

1.1 PMSM 和 BLDCM 的相似之处

PMSM 起源于绕线式同步电机，它用永磁体代替了绕线式同步电机的激磁绕组，它的一个显著特点是反电势波形是正弦波，与感应电机非常相似。在转子上有永磁体，定子上有三相绕组。

BLDCM 起源于永磁直流电机，它将永磁直流电机结构进行“里外翻”，取消了换相器和电刷，依靠电子换相电路进行换相。转子上有永磁体，定子上有三相绕组。

目前在空间飞行器中使用的 PMSM 和 BLDCM 转子主要是表面贴装永磁体结构。因此从构成结构上看，两者非常相似。

1.2 PMSM 和 BLDCM 的不同之处

- 反电势不同，PMSM 具有正弦波反电势，而 BLDCM 具有梯形波反电势。
- 定子绕组分布不同，PMSM 采用短距分布绕组，有时也采用分数槽或正弦绕组，以进一步减小纹波转矩。而 BLDCM 采用整距集中绕组。
- 运行电流不同，为产生恒定电磁转矩，PMSM 需要正弦波定子电流；BLDCM 需要矩形波电流。PMSM 和 BLDCM 反电势和定子电流波形如图 1 所示。

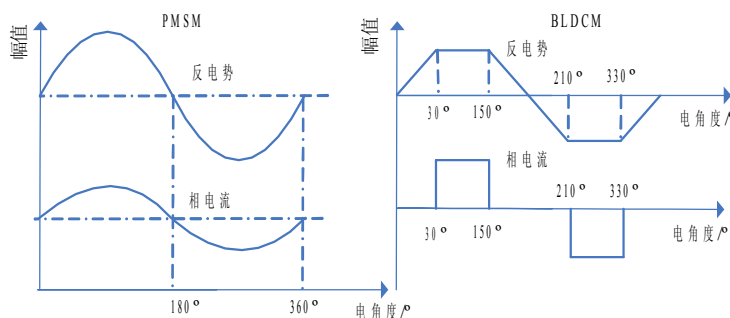


图 1 PMSM 和 BLDCM 反电势和定子电流波形

- 永磁体形状不同，PMSM 永磁体形状呈抛物线形，在气隙中产生的磁密尽量呈正弦波分布；BLDCM 永磁体形状呈瓦片形，在气隙中产生的磁密呈梯形波分布。
- 运行方式不同，PMSM 采用三相同时工作，每相电流相差 120° 电角度，要求有位置传感器。BLDCM 采用绕组两两导通，每相导通 120° 电角度，每 60° 电角度换相，只需要换相点位置检测。

正是这些不同之处，使得在对 PMSM 和 BLDCM 的控制方法、控制策略和控制电路上有很大的差别。

2 PMSM 和 BLDCM 特性分析

按照空间应用中最关心的特性：功率密度、转矩惯量比、齿槽转矩和转矩波动、反馈元件、逆变器容量等特性对 PMSM 和 BLDCM 进行对比分析。

2.1 功率密度

在机器人和空间作动器等高性能指标应用场合，对于给定的输出功率，要求电机重量越小越好。功率密度受电机散热能力即电机定子表面积的限制。对于永磁电机，绝大多数的功率损耗产生在定子，包括铜耗、涡流损耗和磁滞损耗，而转子损耗经常被忽略。所以对于一个给定的结构尺寸，电机损耗越小，允许的功率密度就越高。假设 PMSM 和 BLDCM 的涡流损耗、磁滞损耗和铜耗相同，比较两种电机的输出功率。

PMSM 中，正弦波电流可以通过滞环或 PWM 电流控制器得到，而铜耗基本上由电流决定。

设正弦波电流幅值为 I_1 ，则有效值为 $I_1/\sqrt{2}$ ，铜耗为 $3(I_1/\sqrt{2})^2 R$ ， R 为相电阻。BLDCM 中，铜耗为 $3(\sqrt{2}I_2/\sqrt{3})^2 R$ ， I_2 为梯形波电流峰值。假设损耗相同，则可得出 $I_1 = 1.15I_2$ ，所以 BLDCM 输出功率与 PMSM 输出功率之比为

$$\frac{2EI_2}{3E/\sqrt{2}I_1/\sqrt{2}} = 1.15 \quad (6)$$

式中， E 为反电势幅值。

所以，在相同的尺寸下，BDLCM 与 PMSM 相比，可以多提供 15% 的功率输出。如果铁耗也相同，BDLCM 的功率密度比 PMSM 可提高 15%。

2.2 转矩惯量比

在伺服系统中，通常要求电机的最大加速度，转矩惯量比就是电机本身所能提供的最大加速度。因为 BDLC 可以比 PMSM 多提供 15% 的输出功率，所以它可获得被 PMSM 多 15% 的电磁转矩。如果 BDLC 和 PMSM 具有相同速度，它们的转子转动惯量也相同，那么 BDLC 的转矩惯量比要比 PMSM 大 15%。

2.3 齿槽转矩和波动转矩

转矩脉动是机电伺服系统的最大困扰，它使精确的位置控制和高性能的速度控制很困难。在高速情况下，转子惯量可以过滤掉转矩波动。但在低速和直接驱动应用场合，转矩波动将严重影响系统性能，将使系统的精度和重复性恶化。而空间精密机电伺服系统绝大多数工作在低速场合，因此电机转矩脉动问题是影响系统性能的关键因素之一。

PMSM 和 BLDCM 都存在转矩脉动问题。转矩脉动主要有以下几个原因造成：齿槽效应和磁通畸变、电流换相引起的转矩及机械加工制造引起的转矩。

● 齿槽效应

在永磁电机的电枢电流为零的情况下，当转子旋转时，由于定子齿槽的存在，定子铁芯磁阻的变化产生了齿槽磁阻转矩，齿槽转矩是交变的，与转子的位置有关，它是电动机本身空间和永磁场的函数。在电机制造上，将定子齿槽或永磁体斜一个齿距，可以使齿槽转矩减小到额定转矩的 1% - 2% 左右。或者采用定子无槽结构，可以彻底消除齿槽效应，但这些方法都将降低电机的出力。PMSM 和 BDLC 中的齿槽转矩脉动没有明显的差别。

● 磁通畸变和换相电流畸变引起的转矩脉动

磁通畸变和电流畸变是指 PMSM 中气隙磁场、反电势和电枢电流是非正弦波，BLDCM 中气隙磁场和反电势非梯形波，电枢电流是非矩形波。气隙磁场和电枢电流相互作用后会产生转矩波动，反电动势与理想波形的偏差越大，引起的转矩脉动越大。

BLDCM 中，电机的电感限制了换相时绕组电流的变化率，定子绕组电流不可能是矩形波。只能得到梯形波电流，引起较大的转矩波动。另外，BLDCM 定子合成磁通不是平滑地旋转，而是以一种不连续地状态向前步进，定、转子旋转磁通不可能是严格同步的，这会造成转矩的脉动，脉动频率为基波的 6 倍。而在 PMSM 中产生正弦波电流是可能的，PMSM 理想运行状态是正弦分布的气隙磁密同正弦绕组电流产生恒定转矩，而实际上，PMSM 中气隙磁密远非正弦波分布，而是梯形波分布，无疑引起了转矩脉动。但它和电枢电流波形不匹配引起的转矩波动要比 BDLC 中的转矩波动小的多，况且 PMSM 定子合成磁通是平滑地连续旋转。因此 PMSM 的转矩波动明显要小于 BLDCM。

● 逆变器电流控制环节引起的转矩脉动

在 BLDCM 中，电流滞环控制器中滞环宽度和 PWM 电流控制器开关频率将引起 BLDCM 实际电流围绕期望电流上下高频波动，电机转矩也出现高频波动，通常幅度要低于换相电流引起的转矩波动。

在 PMSM 中，也会出现由滞环或 PWM 电流控制器引起的高频转矩波动，通常比较小，并由于开关频率较高，很容易被转子惯量过滤掉。

因此，从转矩波动看，PMSM 比 BDLC 具有明显的优势，BDLCM 适合用在低性能低精度的速度和位置伺服系统。而 PMSM 适合用在高性能的速度和位置伺服系统。

2.4 伺服系统中的信号反馈元件

PMSM 需要正弦波电流，而 BLDCM 需要矩形波电流，导致了反馈元件的不同。BLDCM 中，每一时刻只有两相绕组导通，每相导通 120° 电角度，电流每 60° 电角度换相一次，只要正确检测出这些换相点，就能保证电机正常运行，在空间机电系统中最常见的位置传感器是霍尔位置开关。在 PMSM 中，需要正弦波电流，电流幅值由转子瞬时位置决定，电机工作时所有三相绕组同时导通，需要连续的位置传感器，在速度伺服系统中仍需连续位置传感器，空间机电系统中最常见的位置传感器有旋转变压器+RDC 解码模块、光电编码器和同步感应器+RDC 解码模块。BLDCM 构成的速度伺服系统中，只需要一个低分辨率的传感器，从这一点看，如果换相引起的转矩波动可以接受，BLDCM 比 PMSM 更适合于速度伺服系统，而在位置伺服系统中，由于需要位置传感器，BLDCM 与 PMSM 相比没有优势。

对于电机电流传感器，BLDCM 和 PMSM 伺服系统一般只需要两个电流传感器测量两个绕组电流，第三个绕组电流可以由两个电流测量值推算出来。最常见的电流传感器是霍尔电流传感器。

2.5 逆变器容量

对于给定电流逆变器（滞环或 PWM 电流逆变器），假设其连续额定电流为 I 。电机最大反电势为 E ，当驱动 PMSM 时，最大可能的输出功率为 $(3E/\sqrt{2})(I/\sqrt{2}) = 3EI/2$ ，而驱动 BLDCM 时，最大可能的输出功率为 $2EI$ 。因此 BLDCM 最大输出功率与 PMSM 时最大输出功率比为 $2EI/(3EI/2) = 1.33$ ，即 BLDCM 可多输出 33% 的功率，当然考虑到 BLDCM 的铁损增加，这个数值要小一些。

2.6 控制系统结构不同

分别以空间应用常见 PMSM 位置伺服系统和 BLDCM 位置伺服系统为例说明主要区别。

- 基于三环控制结构的 PMSM 转子磁场定向位置伺服系统见图 2 所示。

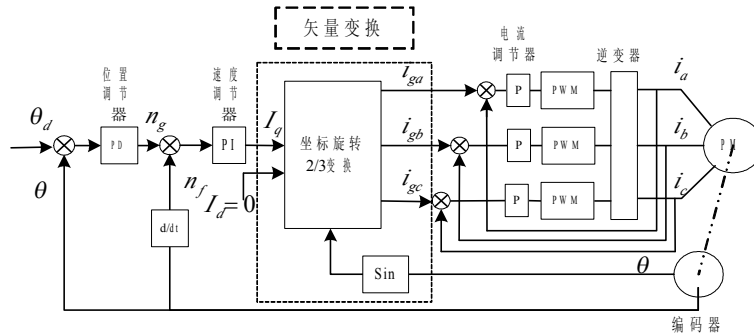


图 2 PMSM 位置伺服系统转子磁场定向矢量控制框图

设转子位置角 θ ，则逆变器输出的定子三相电流给定瞬时值应为

$$\begin{cases} i_A = -I_s \sin \theta \\ i_B = -I_s \sin(\theta - 120^\circ) \\ i_C = -I_s \sin(\theta - 240^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

式中， I_s 为逆变器输出的给定定子电流幅值。

则永磁同步电机电磁转矩方程为

$$T_{es} = 3/2 n_p r I_s \quad (8)$$

因此，在转子磁链定向控制中，把定子电流矢量始终控制在 q 轴上，即定子电流 d 轴励磁分量 $i_d = 0$ ，准确检测出转子空间位置（d 轴），通过控制逆变器使三相定子的合成电流矢

量位于 q 轴上，那么电机的电磁转矩只与定子电流的幅值成正比，就能很好地控制转矩。电流环通常采用 PWM 电流跟踪控制。

- 基于三环控制结构的 BLDCM 位置伺服系统控制框图见图 3 所示。

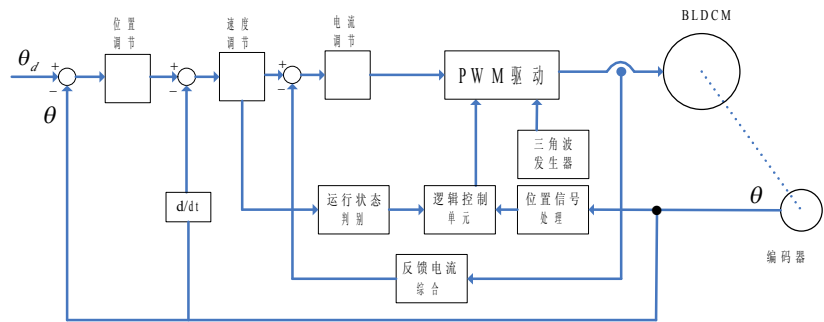


图 3 BLDCM 位置伺服系统控制框图

从上面系统控制结构可以看出，基于 PMSM 和 BLDCM 组成的伺服系统两者最大的区别在于电流环的控制上。在 PMSM 位置伺服系统中，只要改变给定位置信号的极性，就可以使 PMSM 方便地在四象限运行。而在 BLDCM 位置伺服系统中，必须经过运行状态（正、反转，电、制动）判别后，经过逻辑控制单元产生功率开关控制信号，再与 PWM 信号综合后驱动功率电路，从而控制 BLDCM 的运行。