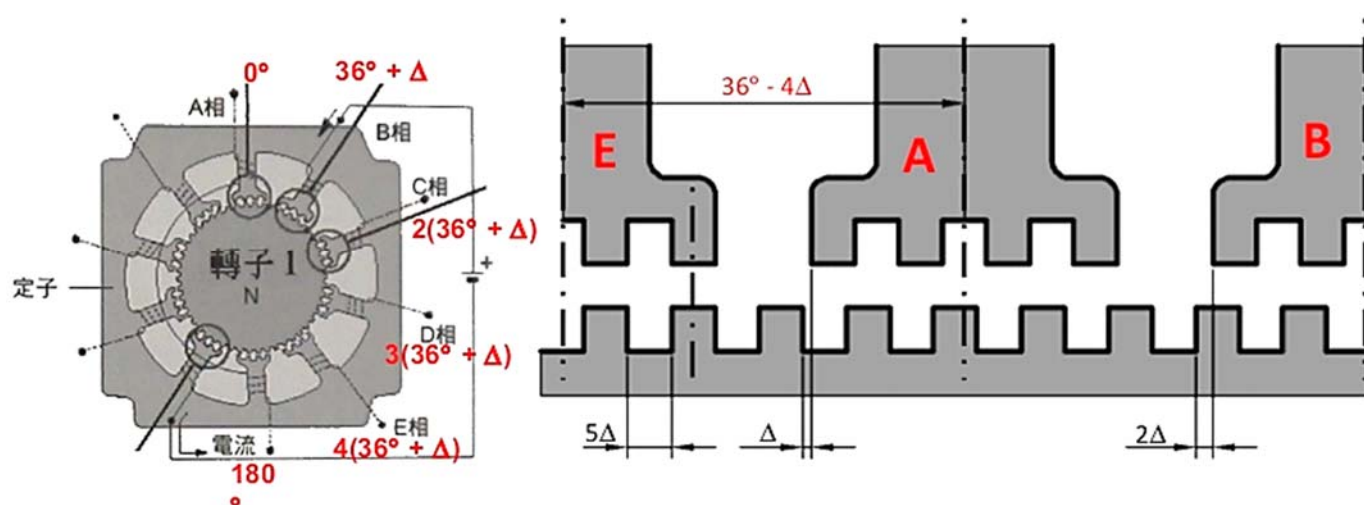
- 5 相的 HB 型步进马达为例, 从 A 相开始依序激励后, 再回到 A 相激励时, 转子共旋转了 1 个齿宽的距离 5Δ , 而 $=0.72^\circ$





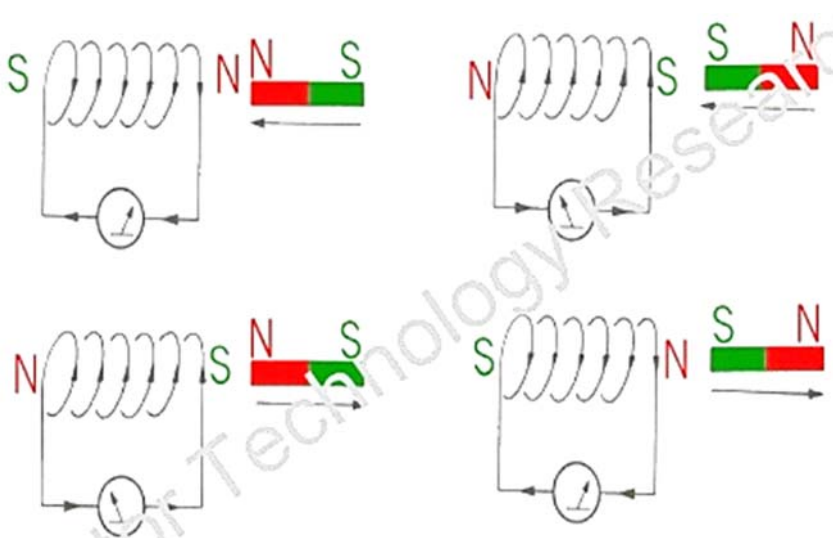
HB 型步进马的定位：

- 每一相定子绕组皆相隔 $36^\circ + \Delta$, 除了 E 相与 A 相的定子绕组, 由下图可知, 同一相定子绕组之两极共轴, 角度相差为 180° , 所以 E 相与 A 相间的距整须调整为 $\cdot 180^\circ - 4(36^\circ + \Delta) = 36^\circ - 4\Delta$



感应马达：

- 感应马达是应用**电磁感应**促使转子旋转的马达, 当导电材料之磁通量产生变化时, 依照**楞次定律**导电材料内部会产生电流(**感应涡流**), 并生成磁场**抵抗磁场变化**, 如下图所示相对应之磁斥力与磁吸力也因而产生, 如果导电线圈为可移动, 则线圈即会随着磁铁(磁场)移动。





感应马达的结构：

- 下图为**三相感应马达**的构造图,马达的定子部分与其余马达一样由**电流线圈**组成,转子的部分则较为特别称为**鼠笼结构**,为大部分感应马达所使用的导电材料转子结构。

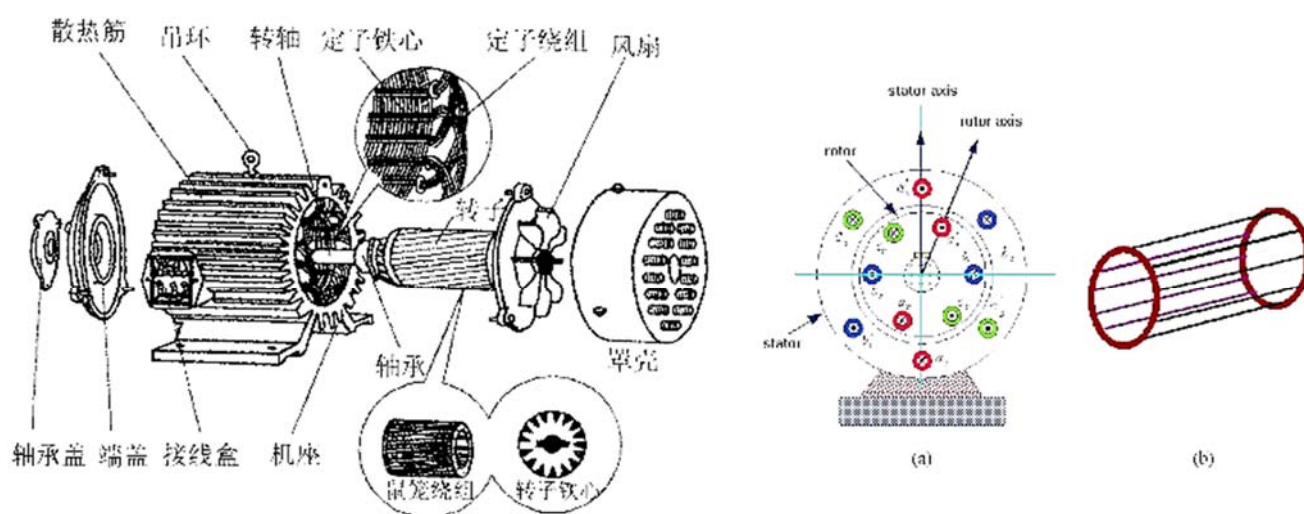


图 1 (a) 三相鼠笼式电动机的结构示意图

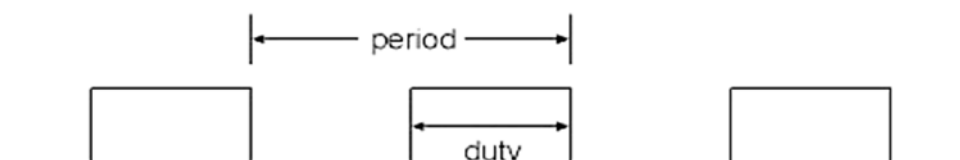
感应马达的特性:

- 与 **PMSM** 相同, 应用 **PWM** 技术产生**三相弦波电流**即可驱动感应马达旋转。
- 感应马达又称**异步马达**, 由运转原理可知磁场旋转速度与马达导体转子转速会存在一**转速差**, 且转速差异越大导体内的感应电流也越大, 虽与永磁无刷马达以及磁阻马达等马达同为旋转磁场驱动转子, 但并不相似于同步马达磁场旋转速度需与马达转子配合。

脉冲宽度调节技术(电源管理)

PWM 控制：

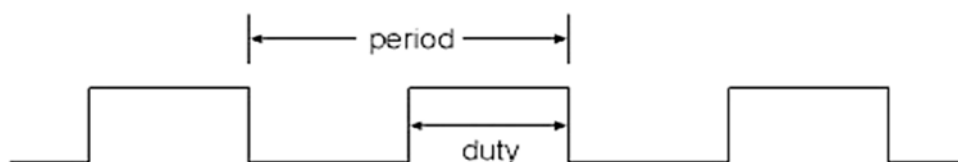
- **脉冲宽度调变(PWM)**技术常被应用马达的控制上, 以 BLDC 为例, 线圈通电时 **MOSFET** 依照 **PWM** 讯号开关,而非完全导通, 如此便可在不改变对驱动电路供电电压的情形下,对马达进行**转速**或**扭力**控制。





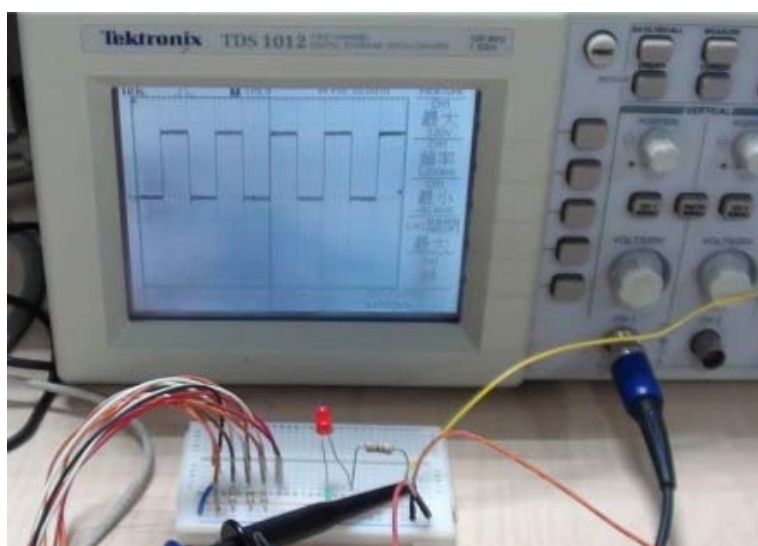
Duty of PWM Control :

- Duty 为 PWM 方波的一个周期内导通的百分比, 假设供给驱动电路的电压为 V 且 Duty 为 50%, 则此时马达的相电流平均电压为 $V \times 0.5$
- 马达线圈内阻为固定值, 改变平均电压即等同改变线圈电流大小, 进而对马达进行控制。



PWM 变压实例：

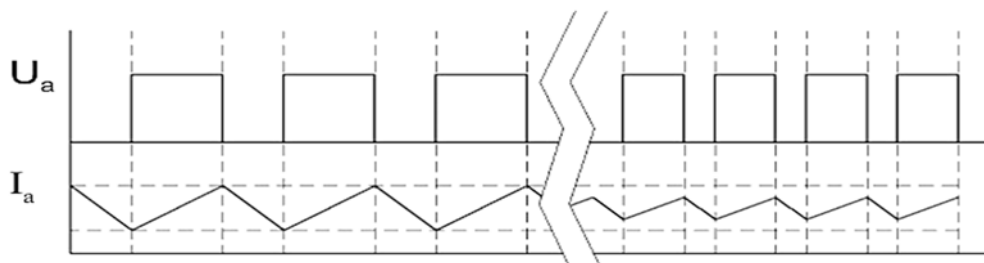
- 具有 PWM 功能的电子晶片可经由指定脚位输出 PWM 讯号, 将晶片输出的 PWM 讯号接 LED 灯泡的正极, 再将 LED 负极与晶片共地, 就可藉由改变 PWM 的 Duty 来控制 LED 的亮度。



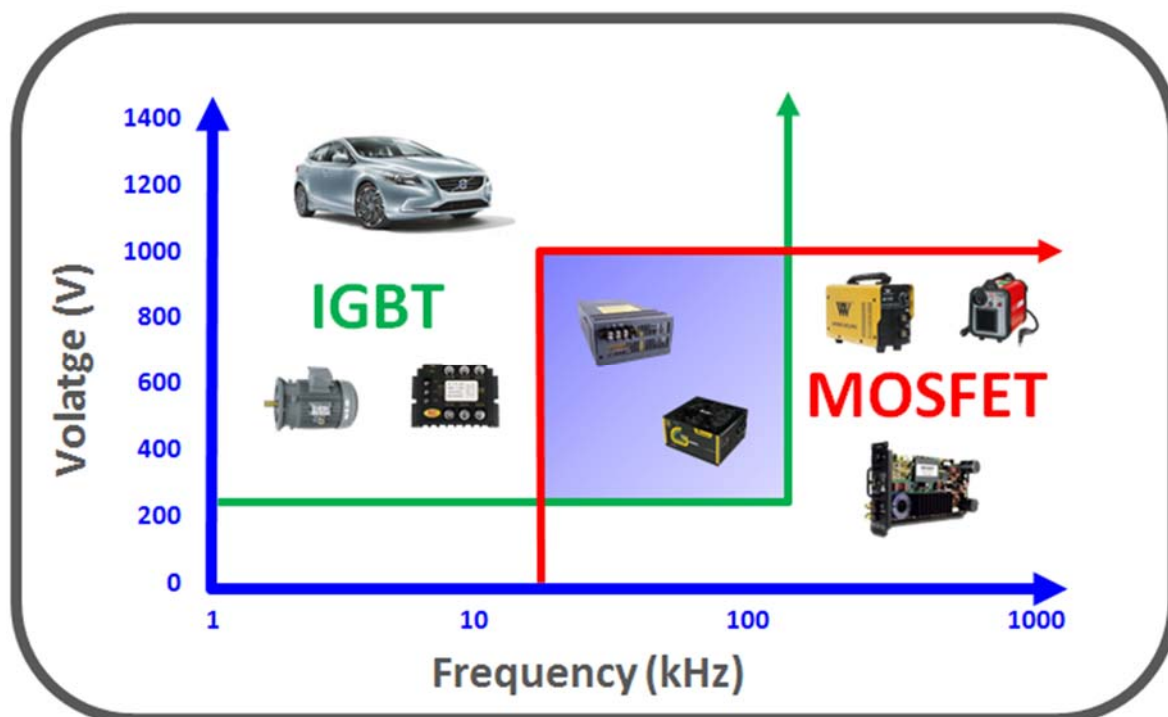


Frequency of PWM Control :

- 频率为 PWM 周期的倒数, 由下图可知, 当 Duty 相同时**频率越低则电流的变化幅度越大**, 则马达的转矩输出也越不稳定, 提高 PWM 的频率可获得较稳定之相电流及转矩输出。
- 虽然 PWM 频率越高马达的电流及转矩也越稳定, 但是受限于**实际的物理条件**, 当开关切换频率太高时, 可能会发生**电流不足**以及电子元件**过热**的情形, 因此 PWM 的频率应在马达的**控制与驱动需求**, 以及**电子元件的规格**间取得合适的平衡点。



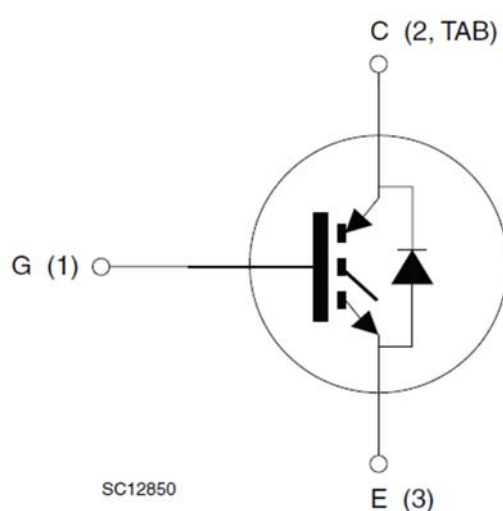
MOSFET & IGBT 简介





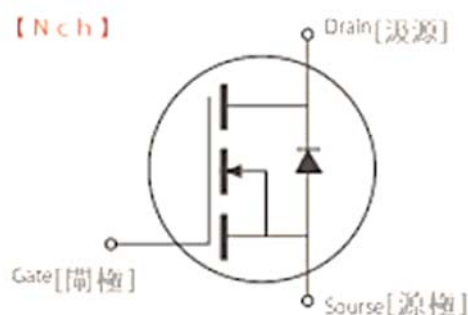
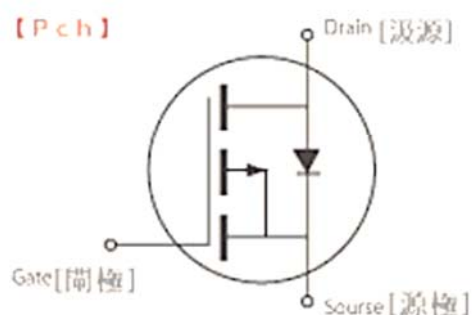
IGBT :

- **绝缘栅双极电晶体** (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)，是传统的 BJT 导通电阻小，但是驱动电流大，而 MOSFET 的导通电阻大，却有着驱动电流小的优点。IGBT 正是结合了这两者的优点：不仅驱动电流小，导通电阻也很低。



MOSFET :

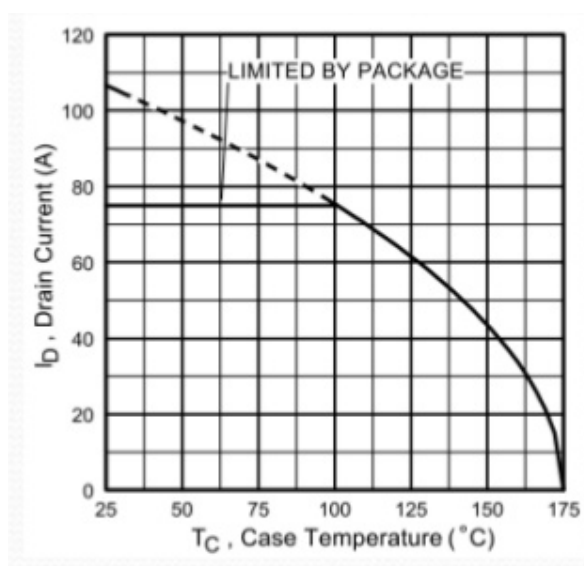
- MOSFET 为**金属氧化物半导体场效电晶体** (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)的缩写，MOSFET 的**汲极**与**源极**之间存在半导体电流通道, 通道开关与否由**栅极**控制。
- MOSFT 依照通道类型为 **N-type** 与 **P-type**, 在数位电路的应用上, 两者的特性刚好相反。





MOSFET 使用上的注意事项：

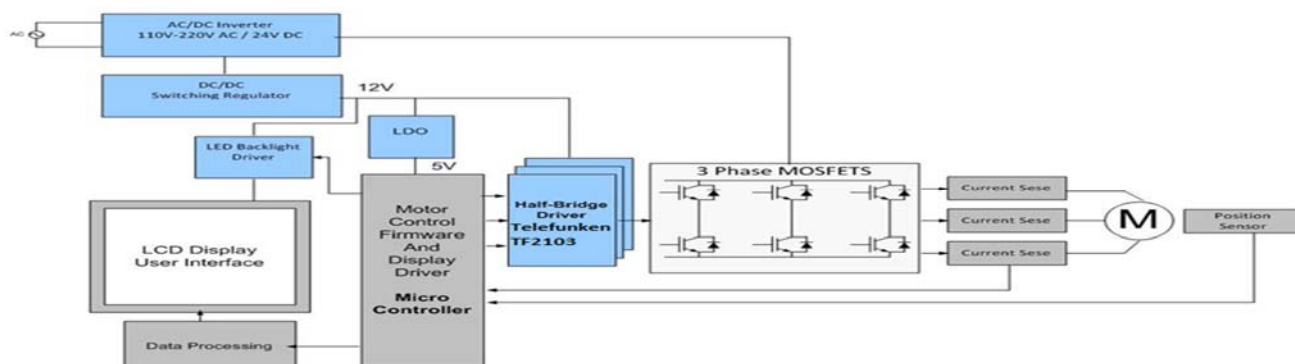
- 大部分 MOSFET 的型号与规格皆可至制造商的网站上查询及下载 [Datasheet](#), MOSFET 的选择初期可考虑驱动电路 **电源电压** 与 **马达运转所需电流大小** 来选择型与规格, 最常造成 MOSFET 损坏的情形有两个:
 - 瞬间电压 **变化率** 过大。
 - 散热不及导致 **温度上升**, 造成 **容许电流下降**, 下图即为汲极电流容许量与内部温度之曲线图。



BLDC 驱动电路

BLDC 驱动电路：

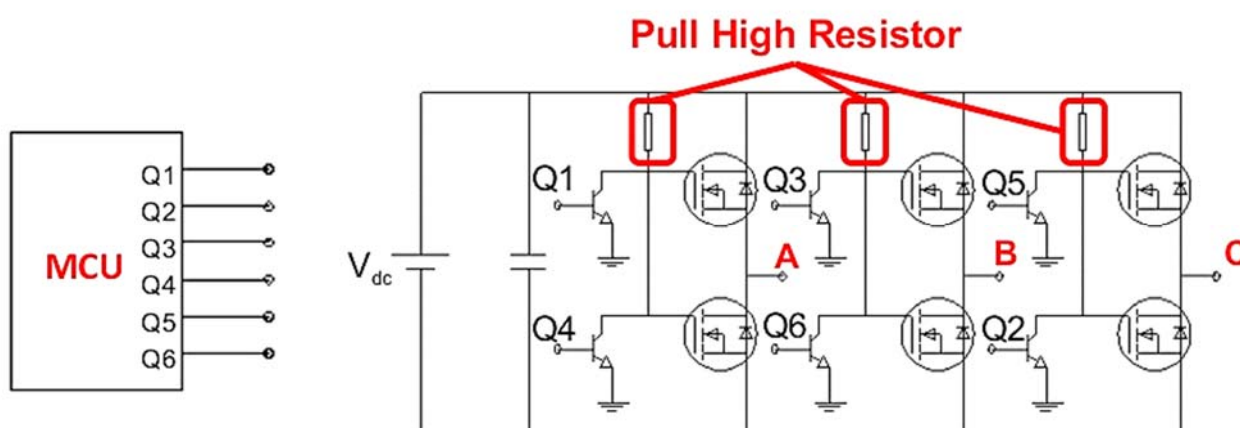
- 一块 BLDC 驱动板大致上由 **MCU** 与 **三相桥式电路** 组成, 一般 MCU 之运作电压通常为 **5V**, 而其 I/O 之输出电压甚至可能只有 **3.3V**, 而 BLDC 驱路电路的运作电压通常都远高于 5V, 如此一来 MCU 的 I/O 则无法直接控制 MOSFET。





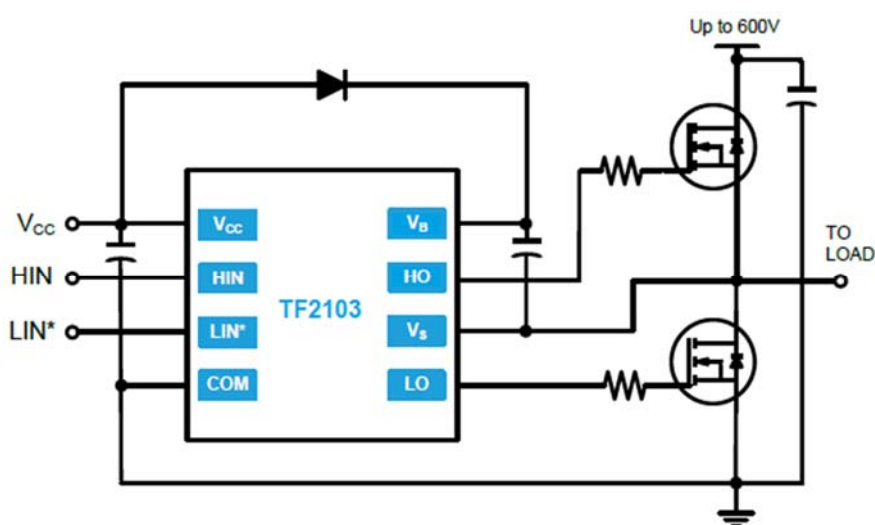
Pull High Gate :

- 为了**升高闸极电压**, 最简单的做法就是透过一个 **Pull High 电阻** 利用 V 提高 MUC I/O 输出 Q1~Q6 的电压, 而 Pull High 电阻的阻值则应参考 MOSFET 的闸极所能承受的电流大小。



MOSFET Driver :

- 进阶一点的作法是使用 **MOSFET driver** 电晶体, 下图即为 MOSFET Driver 的应用电路, HO 的输出电压为 V , 与 V_s 的压差, LO 的输出电压则为 V 与 COM 的压差。
- V 与 V_s 之间的电容为**自举电容**, V 与 V_s 间的电压为浮动电压受自举电容影响, 而自举电容之容值可参考该颗 MOSFET Driver 的 Application Note 。





BLDC 驱动原理

BLDC 换相逻辑：

- 双极型 BLDC 采 60° 换相, 目前主要的换辑有 120° 度导通与 180° 度导通, 使用 120° 度导通换相逻辑时, 每一个电晶体开关的持续导通时间为 120° 度机械角, 180° 度导通则持续 180° 度机械角。

【 120° 度】

120	$0^\circ \sim 60^\circ$	$\sim 120^\circ$	$\sim 180^\circ$	$\sim 240^\circ$	$\sim 300^\circ$	$\sim 360^\circ$
Q1	1	1	0	0	0	0
Q2	0	1	1	0	0	0
Q3	0	0	1	1	0	0
Q4	0	0	0	1	1	0
Q5	0	0	0	0	1	1
Q6	1	0	0	0	0	1

【 180° 度】

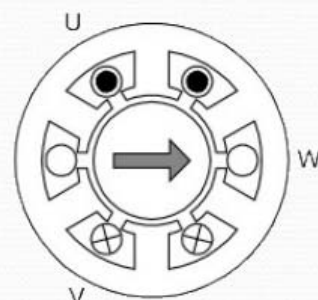
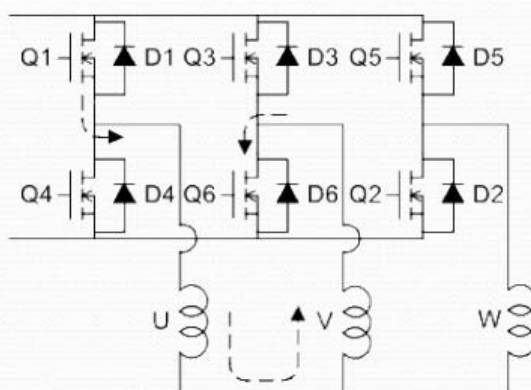
180	$0^\circ \sim 60^\circ$	$\sim 120^\circ$	$\sim 180^\circ$	$\sim 240^\circ$	$\sim 300^\circ$	$\sim 360^\circ$
Q1	1	1	1	0	0	0
Q2	0	1	1	1	0	0
Q3	0	0	1	1	1	0
Q4	0	0	0	1	1	1
Q5	1	0	0	0	1	1
Q6	1	1	0	0	0	1



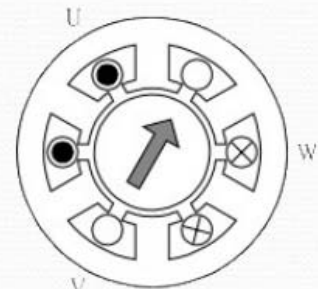
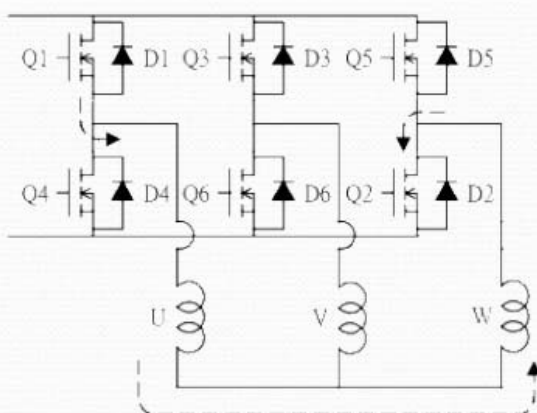
120 度导通换相逻辑：

- 120 度导通换相每一相中, 只导通 2 个电晶体, U、V、W 三相电流中, 只有 2 相有电流流通, 该换相逻辑为最常使用之换相逻辑。

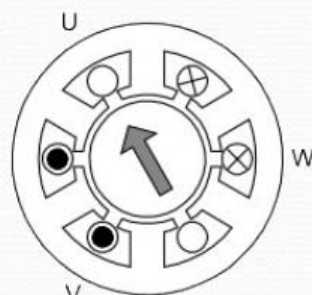
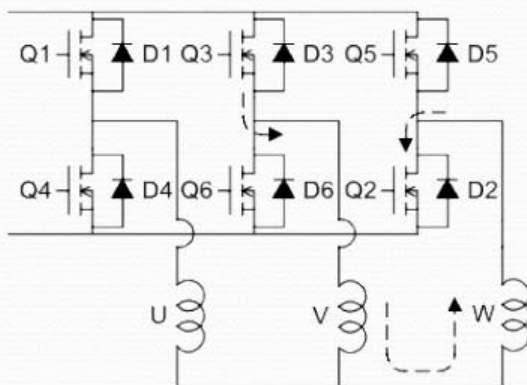
	0°~60°
Q1	1
Q2	0
Q3	0
Q4	0
Q5	0
Q6	1



	60°~120°
Q1	1
Q2	1
Q3	0
Q4	0
Q5	0
Q6	0

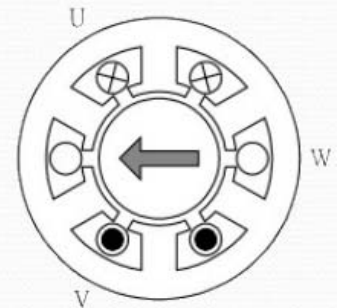
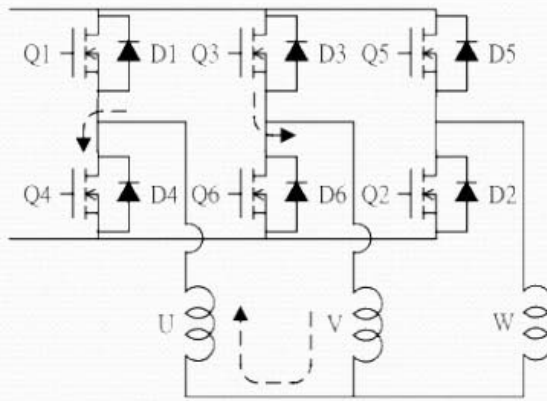


	120°~180°
Q1	0
Q2	1
Q3	1
Q4	0
Q5	0
Q6	0

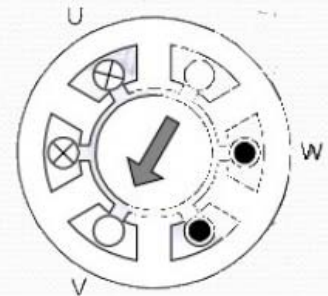
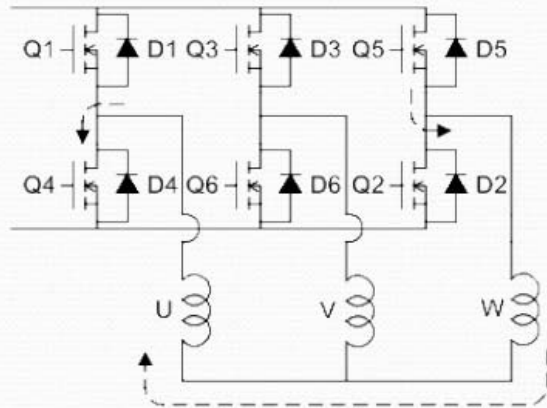




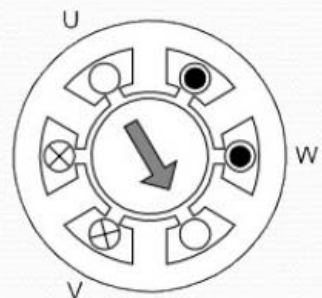
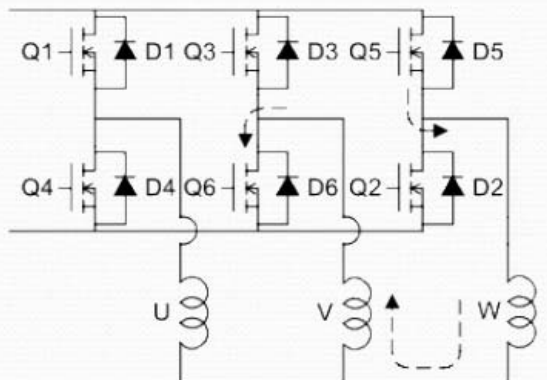
180°~240°	
Q1	0
Q2	0
Q3	1
Q4	1
Q5	0
Q6	0



240°~300°	
Q1	0
Q2	0
Q3	0
Q4	1
Q5	1
Q6	0



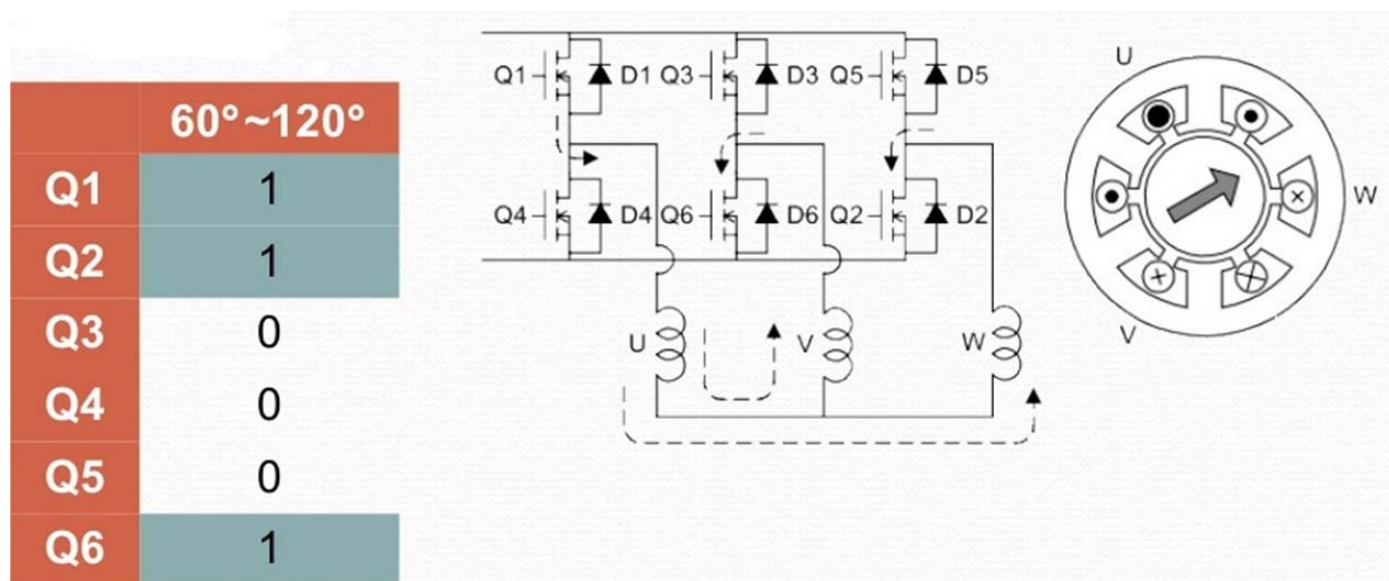
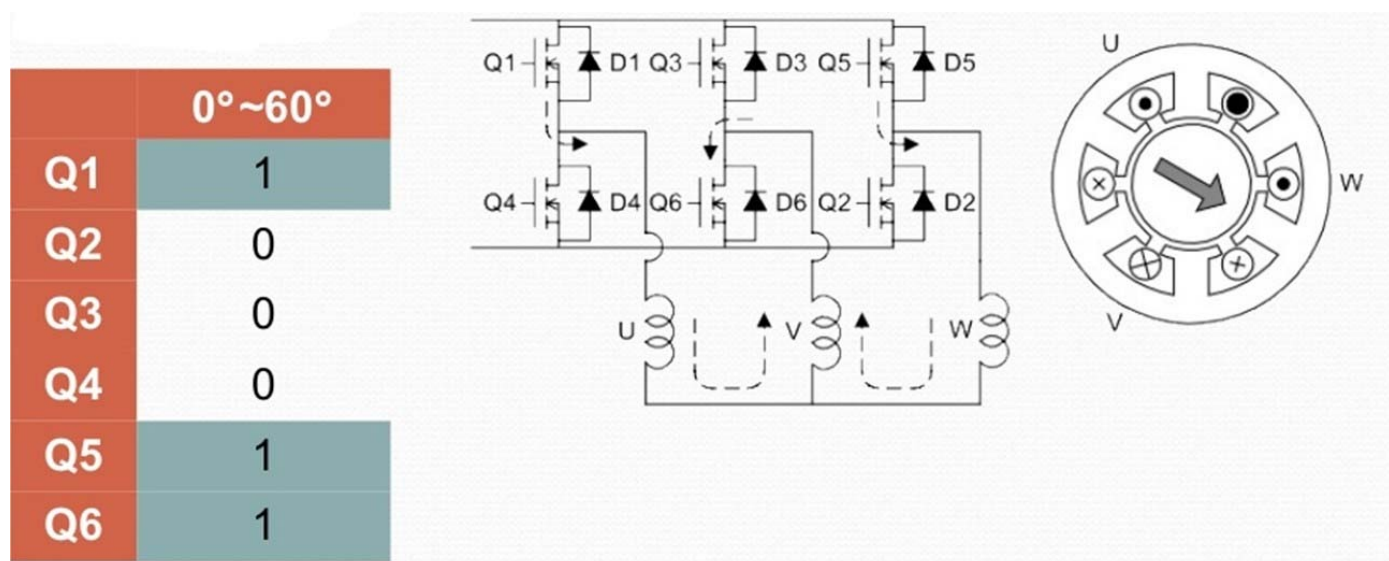
300°~360°	
Q1	0
Q2	0
Q3	0
Q4	0
Q5	1
Q6	1





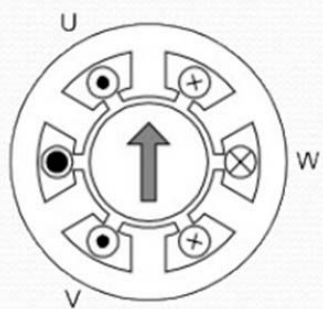
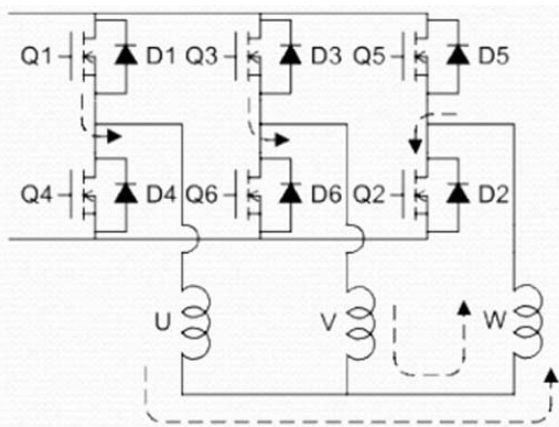
180 度导通换相逻辑：

- 180 度导通换相每一相中, 共有 3 个电晶体导通,U、V、W 三相电流中, 同时均有电流流通, 在相同电压下,电流及扭力较 120 度导通高, 但马达的电流对力之转换效率较差。

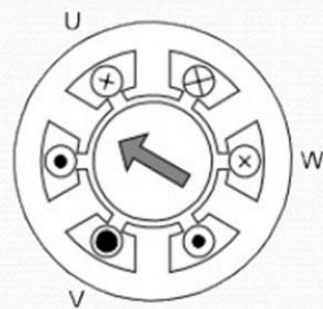
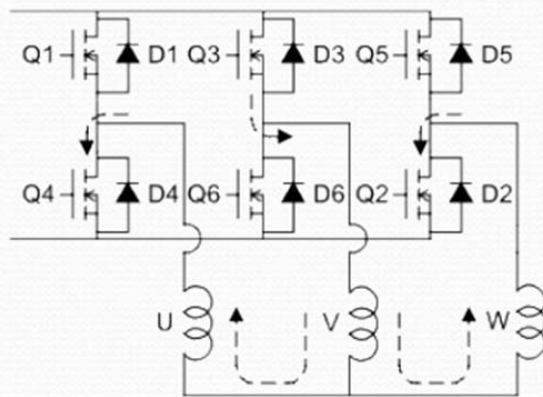




	120°~180°
Q1	1
Q2	1
Q3	1
Q4	0
Q5	0
Q6	0

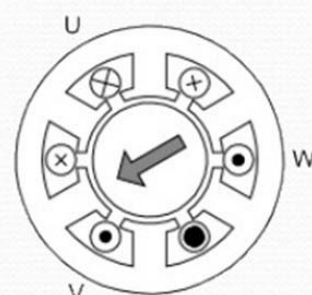
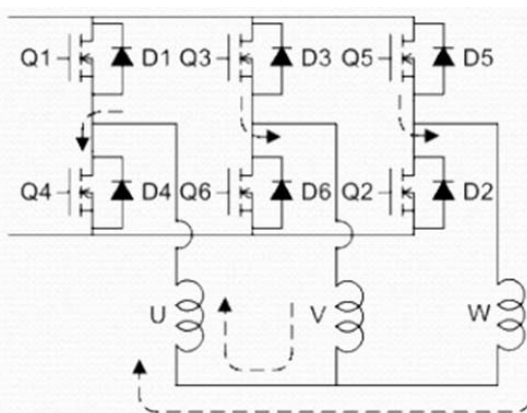


	180°~240°
Q1	0
Q2	1
Q3	1
Q4	1
Q5	0
Q6	0

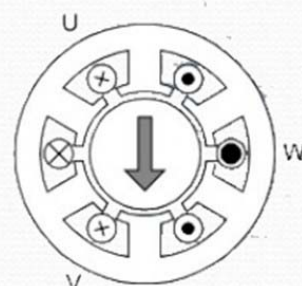
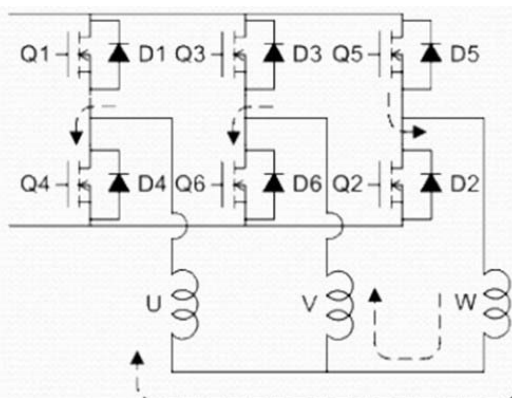




240°~300°	
Q1	0
Q2	0
Q3	1
Q4	1
Q5	1
Q6	0



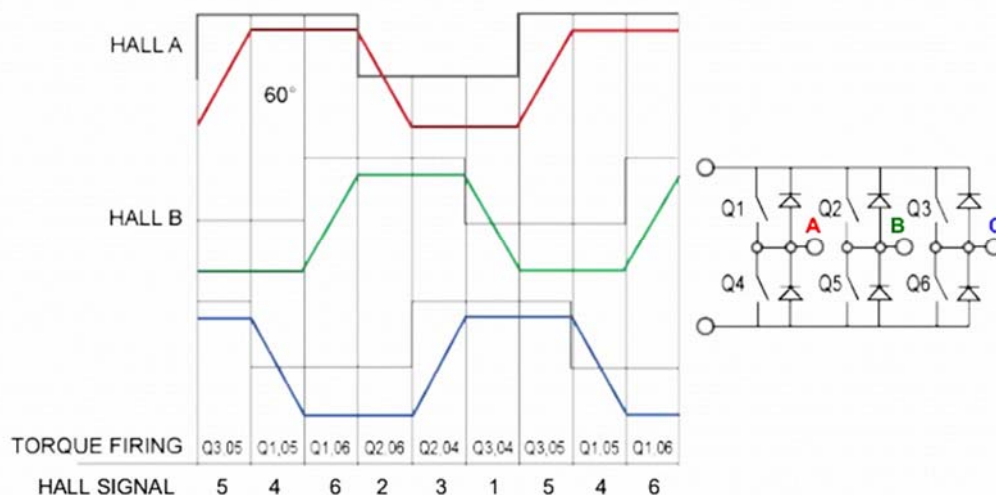
300°~360°	
Q1	0
Q2	0
Q3	0
Q4	1
Q5	1
Q6	1





霍尔讯号：

- 市面上大部分 BLDC 的霍尔元件位置与其对应的换相逻辑都是相同的, 下图即为一般常见的 120° 换相逻辑与霍尔讯号之间的关系图。



BLDC 驱动实例：

