

# **MM32 SPIN MCU 无感方波 BLDC 电机驱动原理篇**

## **Application Notes**

**AN6301**

**无感方波 BLDC 电机驱动原理**

---

**版本:1.0**

## 目录

1. 前言.....	3
2. 无感方波 BLDC 电机驱动技术原理.....	3
1.1 BLDC 电机.....	3
1.2 BLDC 电机数学模型.....	4
1.3 电机驱动原理.....	5
1.4 转子位置检测.....	6
1.4.1 转子位置获取方式.....	6
1.4.2 无位置传感器方式.....	7
1.4.3 无刷电机端电压检测.....	7
1.4.4 ADC 采样检测过零点.....	9
1.4.5 比较器检测过零点.....	10
3. 缩略语和符号.....	10
修改记录.....	11

## 1. 前言

无刷直流电机（BLDC）因为具有结构简单、功率密度大、效率高等特点，被广泛的应用在机器人、仪器仪表、无人机、电动工具等热门领域。方波控制有着控制算法简单、调速性能好、价格便宜等优点。

## 2. 无感方波 BLDC 电机驱动技术原理

### 1.1 BLDC 电机

BLDCM 全称是 Brushless Direct Current Motor, 即无刷直流电机, 属于永磁式同步电机的一种, 其转子表面贴装有永磁体, 定子上有三相绕组。永磁体生成转子磁通, 而通电的定子绕组产生磁极。转子（与一个条状磁体等效）被通电定子相位吸引。通过使用适当的序列来为定子相位供电, 在定子上创建并保持了一个旋转磁场。转子的固有磁极跟随定子的旋转磁场有序旋转, 以达到 BLDCM 正常运行的目的。

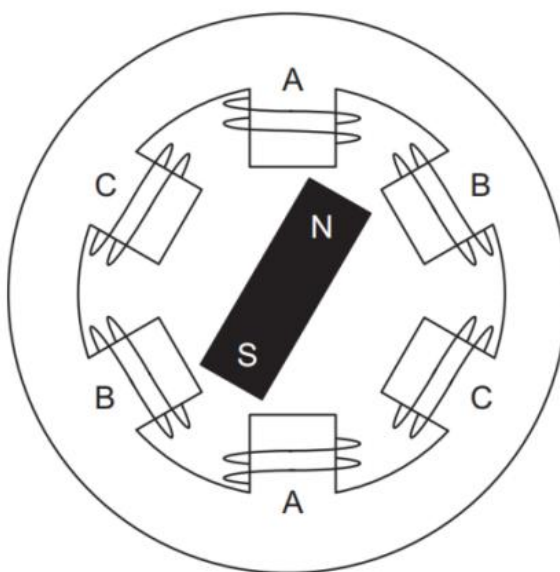


图 1. 一对极三相 BLDC 电机

BLDC 电机的一个显著特征就是反电势特征为梯形波, 如图 2 所示。这就使得 BLDC 电机更适合于六步换相的控制方式, 以此获得更大的输出扭矩。

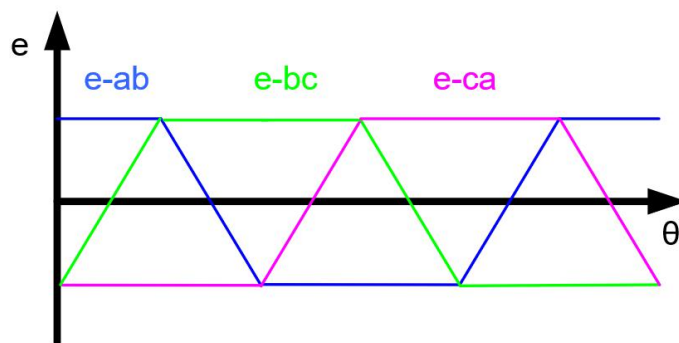


图 2. 三相 BLDC 电机反电势

## 1.2 BLDC 电机数学模型

无刷直流电机的三相定子电压方程用矩阵表示如下：

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

其中  $L_{aa}$ ,  $L_{bb}$ ,  $L_{cc}$  是相绕组的自感,  $L_{ab}$ ,  $L_{ba}$ ,  $L_{bc}$ ,  $L_{cb}$ ,  $L_{ca}$ ,  $L_{ac}$  是对应相绕组之间的互感,  $e_a$ ,  $e_b$ ,  $e_c$  为三相定子反电动势。

在理想情况下, 三相绕组之间的互感也为常数, 与转子位置无关。即：

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_s \quad (1-2)$$

$$L_{ab} = L_{ba} = L_{bc} = L_{cb} = L_{ac} = L_{ca} = L_M \quad (1-3)$$

由无中性点引出的三相星型联结结构可得：

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (1-4)$$

将以上条件代入三相定子电压方程 1-1 化简可得：

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \quad (1-5)$$

其中  $L = L_s - L_M$ 。

电磁转矩方程为, 其中  $\omega_m$  为电机机械角速度 (rad/s) :

$$T_e = \frac{e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C}{\omega_m} \quad (1-6)$$

梯形波反电势的平顶部分为  $120^\circ$  电角度，因此无刷直流电机的控制应该采用两两导通的控制方法，即六步换相控制方案。

考虑在任意时刻只有两相绕组导通，电磁转矩方程可以转换为式 1-7，其中  $E_m$  为导通相反电势的幅值、 $I_m$  为导通相电流的幅值：

$$T_e = \frac{2E_m I_m}{\omega_m} \quad (1-7)$$

根据法拉第电磁感应定律，无刷直流电机反电势幅值为式 1-8，其中  $K_e$  为反电势系数， $N$  为相绕组等效匝数， $\phi_m$  为转子永磁体主磁通， $n_{pe}$  为电机极对数， $n = \omega_m / 2\pi$  为电机转速：

$$E_m = K_e \cdot \phi_m \cdot n \quad (1-8)$$

将式 1-8 代入电磁转矩方程式 1-7 中可得：

$$T_e = K_e \cdot \phi_m \cdot I_m / \pi \quad (1-9)$$

由式 1-9 可以看出，无刷直流电机的电磁转矩与转子永磁体磁通和导通相电流幅值大小成正比，因此控制两两导通相的电流幅值就可以控制无刷直流电机的转矩。

### 1.3 电机驱动原理

无刷直流电机属于永磁式同步电机的一种，其转子表面贴装有永磁体，定子上有三相绕组。永磁体生成转子磁通，而通电的定子绕组产生磁极。转子（与一个条状磁体等效）被通电定子相位吸引。通过使用适当的序列来为定子相位供电，在定子上创建并保持了一个旋转磁场。转子的固有磁极跟随定子的旋转磁场有序旋转，以达到 BLDCM 正常运行的目的。

无感 BLDC 电机（三相）方波驱动的核心器件是由 6 个 MOS 管组成的逆变电路，在结构为“上 N 下 N”或“上 P 下 N”，它将直流电转变成交流电，并改变交流电的振幅和频率，以控制电机的运转。三相逆变电路原理如图 3 所示。

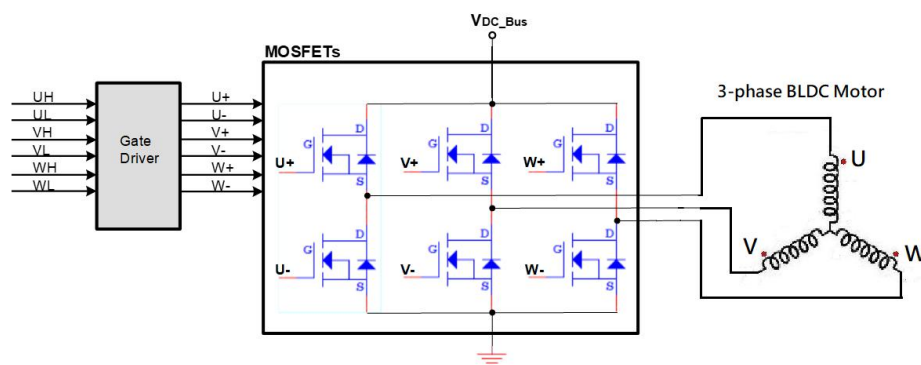


图 3. 三相逆变电路

如何才能使电机正常运转呢？图 4 是六步换相控制方式的原理图。通过六步换相控制，总共可以获得六种可能的定子磁通向量。当在特定的转子位置更改定子磁通向量时，电机就可以旋转一周，这样电机就正常运转了。

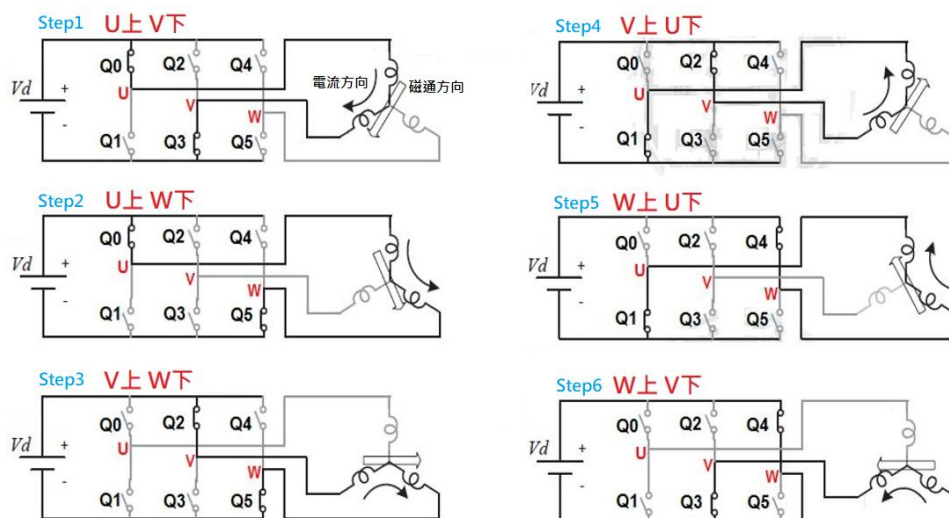


图 4. 三相 BLDC 6 种开关状态对应磁通方向

## 1.4 转子位置检测

### 1.4.1 转子位置获取方式

无刷直流电机控制的核心是换相时刻的获取，也就是转子位置的获取，转子位置的获取分有位置传感器和无位置传感器两种。

有位置传感器的控制会给无刷直流电机的应用带来某些缺陷：

- 1) 增加了电机的体积和成本；

2) 传感器的加入降低了无刷直流电机的可靠性, 传感器的安装精度也会影响无刷直流电机的性能;

3) 某些特殊应用场合不适用位置传感器。

因此无位置传感器的无刷直流电机控制的研究已经成为了主流。

### 1.4.2 无位置传感器方式

无刷直流电机的控制策略主要可分为反电势法、续流二极管法、电感法、磁链函数法、定子三次谐波法等。其中, 反电势法是应用最广, 技术最成熟的方案。

只要能检测各相绕组的反电势过零点, 就能在一个电周期内得到转子六个关键位置。非导通相反电势过零点延时  $30^\circ$  电角度即为换相点。这种通过检测相绕组反电势过零点来实现无刷直流电机无传感器六步换相控制的算法就是反电势法。

反电势法检测简单的说就是通过检测非导通相的端电压, 与无刷直流电机中性点电压进行比较。一般无刷直流电机中性点无法引出, 且有些 PWM 调制方式下, 中性点和电机端电压随着 PWM 调制规律的脉动, 因此需要特殊的处理方式检测反电势过零点。目前反电势过零点检测主要有以下三种方法:

- 1) 在 PWM 开通时刻检测未导通相反电势, 并将其和母线电压的一半进行比较找到过零点。这种方式仅适用于某些 PWM 调制方式。
- 2) 使用三相对称星型电阻网络构建虚拟中性点, 对需要检测的电机端电压进行低通滤波, 通过比较器比较找到过零点。这种方法原理和方法简单, 不需要与 PWM 调制进行同步, 因此使用广泛。此方案因为对电机端电压进行了滤波, 会导致相位延时, 从而影响反电势过零点检测的精度, 需要进行软件处理。
- 3) 利用 ADC 采样将电机端电压转换为数字信号计算出来, 与模拟中性点电压进行比较。此方案节省了模拟比较器的成本, 但是对微控制器的 ADC 采样精度和速度以及计算能力都有要求。电机转速较高时, 会导致无法准确检测到过零点。

不管使用哪种方案, 都需要特别注意规避掉换相续流对反电势检测带来的影响, 避免续流导致过零点检测不准, 从而导致换相失败。

### 1.4.3 无刷电机端电压检测

理想情况下, 无刷直流电机端电压数学模型如下:

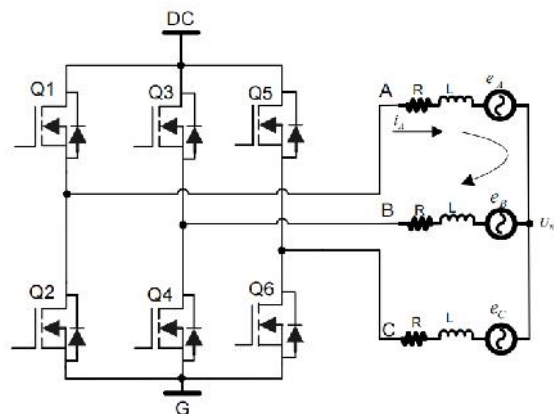
$$\begin{cases} U_{AG} = Ri_A + L \frac{di_A}{dt} + e_A + U_N \\ U_{BG} = Ri_B + L \frac{di_B}{dt} + e_B + U_N \\ U_{CG} = Ri_C + L \frac{di_C}{dt} + e_C + U_N \end{cases} \quad (1)$$

$U_{AG}$ 、 $U_{BG}$ 、 $U_{CG}$ ：端电压

$U_N$ ：中性点电压

$e_A$ 、 $e_B$ 、 $e_C$ ：三相反电动势

$R$ 、 $L$ ：绕组的等效电阻和等效电感



AB相导通，C相浮空电流回路示意图

图 5. 无刷电机端电压数学模型

在检测 C 相（浮空相  $i = 0$ ）过零点时，绕组反电动势及电流的关系：

$$\begin{cases} e_A + e_B + e_C = 0 \\ i_A + i_B = 0 \end{cases} \quad (2)$$

(1) 式 AB 两相端电压相加，得：

$$U_{AG} + U_{BG} = R(i_A + i_B) + L\left(\frac{di_A}{dt} + \frac{di_B}{dt}\right) + (e_A + e_B) + 2U_N \quad (3)$$

将式 (2) 代入式 (3)，得：

$$U_N = \frac{U_{AG} + U_{BG}}{2} - \frac{e_A + e_B}{2} \quad (4)$$

将式 (2)、式 (4) 代入式 (1)，得：

$$e_C = U_{CG} - U_N = U_{CG} - \frac{U_{AG} + U_{BG}}{2} + \frac{e_A + e_B}{2} \quad (5)$$

1) 当 C 相过零点时  $e_C = 0$ ，有  $U_{CG} = U_N$ ， $U_N = (U_{AG} + U_{BG})/2$ ；

2) 当 C 相过零点时  $e_C > 0$ ，有  $U_{CG} > U_N$ ；

3) 当 C 相过零点时  $e_C < 0$ ，有  $U_{CG} < U_N$ 。

$U_{AG}$ 、 $U_{BG}$ 、 $U_{CG}$  分别为 A、B、C 相端电压； $U_N$  为虚拟中性点电压。



### 1.4.4 ADC 采样检测过零点

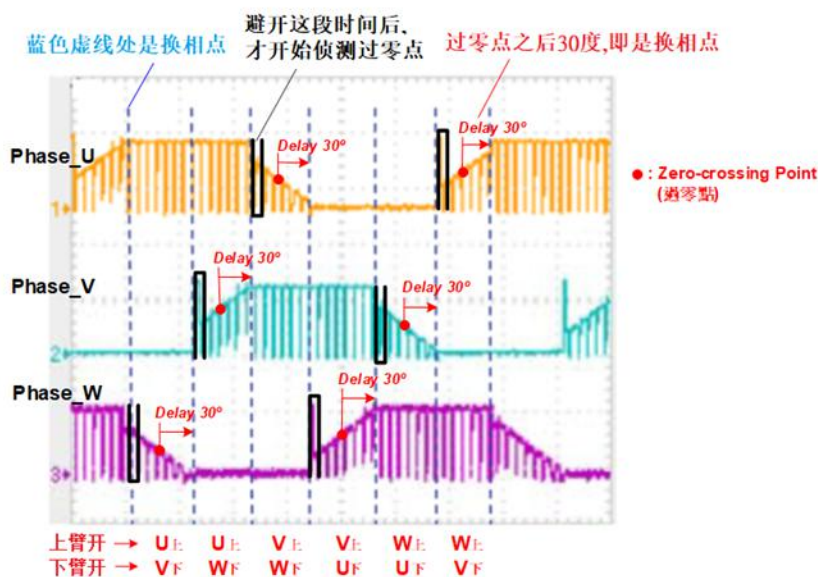


图 6. 过零点检测和延时换相

使用 MCU 的 ADC 来检测过零点之前, 必须先对相电压做分压, 再经过低通滤波, 获得低于 5V 的电压。判断过零点的阈值, 则设置为该直流电压幅值的 1/2。随着电机转速与负载的不同, 该直流电压的幅值是会改变的。因此, 过零点的阈值也随之在调整, 这可由 MCU 实时采样并计算而得。示意图如下:

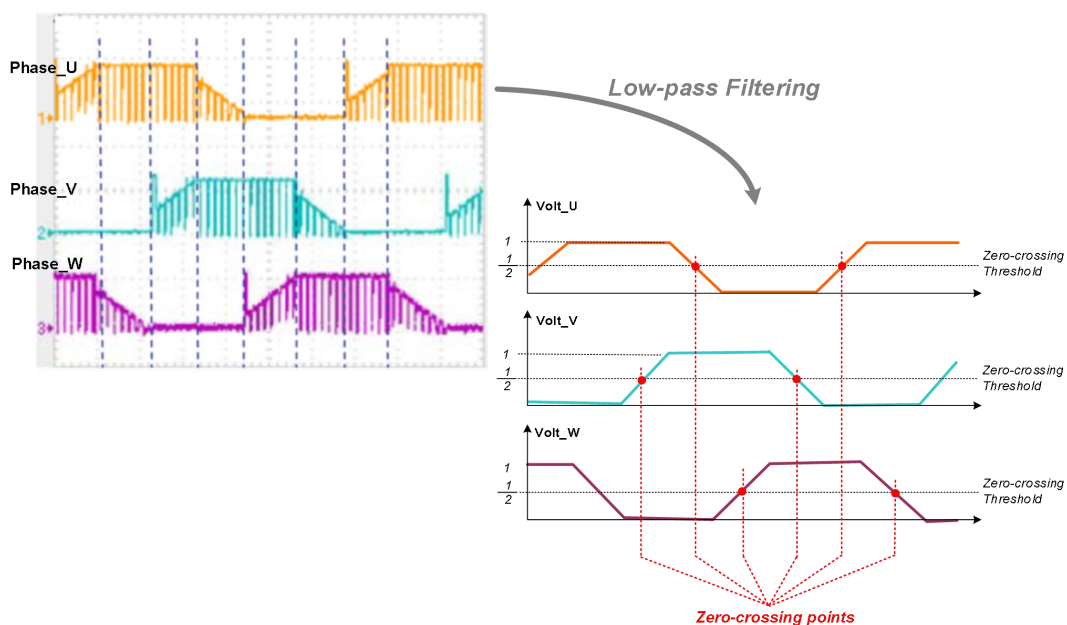
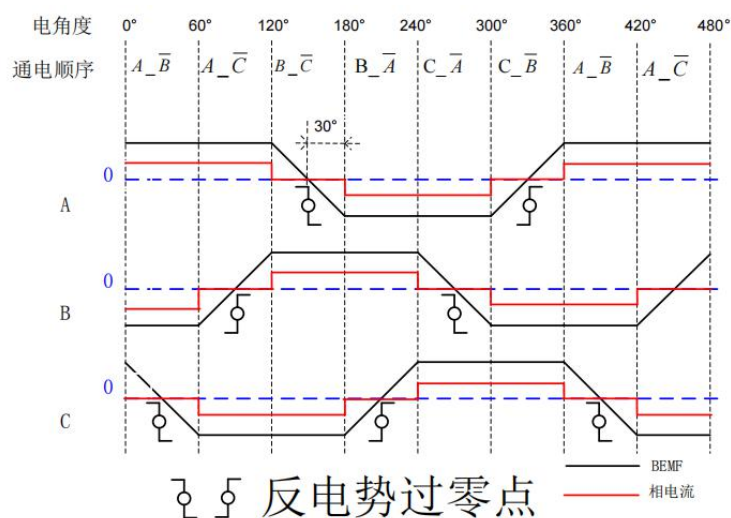


图 7. 过零点检测的实现方式

### 1.4.5 比较器检测过零点

利用比较器将浮空相端电压和虚拟中性点信号进行比较，可得到反电动势过零点信号，其时序如下图所示。



电角度	0~60°	60~120°	120~180°	180~240°	240~300°	300~360°	360~420°
通电顺序	A <sub>-</sub> B <sub>-</sub>	A <sub>-</sub> C <sub>-</sub>	B <sub>-</sub> C <sub>-</sub>	B <sub>-</sub> A <sub>-</sub>	C <sub>-</sub> A <sub>-</sub>	C <sub>-</sub> B <sub>-</sub>	A <sub>-</sub> B <sub>-</sub>
浮空相	C	B	A	C	B	A	C
触发边沿	下降沿	上升沿	下降沿	上升沿	下降沿	上升沿	下降沿

图 6. 过零点状态和开关管对应关系

## 3. 缩略语和符号

术语	含义
MM32	灵动微电子
BEMF	反电动势
BLDCM	无刷直流电机
PMSM	永磁同步电机
DC	直流电
GPIO	通用目的输入/输出
ADC	模数转换器

OPA	运算放大器
ISR	中断服务程序
CMP	比较器
PWM	脉冲宽度调制
DCBus	直流母线

表 1 缩略语

符号	定义
$R_s$	定子相电阻
$L_s$	定子相电感
$P_p$	电机极对数
$T_e$	电磁转矩

表 2 符号索引列表

## 修改记录

版本	内容	日期
V1.0	Initial issue.	2022/3/31