



哈爾濱工業大學

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



自动控制实践I-19

永磁交流伺服电机系统



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



思考

之前所学习的小功率同步电动机和步进电机,影响它们驱动性能的原因?

小功率同步电动机和步进电机,本质上开环运行,获得了简单、低成本的特点,但同时也限制了它们的驱动性能。



目 录

1. 永磁交流伺服电机概述

2. 无刷直流电动机

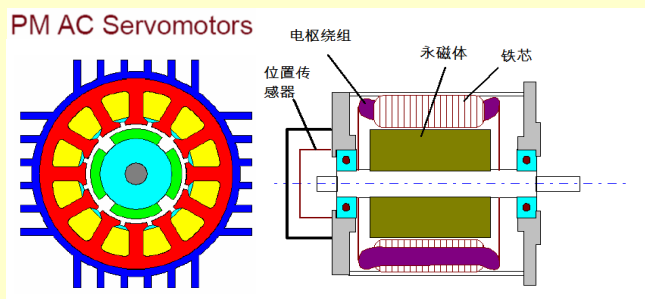
3. 永磁同步伺服电机系统

4. 同步电机小结

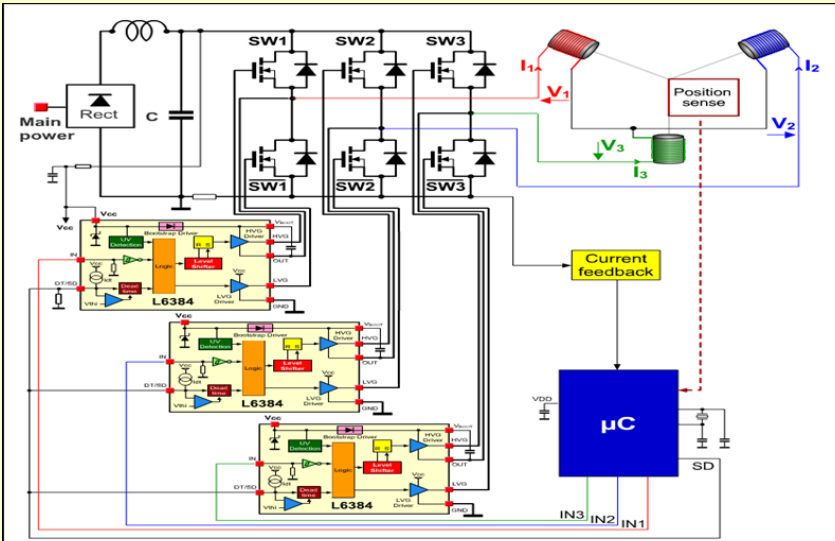


1. 永磁交流伺服电机概述

电机定子上设有多相对称交流绕组，转子由永磁体激磁。根据转子位置传感器的信号，对定子绕组施加电压产生多相对称电流，进而得到与转子成固定位置关系的旋转磁场，带动转子以同步速度旋转，即为永磁交流伺服电机。



1. 永磁交流伺服电机概述

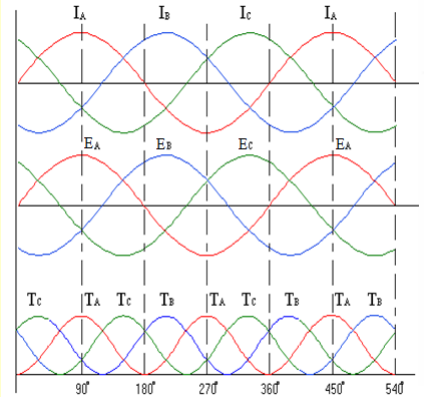
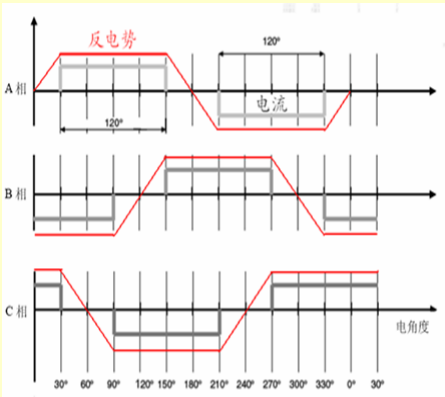


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 永磁交流伺服电机概述

根据不同的驱动波形，永磁交流伺服电机分为：无刷直流电机(BLDCM)、永磁同步电机(PMSM)。

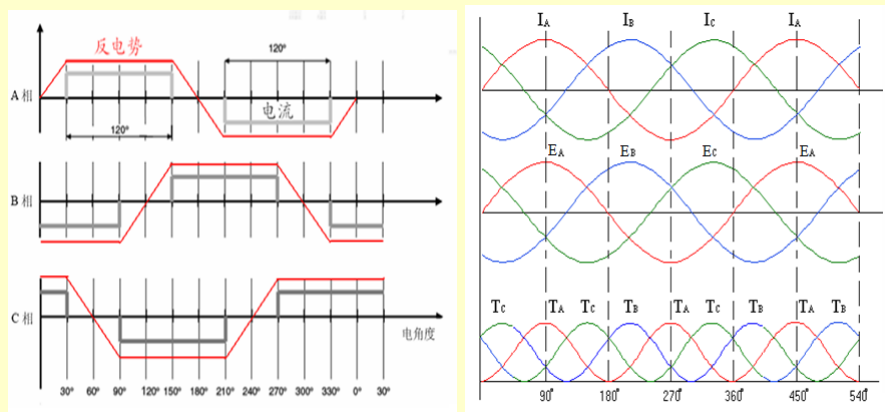


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 永磁交流伺服电机概述

无刷直流电机(BLDCM)也称方波永磁电机, 永磁同步电机(PMSM)也称正弦波永磁电机。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 永磁交流伺服电机概述

- 采用永磁体激磁, 基本无铜损和铁损, 无滑环和电刷摩擦损耗, 容量相同时电机的体积小、重量轻, 效率高;
- 定子生成磁场对转子位置实现闭环的磁场定向控制, 电流成分可控, 控制特性好, 功率因数高;
- 转动惯量小, 允许转矩大, 可获得较高的加速度和过载能力, 动态性能好;
- 结构紧凑, 无需维护, 运行可靠。
- 正弦波形的永磁同步伺服电机系统, 需要精密的转子位置传感器和矢量控制驱动器, 成本较高。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 永磁交流伺服电机概述

永磁交流伺服电机系统相对直流电机、感应电机、步进电机等伺服驱动系统具有显著的性能优势，在军事、工业、民用领域的应用日益广泛。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



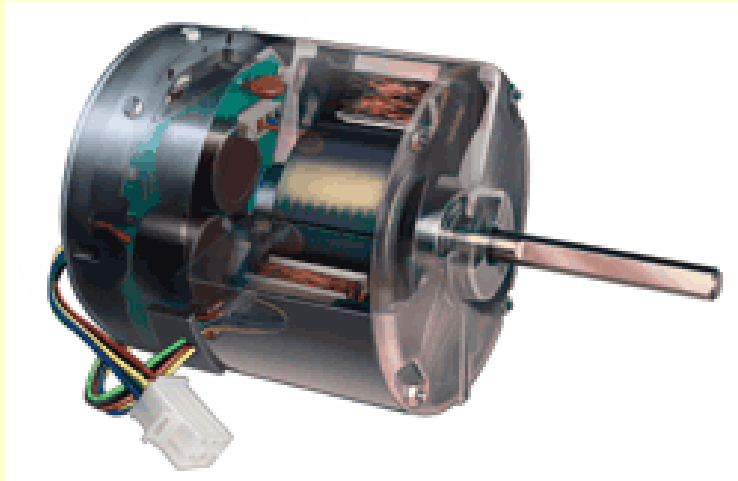
目 录

1. 永磁交流伺服电机概述
- 2. 无刷直流电动机**
3. 永磁同步伺服电机系统
4. 同步电机小结

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 无刷直流电机(BLDCM)



直流无刷直流电动机外形图

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 无刷直流电机(BLDCM)

无刷直流电机在速率伺服和驱动应用中日益广泛应用，如：计算机的硬盘、光驱的主轴驱动、散热风扇的集成实现；家用电器中空调、冰箱、洗衣机的调速驱动；医疗设备中的泵类驱动、人造心脏等；航天探测器的车轮驱动、空间试验室中的泵类、风扇驱动；动量体应用中的陀螺和飞轮的驱动等等。

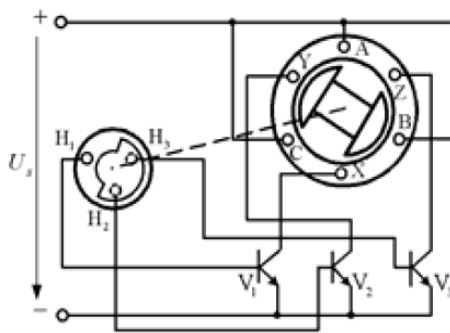
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.1 无刷直流电机(BLDCM)组成

无刷直流电动机原理

电枢静止，磁极旋转，且磁极为永久磁铁。电枢绕组中电流的换向是借助于转子位置传感器和电子开关线路来实现的，所以，无刷直流电动机一般都是由电动机、位置传感器和电子开关线路三部分组成。

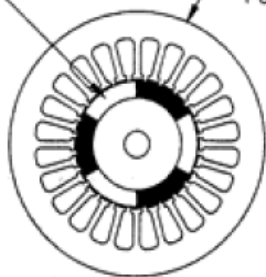


无刷直流电动机原理图

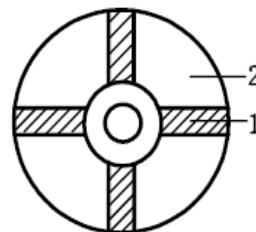
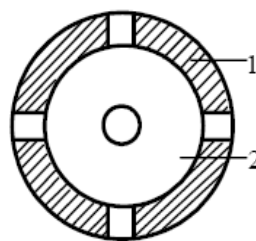


2.1 无刷直流电机(BLDCM)组成

PERMANENT MAGNET ROTOR
24 SLOT STATOR PUNCHING



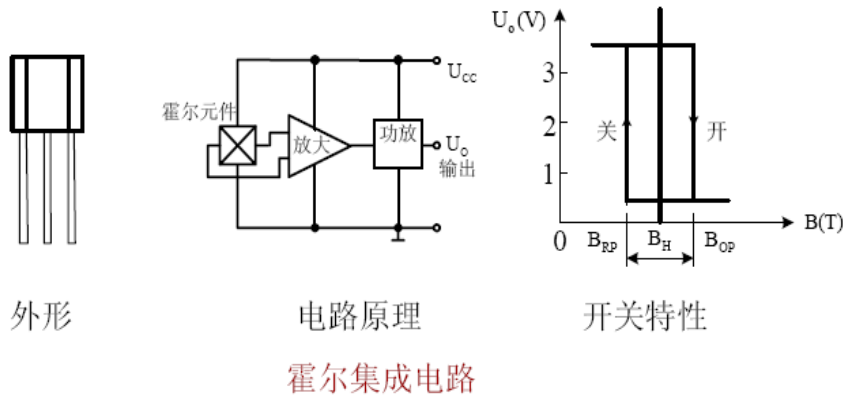
BRUSHLESS DC MOTOR



2.1 无刷直流电机(BLDCM)组成

转子位置传感器

(1)磁敏式位置传感器

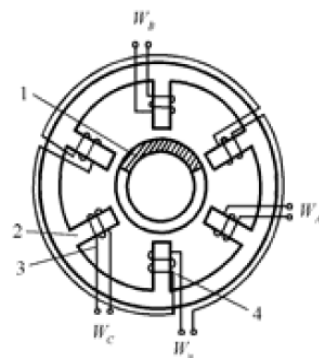


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

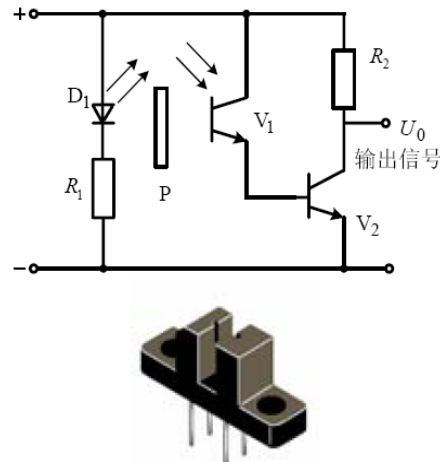


2.1 无刷直流电机(BLDCM)组成

(2)电磁式位置传感器



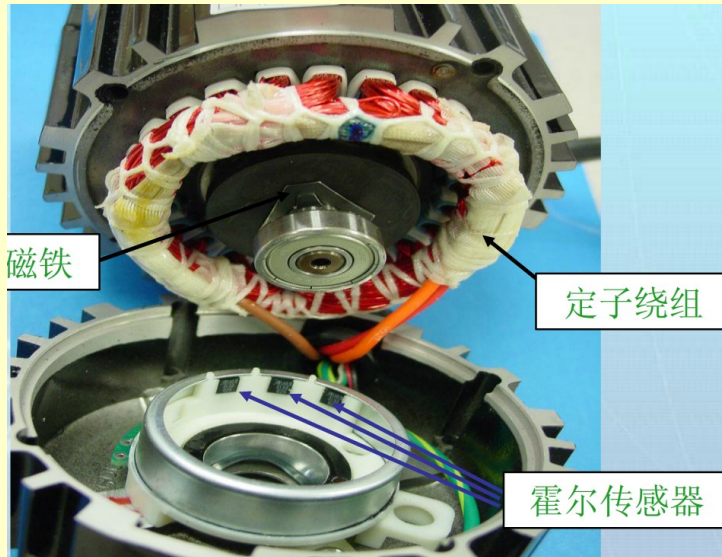
(3)光电式位置传感器



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.1 无刷直流电机(BLDCM)组成

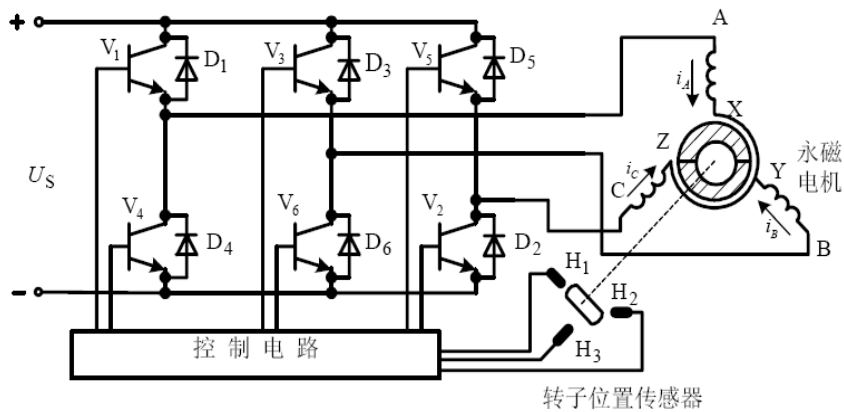


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.2 无刷直流电机运行原理

二相导通星形六状态



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.2 无刷直流电机运行原理

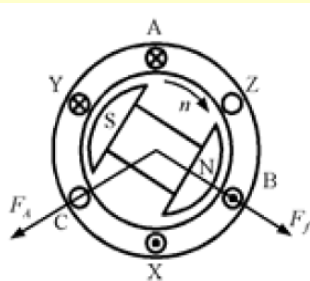
三相六状态绕组与开关管导通顺序表

电角度	0°	60°	120°	180°	240°	300°	360°
导通顺序	A		B		C		
	B	C		A		B	
V ₁	← 导通 →						
V ₂		← 导通 →					
V ₃			← 导通 →				
V ₄				← 导通 →			
V ₅					← 导通 →		
V ₆	← 导通 →						← 导通 →

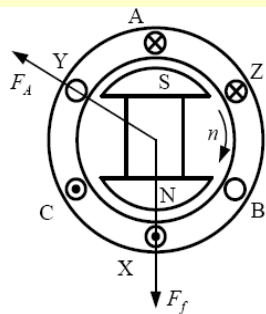
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.2 无刷直流电机运行原理



V₁V₆导通



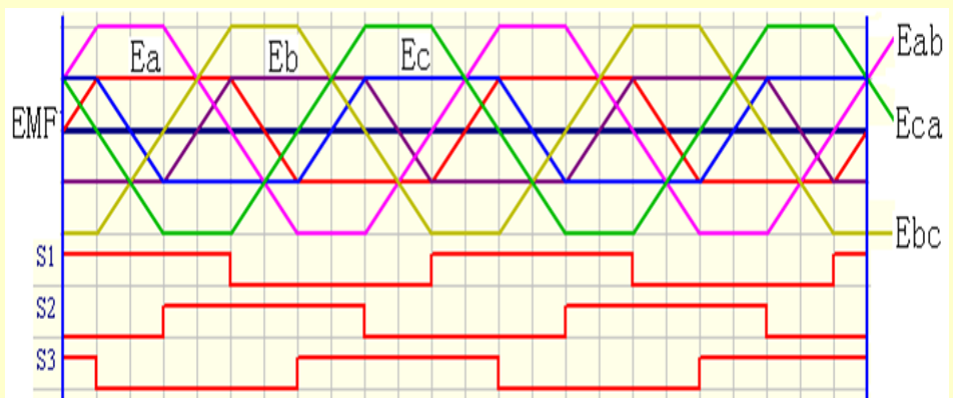
V₁V₂导通

- 定子合成磁场仍为跳跃式旋转，步进为60度，即1/6周期。
- 每转60度，逆变器开关管换流一次，有六个状态。
- 每个功率管（每相绕组）导通120。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.2 无刷直流电机运行原理

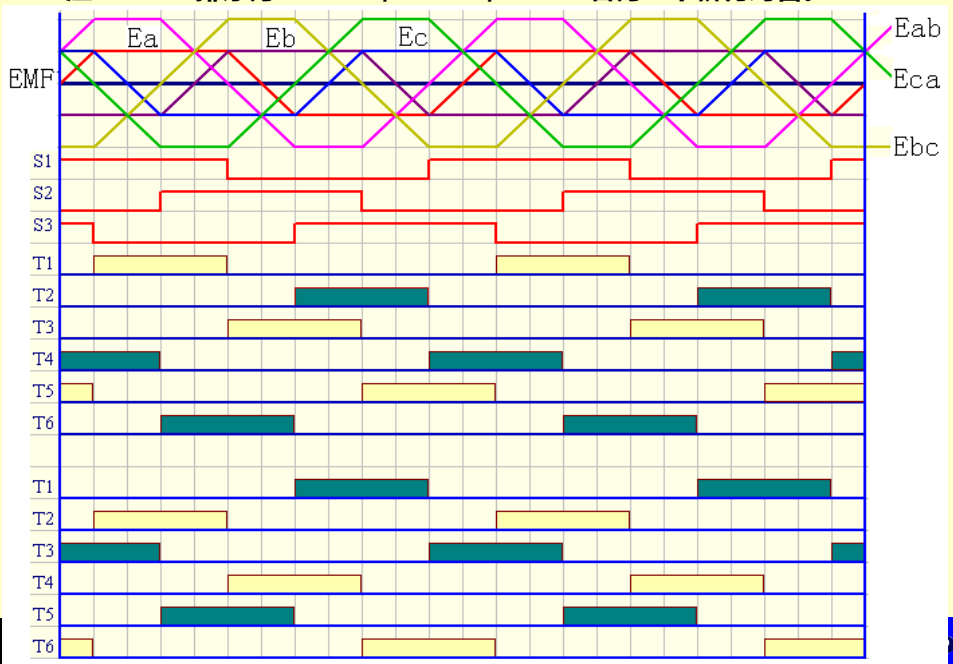


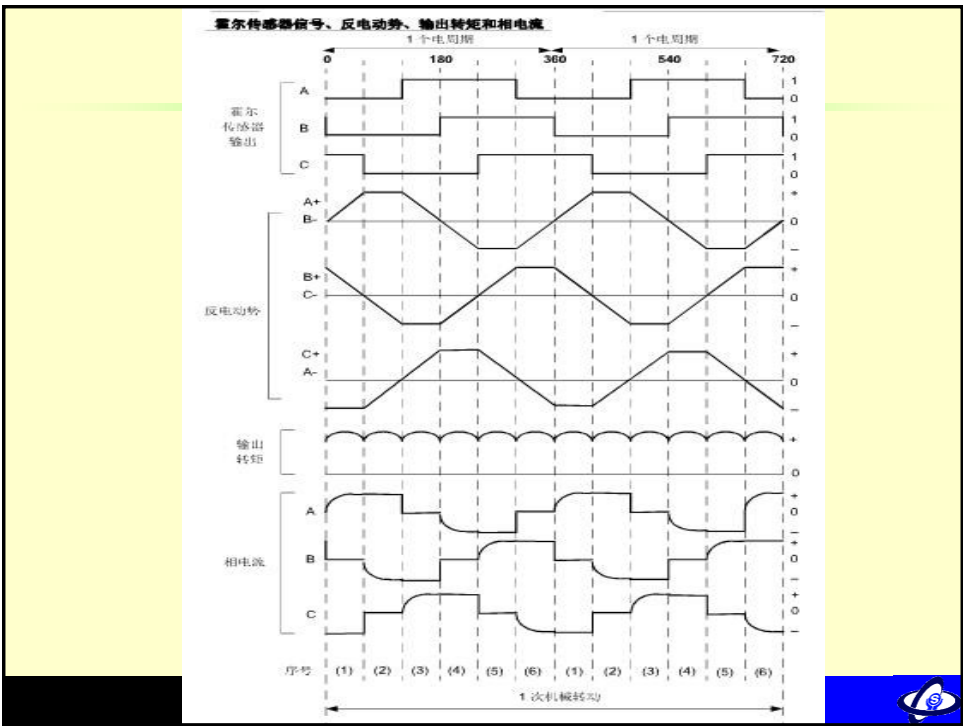
三相无刷直流电机位置传感器信号与电机反电势波形的对应关系

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

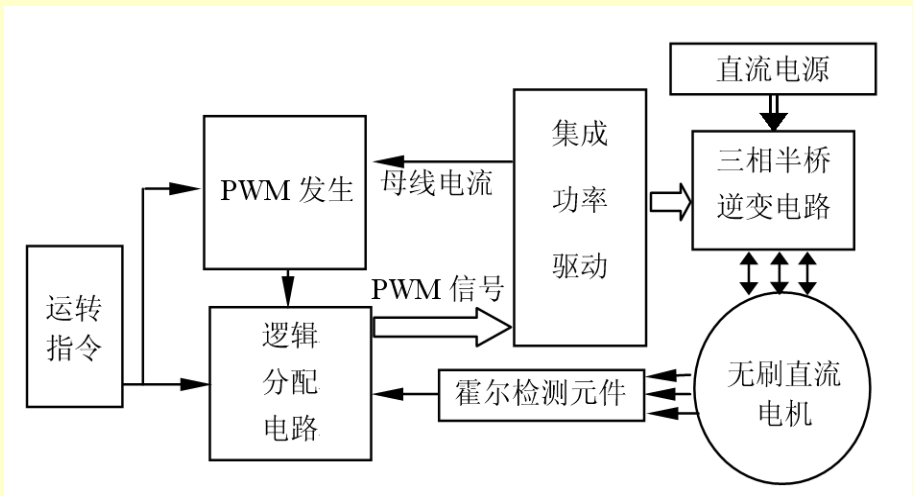


注：T1-T6排序为：T1-T2，T3-T4，T5-T6各为上下桥臂对管。

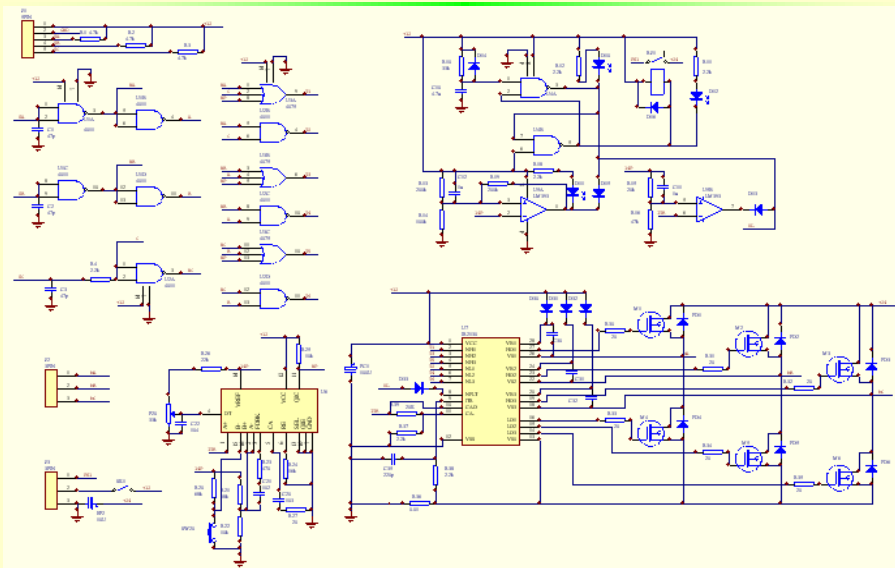




2.3 无刷直流电机(BLDCM)系统



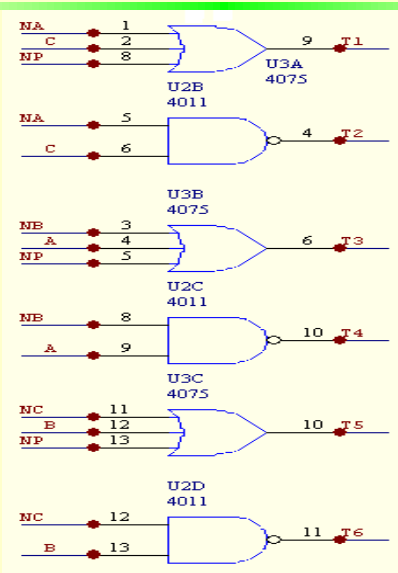
2.3 无刷直流电机系统



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



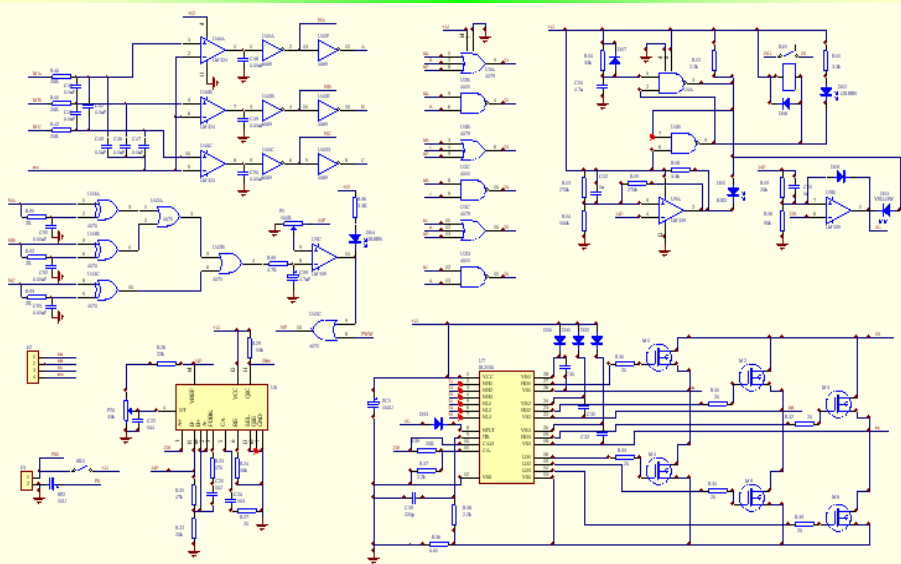
2.3 无刷直流电机系统



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



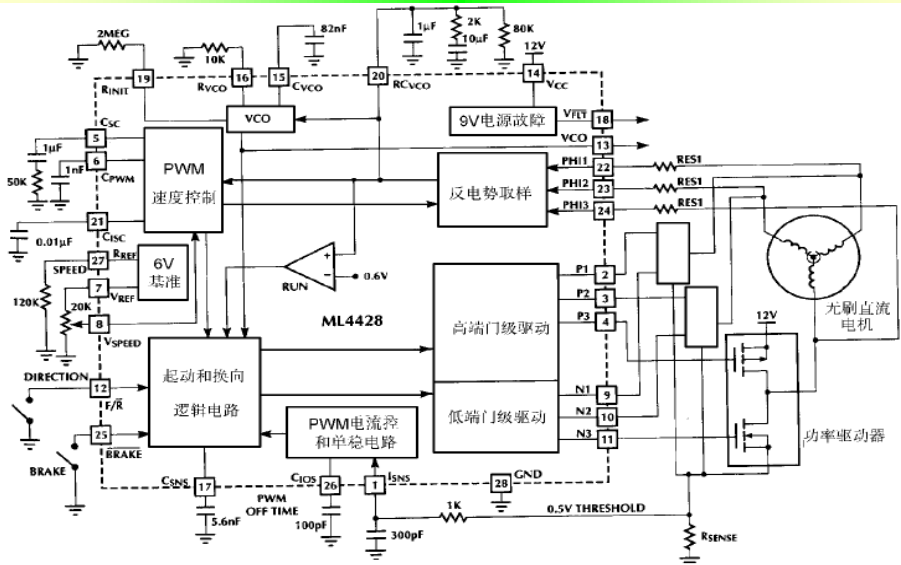
2.3 无刷直流电机系统



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



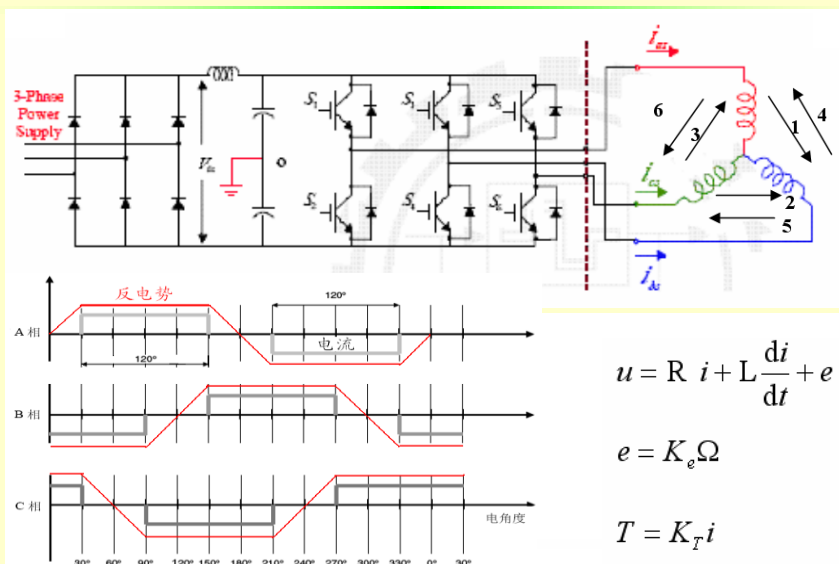
2.3 无刷直流电机系统



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.4 无刷直流电机系统特性



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.4 无刷直流电机系统特性

无刷直流电动机模型

电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

力矩方程:

$$T_{em} = \frac{\sum_{j=a,b,c} e_j i_j}{\Omega} = \frac{(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)}{\Omega}$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

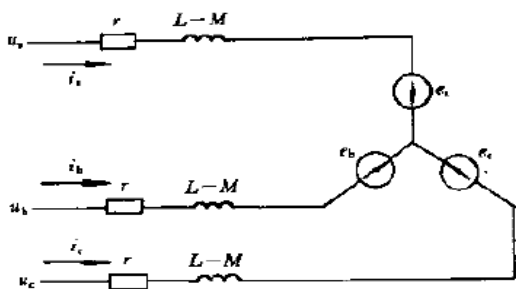


2.4 无刷直流电机系统特性

无刷直流电动机模型

– 根据电压方程可以建立等效电路模型：

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$



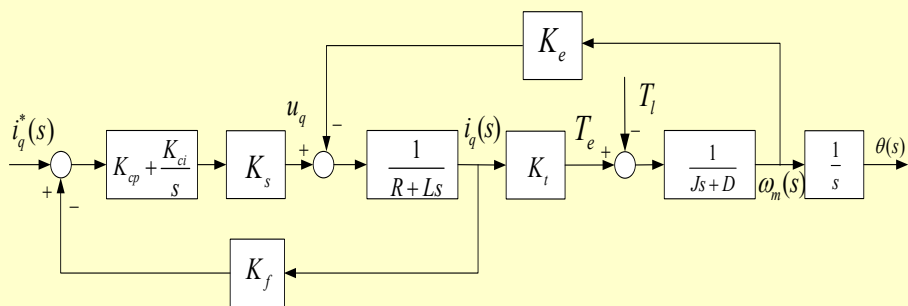
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.4 无刷直流电机系统特性

无刷直流电机系统的控制模型

电流负反馈下的无刷直流电机控制框图：与直流电机系统的电流闭环控制结构一致。



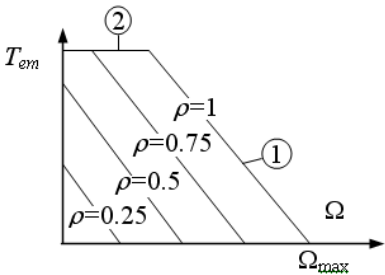
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.4 无刷直流电机系统特性

无刷直流电机系统和直流电机系统在原理上具有相同的描述方程，运行和控制特性相同。

无刷直流电机在换向过程中，不能实现电流波形为纯方波，因此存在换向力矩波动的问题。适于工业、民用速率伺服应用。



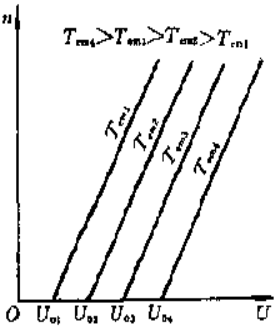
调压控制的机械特性

$$T_{em} = K_t \frac{\rho U - K_e \Omega}{R}$$

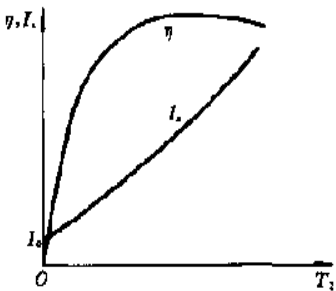


2.4 无刷直流电机系统特性

调节特性



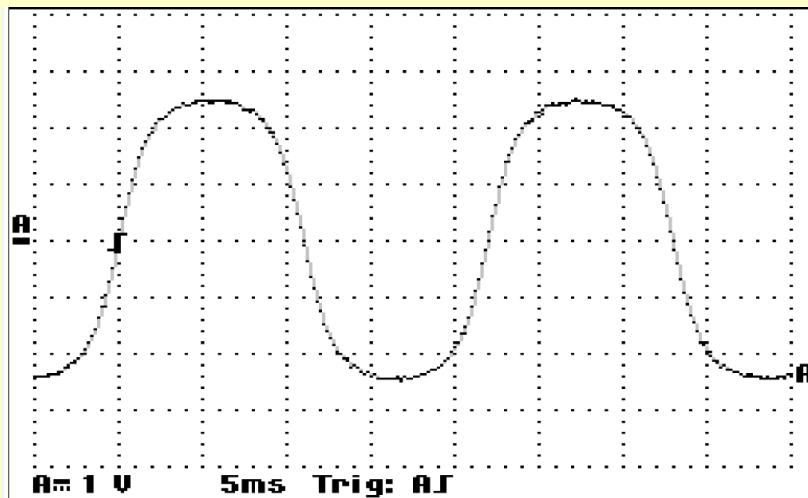
工作特性



从机械特性和调节特性可以看出，稀土永磁无刷直流电动机具有和一般有刷直流电动机一样好的控制性能，可以通过改变电源电压实现无级调速。



2.4 无刷直流电机系统特性

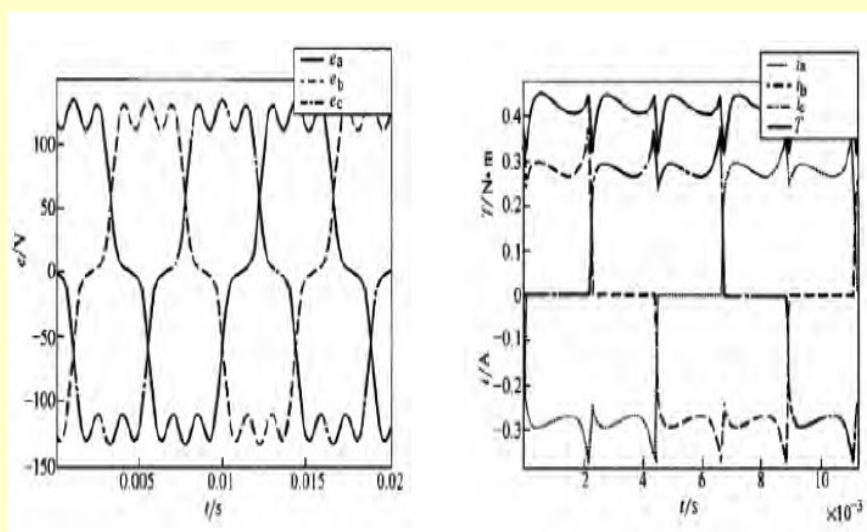


三相无刷直流电机实测相反电势波形

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



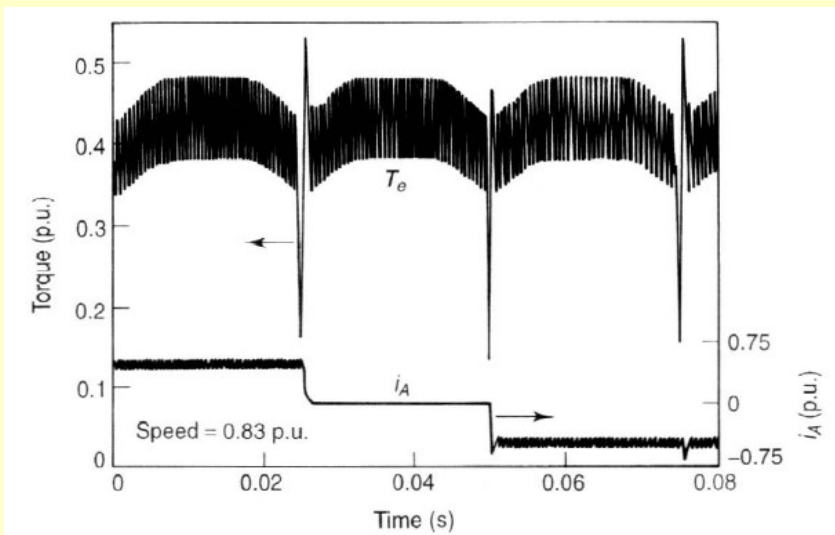
2.4 无刷直流电机系统特性



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.4 无刷直流电机系统特性



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.5 特性比较

BLDC 电机与有刷直流电机比较

特性	BLDC 电机	有刷直流电机
换向	根据霍尔位置传感器进行电子换向。	采用电刷换向。
维护	由于无电刷而较少需要。	需要定期维护。
寿命	较长。	较短。
转速 / 转矩特性	平坦——在负载额定的条件下, 可在所有转速下正常工作。	中等平坦——转速较高时, 电刷摩擦增加, 因此减少了有用转矩。
效率	高——没有电刷两端的压降。	中等。
输出功率 / 体积	高——由于出众的散热特性而缩小了体积。由于 BLDC 电机将绕组放在了连接至电机外壳的定子上, 因而散热更好。	中等 / 低——电枢产生的热量散发到气隙中, 这使气隙中的温度升高, 限制了输出功率 / 体积规范。
转子惯性	小, 因为转子上有永磁体。这改进了动态响应。	较大的转子惯性限制了动态特性。
转速范围	较高——无电刷 / 换向器施加的机械限制。	较低——有电刷的机械限制。
产生的电子干扰	低。	电刷中的电弧会对附近设备产生电磁干扰。
制造成本	较高——由于其中有永磁体, 制造成本较高。	低。
控制	复杂且昂贵。	简单且便宜。
控制要求	要保持电机运转, 始终需要控制器。还可使用这一控制器控制转速。	固定转速不需要控制器; 只有需要改变转速时才需要控制器。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.5 特性比较

BLDC 电机与感应电机比较

特性	BLDC 电机	交流感应电机
转速 / 转矩特性	平坦——在负载额定的条件, 可在所有转速下正常工作。	非线性——低转速下转矩也低。
输出功率 / 体积	高——由于转子采用永磁体, 对于给定的输出功率可以实现较小的体积。	中等——由于定子和转子都有绕组, 输出功率与体积之比低于 BLDC。
转子惯性	小——动态特性较佳。	大——动态特性较差。
控制要求	要保持电机运转, 始终需要控制器。还可使用这一控制器控制转速。	固定转速不需要控制器; 只有需要改变转速时才需要控制器。
差频	定子和转子磁场的频率相等。	转子运行频率低于定子, 差值即为差频, 随着电机负载的增加该差频也增加。



作业

两相无刷直流电机每相反电势平顶宽度为 90° , 采用H桥电路驱动每一相绕组, 绘出两相无刷直流电机的反电势波形图, 考虑需要几片霍尔传感器和采用什么样的逻辑关系, 控制两个H桥的每个功率管开关, 实现电机的正反向旋转。在反电势波形图的下方, 绘出对应的霍尔传感器信号和正反转驱动时各个功率管的开关波形。



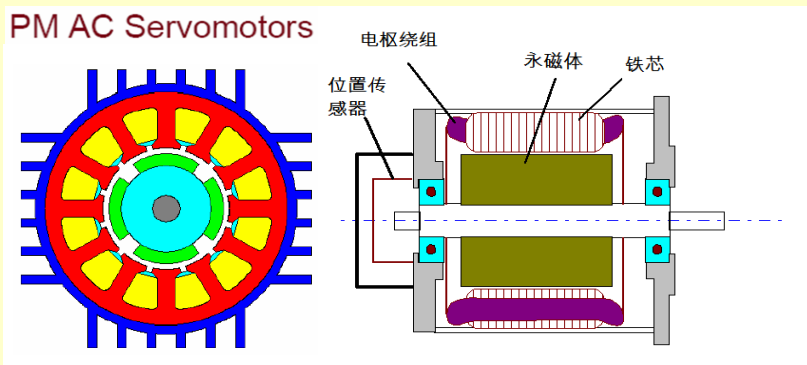
目 录

1. 永磁交流伺服电机概述
2. 无刷直流电动机
- 3. 永磁同步伺服电机系统**
4. 同步电机小结



3.1 永磁同步伺服电机原理

永磁交流电机中，无刷直流电机绕组多采用整距绕组以获得梯形反电势波形，而永磁同步电机绕组会采用分布、短距、分数槽等措施，以保证反电势正弦性的良好。



3.1 永磁同步伺服电机原理

力矩方程:

$$\begin{cases} e_a = K_e \Omega \sin(\omega t) \\ e_b = K_e \Omega \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ e_c = K_e \Omega \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad \begin{cases} i_a = I_m \sin(\omega t) \\ i_b = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_c = I_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

$$T_{em} = \frac{(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)}{\Omega} = \frac{3}{2} K_e I_m$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3.1 永磁同步伺服电机原理

永磁同步电机在ABC坐标下的模型

电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3.2 永磁同步电机矢量控制

当前永磁同步电机的主要控制方法有：矢量控制和直接转矩控制。

矢量控制利用电机转子位置传感器，可准确地实现励磁和力矩电流的解耦控制，实现良好的动静态响应指标。而直接转矩控制省略了昂贵的位置传感器，而代之以控制算法实现对磁场位置的预估，降低了成本，但当前直接转矩控制所实现的控制性能还不能与矢量控制媲美。

在目前伺服应用领域，矢量控制占据着主导位置。

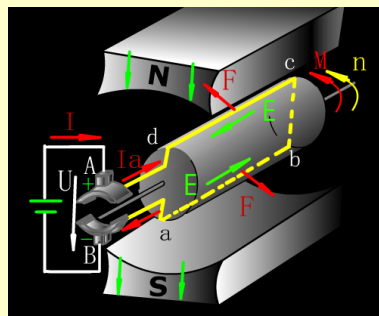
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3.2 永磁同步电机矢量控制

问题：我们以控制电流为目的，以电压为调整控制的手段，两者都是正弦量；此外，电机绕组的自感和互感均为转角正弦函数，使得动态控制更为复杂。有没有可简化问题的方法？

参考控制特性简单的直流电机，如果能将交流电机的物理模型等效地变换成类似直流电机的模式，分析和控制就可以大大简化。

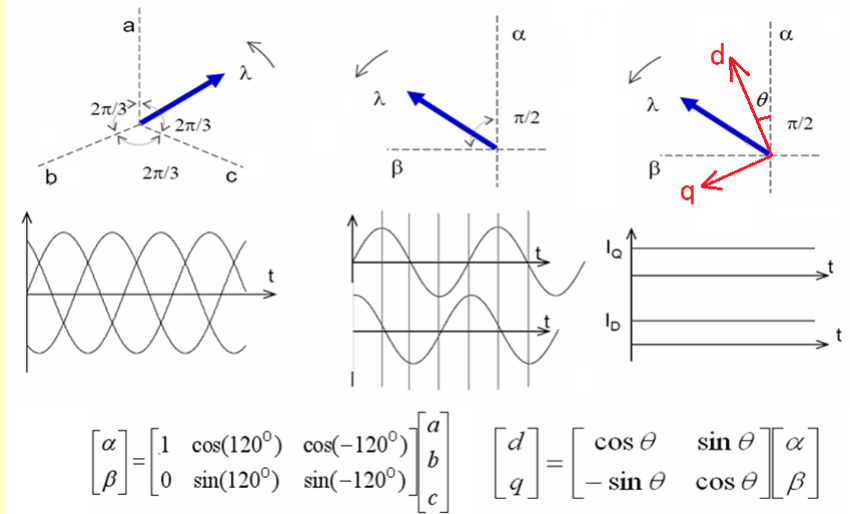


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

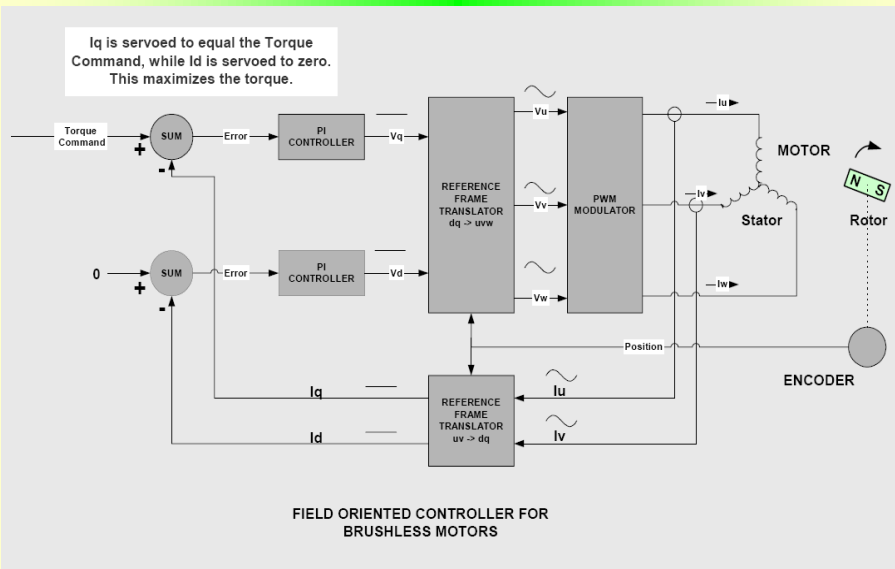


3.2 永磁同步电机矢量控制

永磁同步电机的 ABC-dq 坐标变换



3.2 永磁同步电机矢量控制

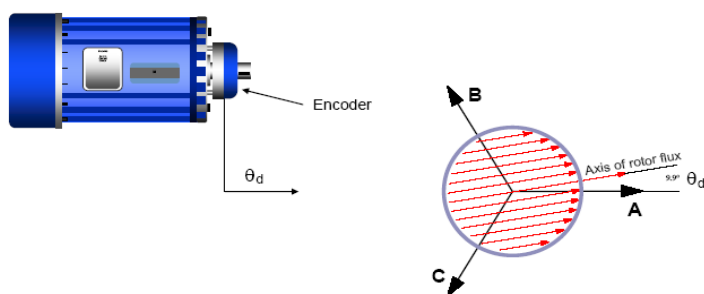


3.2 永磁同步电机矢量控制

矢量控制— 必须配置位置检测元件

Field Orientation...As Easy as 1 2 3

1. Measure the angle of the rotor, and thus the angle of the rotor flux, θ_d



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

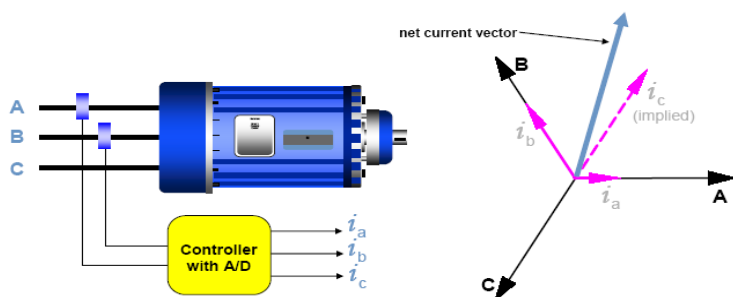


3.2 永磁同步电机矢量控制

矢量控制— 电流的检测

2. Measure i_a and i_b . From Kirckoff's current law, calculate i_c .

A, B, and C axes are "fixed" with respect to the motor housing. This reference frame is also called the "stationary frame" or "stator frame".



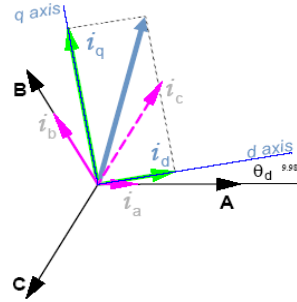
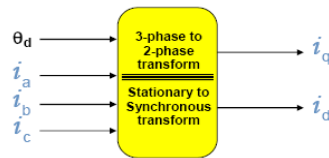
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3.2 永磁同步电机矢量控制

矢量控制—电流ABC-dq坐标的变换

3. Resolve the stator currents into two orthogonal components with respect to the magnetic axis. This is accomplished by performing a “3-phase to 2-phase” transform, followed by a “stationary to synchronous” transform.



$$i_d = \cos(\theta_d)i_a + \cos(\theta_d - 120^\circ)i_b + \cos(\theta_d + 120^\circ)i_c$$

$$i_q = -\sin(\theta_d)i_a - \sin(\theta_d - 120^\circ)i_b - \sin(\theta_d + 120^\circ)i_c$$

The flux reference frame (d axis) rotates with respect to the motor housing. It is called the “rotating axis”, “synchronous axis”, or “field axis”.

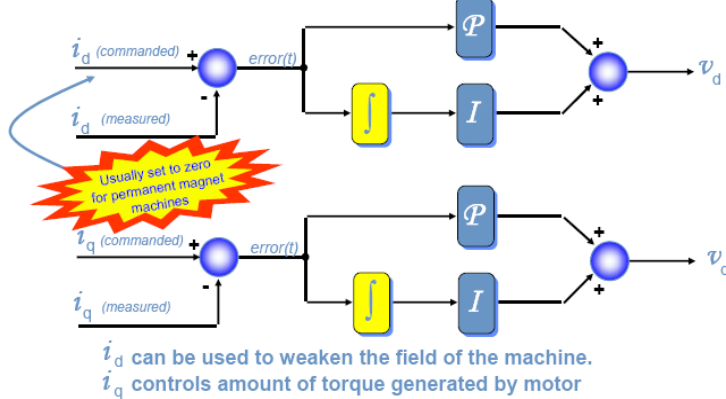
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3.2 永磁同步电机矢量控制

矢量控制—电流调节器的控制

4. Regulate i_d and i_q independently. Since the regulation is performed in the rotating frame, motor AC frequency is not seen by the control loops. Thus, i_d and i_q are regulated as DC quantities!



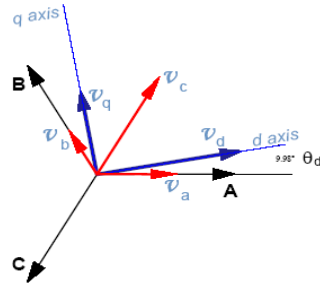
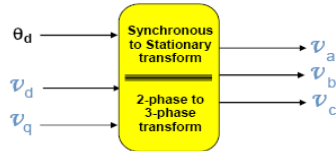
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3.2 永磁同步电机矢量控制

矢量控制—控制电压dq-ABC坐标逆变换

5. Reflect v_d and v_q onto the stationary three phase axis. This is accomplished by performing a "synchronous to stationary" transform, followed by a "2-phase to 3-phase" transform.



$$v_a = \cos(\theta_d)v_d - \sin(\theta_d)v_q$$

$$v_b = \cos(\theta_d - 120^\circ)v_d - \sin(\theta_d - 120^\circ)v_q$$

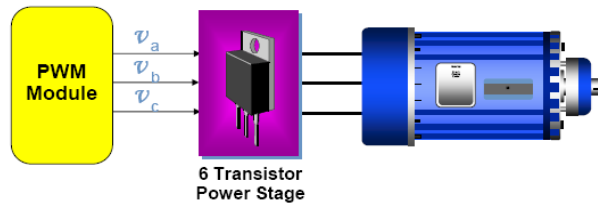
$$v_c = \cos(\theta_d + 120^\circ)v_d - \sin(\theta_d + 120^\circ)v_q$$



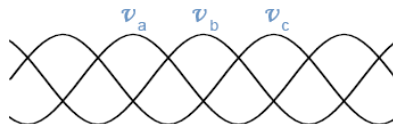
3.2 永磁同步电机矢量控制

矢量控制—ABC坐标下控制电压的放大

6. Apply v_a , v_b , and v_c to the three motor phases.

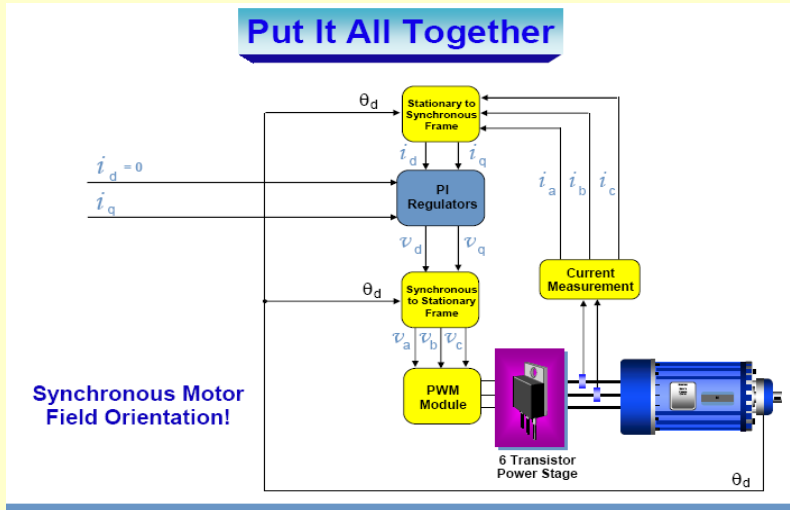


Over time, under steady-state conditions, the three voltages will be sine waves phase shifted by 120° .



3.2 永磁同步电机矢量控制

矢量控制—完整的实现结构图



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3.2 永磁同步电机矢量控制

- 特点:

永磁同步电机的矢量控制，只要能准确地检测出转子d轴的空间位置，控制逆变器使三相定子的合成电流（或磁动势）矢量位于q轴上就可以了，比异步电动机矢量控制系统要简单得多。

矢量控制下的永磁同步电机，定子电流与转子永磁磁通互相独立，控制系统简单，转矩恒定性好，脉动小，可以获得很宽的调速范围，适用于要求高性能的数控机床、机器人等场合。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3.2 永磁同步电机矢量控制

永磁同步电机在 dq 坐标下的模型

电压方程：

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -P_n \Omega \psi_q \\ P_n \Omega \psi_d \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + L_d p & -P_n \Omega L_q \\ P_n \Omega L_d & R + L_q p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ P_n \Omega \psi_f \end{bmatrix}$$

力矩方程：

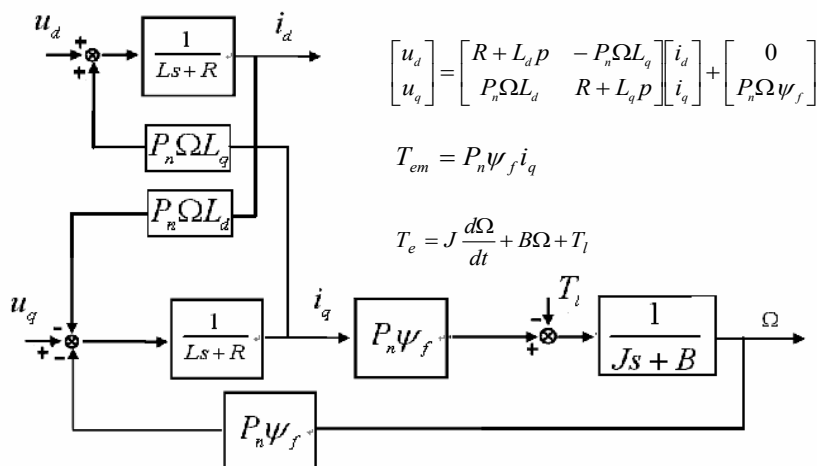
$$\begin{aligned} T_{em} &= P_n (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \\ &= P_n \psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \end{aligned}$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3.2 永磁同步电机矢量控制

永磁同步电机系统的控制模型

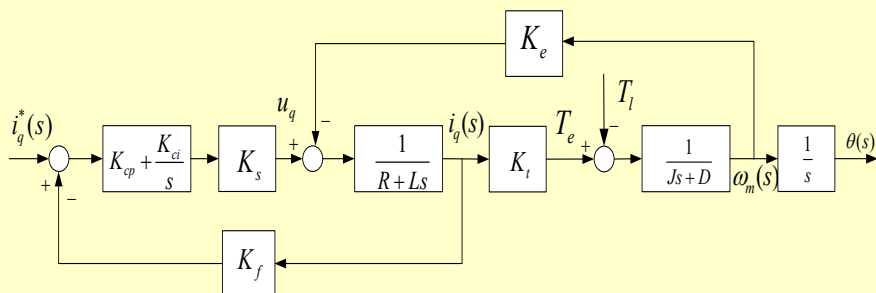


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3.2 永磁同步电机矢量控制

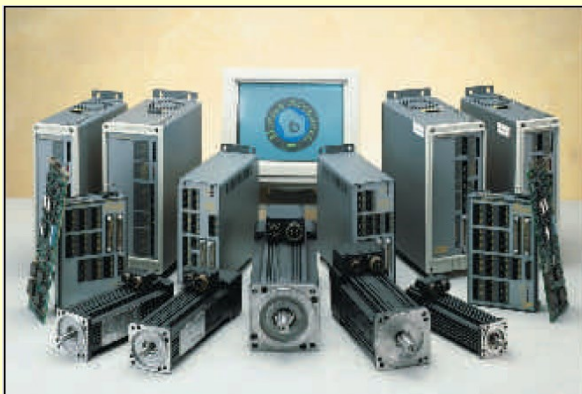
电流负反馈下的永磁同步电机矢量控制框图，一般只需要考虑q轴模型(一般采用 $i_d=0$ 的控制策略)，模型与直流电机系统的电流闭环控制结构一致。永磁同步电机控制模型与特性与直流电机系统相同。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3.3 永磁同步伺服电机系统

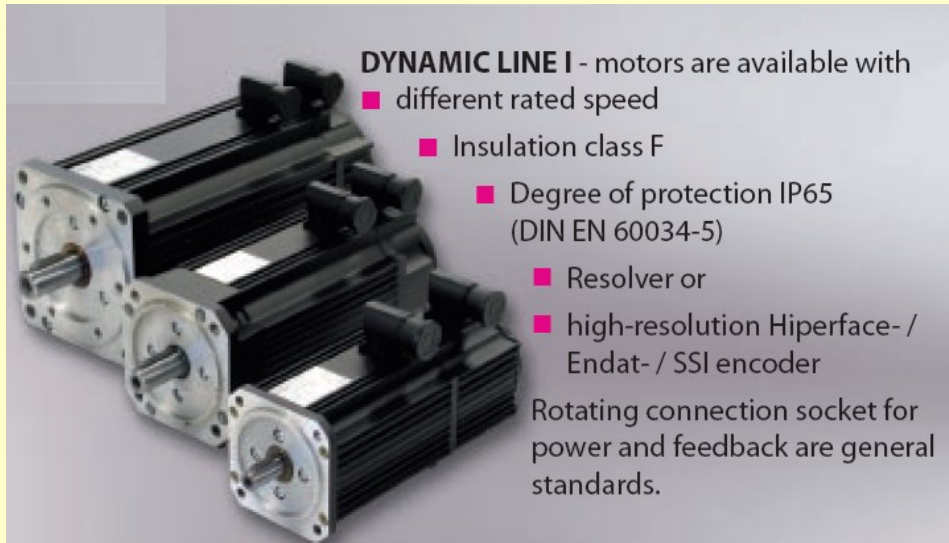


永磁同步伺服电机配套以矢量控制型驱动器，构成永磁同步电机伺服系统，具备完备的控制与保护功能、灵活的接口形式，实现力矩、速度、位置等伺服功能。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3.3 永磁同步伺服电机系统



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3.3 永磁同步伺服电机系统

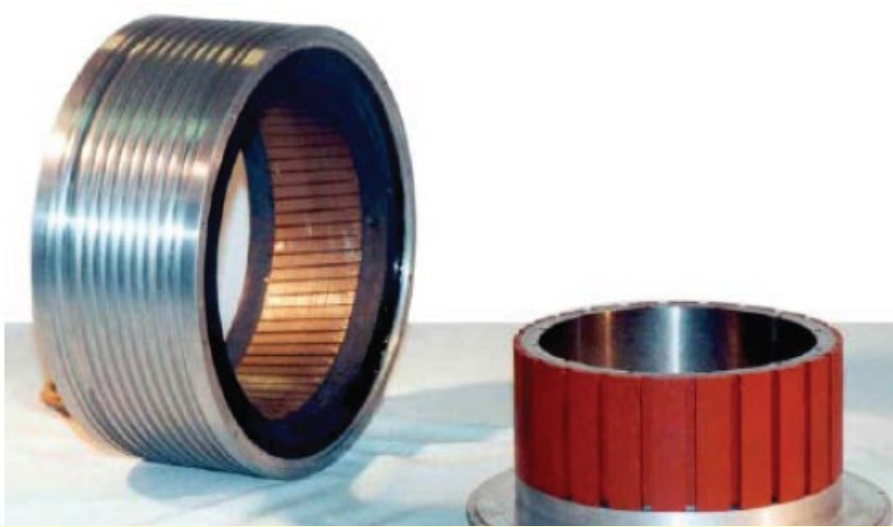
Properties

- thermal winding protection with PTC thermistor 140°C
- Shaft end with keyway
- Vibration severity grade B according to EN 60034-14
- Half-key balancing according to DIN ISO 8821 with keyway
- Flange accuracy of the grade N according to DIN 42955
- Radial groove ball bearing with high temperature resistant special grease and lifetime lubrication
- Rating designed for operating mode S1
- Ambient temperature range of -20 to +40°C
- site altitude 1000m above sea level no derating

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



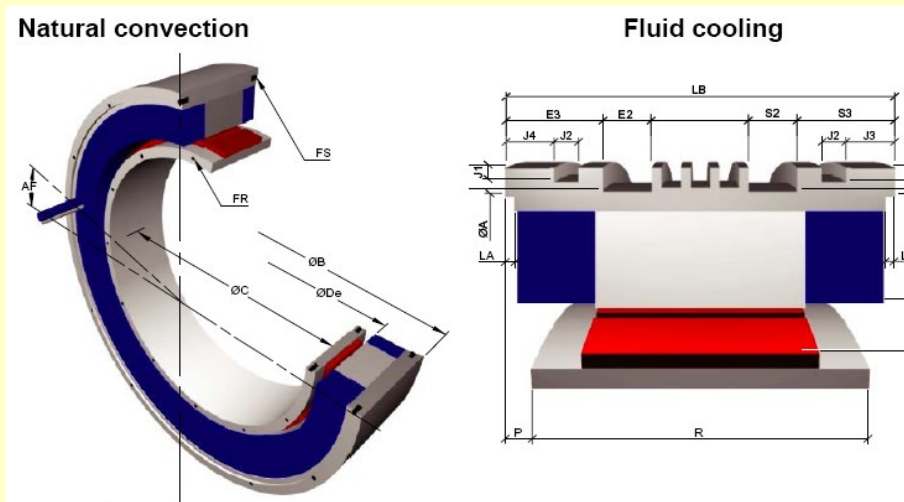
3.3 永磁同步伺服电机系统



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3.3 永磁同步伺服电机系统



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3.3 永磁同步伺服电机系统

400/460VAC Version		145ST2M		145ST4M		145ST6M	
Rated speed	rpm	500	1 500	500	1 500	500	1 500
Continuous torque at stall ⁽⁴⁾	Nm	14.6		26.4		37.3	
Current at continuous torque ⁽¹⁾	A	2.3	5.2	3.7	9.2	5.0	12.7
Peak torque ⁽²⁾⁽³⁾	Nm	55		110		165	
Current at peak torque ⁽²⁾	A	10.2	23.1	17.8	45.5	27.3	68.3
Rated Power ⁽¹⁾	W	735	2 032	1 247	3 134	1 775	3 480
Thermal time constant ⁽¹⁾⁽⁶⁾	s	1 012		1 399		1 667	
Thermal resistance ⁽¹⁾⁽⁶⁾	°C/W	0.394		0.324		0.275	
Resistance (phase-to-phase) at 20°C ⁽²⁾	Ω	22.34	4.42	10.74	1.65	5.99	0.95
Inductance (phase-to-phase) at I continuous	mH	115.53	21.48	77.08	11.78	48.84	7.79
Electrical time constant ⁽²⁾	ms	5.1		7.2		8.2	
Motor Voltage Constant (phase-to-phase)	V/1000rpm	427	189	479	193	501	197
Number of Poles		12					

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3.3 永磁同步伺服电机系统

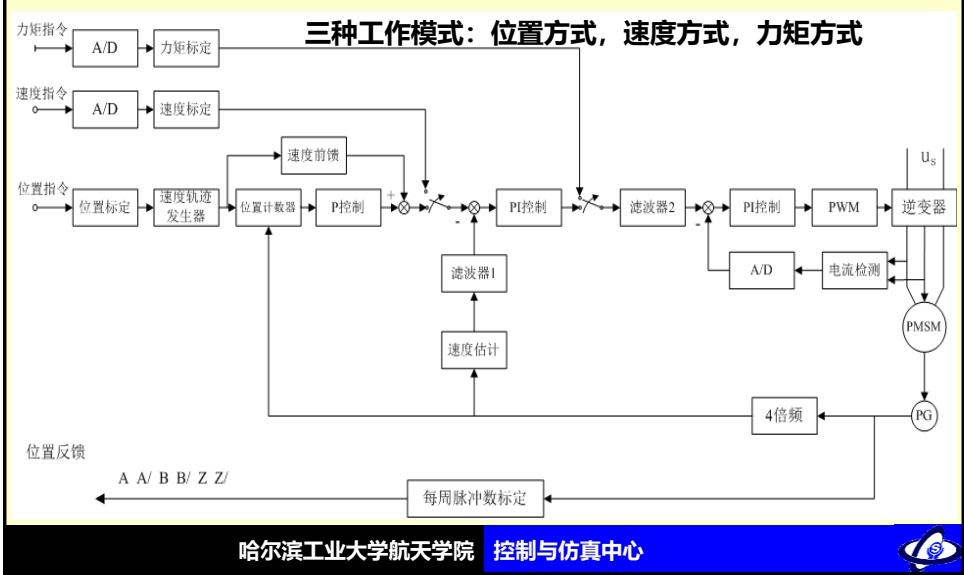
电机类型	交流伺服电机（永磁同步电机）
磁性材料	●超高内禀矫顽力稀土永磁材料
绝缘等级	●F级 环境温度+40℃时，定子绕组温升可达 $\Delta T=100K$ 可选H级、C级绝缘，定子绕组温升分别达125K、145K
反馈系统	●标准型:方波光电编码器（带U、V、W信号） ●备选型: 1.旋转变压器，用于振动、冲击较大的环境； 2.正弦光电编码器，经细分分辨率可达 2^{20} ； 3.绝对式编码器
温度保护	●PTC 正温度系数热敏电阻，20°时 $R\leq 250\Omega$ 备选:热敏开关
安装型式	●IMB5 备选：IMV1、IMV3、IMB35
护保等级	●IP64 备选：IP 65、IP67
冷 却	●自然冷却
表面漆	●灰色无光漆 备选：根据用户需要
轴 承	●双面密封深沟球轴承
径向轴密封	●驱动端装轴密封圈
轴 伸	●标准型：a型 光轴、无键 备选：b型 有键槽、带键、或根据要求定制

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



3.3 永磁同步伺服电机系统

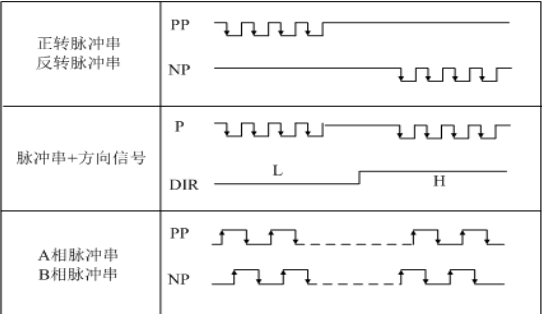
一般通用PMSM驱动器的结构



3.3 永磁同步伺服电机系统

位置方式

- 这种模式下，驱动器接受外部位置指令信号。位置回路、速度回路和力矩回路都在驱动器中执行。
- 位置指令的输入方式主要有三种。与步进电机控制相似，但脉冲频率可更高，以适应高转速。



3.3 永磁同步伺服电机系统

速度方式

- 驱动器内仅执行速度回路和力矩回路的闭环控制。
- 外部控制器一般输入 $\pm 10\text{V}$ 范围内的电压作为速度指令信号。正电压使电机正向旋转，负电压使电机反向旋转，零伏对应零转速。
- 这个速度指令信号在驱动器中经“速度标定”后，由A/D转换器接入驱动器控制器，由驱动器控制器中的控制算法回路实现速度闭环控制量计算。



3.3 永磁同步伺服电机系统

力矩方式

- 驱动器仅实现力矩回路闭环控制。
- 力矩指令信号一般也是输入 $\pm 10\text{V}$ 的电压信号。正电压对应正转矩，负电压对应负转矩，零伏对应零力矩输出。
- 这个信号经力矩标定后送入驱动器控制器，由驱动器控制器中的控制算法回路实现控制量计算。力矩回路一般采用PI控制规律。



永磁交流电机与无刷直流电机的比较

稀土永磁同步电机与永磁无刷直流电机比较：

- 1.结构形式基本相同，绕组略有差异
- 2.转矩脉动大大减小，更适合高精度驱动系统
- 3.控制方式（策略）更加复杂，控制器成更高
- 4.需要任意转子角度的位置传感器，精度高
- 5.功率密度略小
- 6.一种更精密的电机



永磁交流电机与感应电机的比较

优点：

无需励磁电流，损耗大大降低，效率更高；

运行中的高功率因数；

动、静态控制性能更优良；

可实现更大的力矩/质量比和力矩/体积比；

缺点：

电机伺服系统相对复杂，成本高。



小结

- 永磁交流伺服电机分为无刷直流电机(BLDCM)和永磁同步电机(PMSM)两种，前者适于速率伺服领域，后者适于精密力矩、位置伺服运动领域。
- BLDCM的驱动采用调压方式，PMSM驱动控制目前以矢量控制为主流。永磁交流电机系统的控制特性与直流伺服电机系统一致，应用中可采用直流电机模型进行分析和设计。
- 永磁交流电机系统已成为精密伺服驱动的首选。

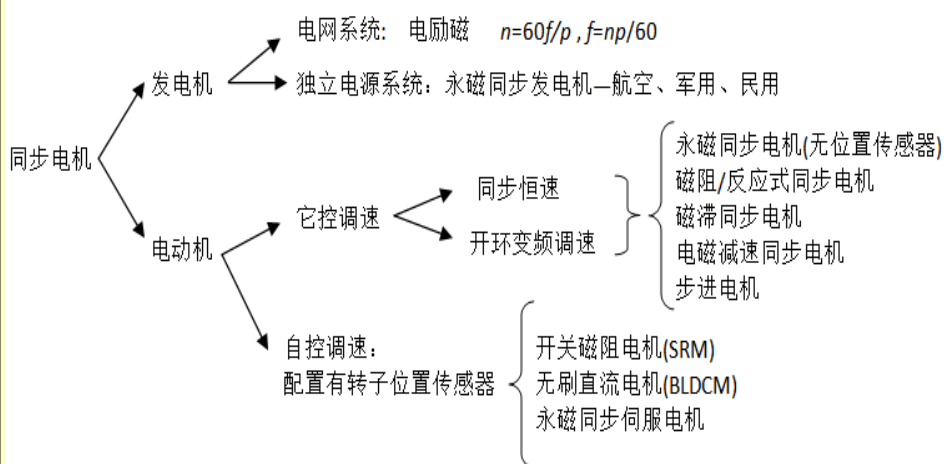


目 录

1. 永磁交流伺服电机概述
2. 无刷直流电动机
3. 永磁同步伺服电机系统
- 4. 同步电机小结**



同步电机小结



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



步进电机与交流伺服电机的比较

一、控制精度不同

两相混合式步进电机步距角一般为 3.6° 、 1.8° ，五相混合式步进电机步距角一般为 0.72° 、 0.36° 。也有一些高性能的步进电机步距角更小。如四通公司生产的一种用于慢走丝机床的步进电机，其步距角为 0.09° ；德国百格拉公司（BERGER LAHR）生产的三相混合式步进电机其步距角可通过拨码开关设置为 1.8° 、 0.9° 、 0.72° 、 0.36° 、 0.18° 、 0.09° 、 0.072° 、 0.036° ，兼容了两相和五相混合式步进电机的步距角。

交流伺服电机的控制精度由电机轴后端的旋转编码器保证。以松下全数字式交流伺服电机为例，对于带标准 2500 线编码器的电机而言，由于驱动器内部采用了四倍频技术，其脉冲当量为 $360^\circ/10000=0.036^\circ$ 。对于带 17 位编码器的电机而言，驱动器每接收 $2^{17}=131072$ 个脉冲电机转一圈，即其脉冲当量为 $360^\circ/131072=9.89$ 秒。是步距角为 1.8° 的步进电机的脉冲当量的 $1/655$ 。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



步进电机与交流伺服电机的比较

二、低频特性不同

步进电机在低速时易出现低频振动现象。振动频率与负载情况和驱动器性能有关，一般认为振动频率为电机空载起跳频率的一半。这种由步进电机的工作原理所决定的低频振动现象对于机器的正常运转非常不利。当步进电机工作在低速时，一般应采用阻尼技术来克服低频振动现象，比如在电机上加阻尼器，或驱动器上采用细分技术等。

交流伺服电机运转非常平稳，即使在低速时也不会出现振动现象。交流伺服系统具有共振抑制功能，可涵盖机械的刚性不足，并且系统内部具有频率解析机能（FFT），可检测出机械的共振点，便于系统调整。

三、矩频特性不同

步进电机的输出力矩随转速升高而下降，且在较高转速时会急剧下降，所以其最高工作转速一般在 300~600RPM。交流伺服电机为恒力矩输出，即在其额定转速（一般为 2000RPM 或 3000RPM）以内，都能输出额定转矩，在额定转速以上为恒功率输出。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



步进电机与交流伺服电机的比较

四、过载能力不同

步进电机一般不具有过载能力。交流伺服电机具有较强的过载能力。以松下交流伺服系统为例，它具有速度过载和转矩过载能力。其最大转矩为额定转矩的三倍，可用于克服惯性负载在启动瞬间的惯性力矩。步进电机因为没有这种过载能力，在选型时为了克服这种惯性力矩，往往需要选取较大转矩的电机，而机器在正常工作期间又不需要那么大的转矩，便出现了力矩浪费的现象。

五、运行性能不同

步进电机的控制为开环控制，启动频率过高或负载过大易出现丢步或堵转的现象，停止时转速过高易出现过冲的现象，所以为保证其控制精度，应处理好升、降速问题。交流伺服驱动系统为闭环控制，驱动器可直接对电机编码器反馈信号进行采样，内部构成位置环和速度环，一般不会出现步进电机的丢步或过冲的现象，控制性能更为可靠。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



步进电机与交流伺服电机的比较

六、速度响应性能不同

步进电机从静止加速到工作转速（一般为每分钟几百转）需要 200~400 毫秒。交流伺服系统的加速性能较好，以松下 MSMA 400W 交流伺服电机为例，从静止加速到其额定转速 3000RPM 仅需几毫秒，可用于要求快速启停的控制场合。

综上所述，交流伺服系统在许多性能方面都优于步进电机。但在一些要求不高的场合也经常用步进电机来做执行电动机。所以，在控制系统的设计过程中要综合考虑控制要求、成本等多方面的因素，选用适当的控制电机。



致 谢

本文档所引用的许多素材，来源于互联网上国内外的课件、科技论文、文章等。本文引用只是为了给学生提供更好的教学素材，非商业目的。对这些所引用素材的原创者，在此表示深深的谢意。

