

一 填空题（每空 1 分，共 36 分）
(1~7 题)

本题分数	36
得 分	

1, 一般来说, 与传统电机相比, 在_____、_____、_____或设计方法上有较大特点的电机都属于特种电机的范畴。

2, 步进电机常用的单极性驱动电路有_____驱动电路、_____驱动电路和_____驱动电路。

3, 三相反应式步进电机的转子小齿数设为 80 个时, 其齿距为_____度, 若其采用三相单三拍控制方式, 则步距角为_____度, 若换成三相双三拍控制, 步距角_____度。

4, 除了反应式步进电机, 步进电机还有_____和_____步进电机两种类型。

5, 除控制器之外, 无刷直流电动机由_____、_____和_____三部分构成。

6, 两对极的无刷直流电机采用二二导通三相六状态控制时, 电机有_____个磁状态, 在每个磁状态下, 转子转过_____度(机械角度)。

7, 无刷直流电动机的电源电压 U_s 和相反电动势幅值 E_m 在满足_____时, 换相转矩脉动为 0。若出现换相过程转矩加大的情况, U_s 和 E_m 二者的关系是: _____。

一 填空题(续)

(8~14 题)

8, 一个 2 对极的无刷直流电机转速 1500rpm, 其电周期为_____。为这个电机设计霍尔位置传感器, 相邻霍尔元件在空间间隔_____度。

9, 无刷直流电动机常用的有 5 种 PWM 调制方式, 采用_____调制方式, 中性点 N (星形中点) 电位不会波动, 也不会出现非导通相续流现象; 但是其功率开关的动态损耗是单斩波方式的_____倍。

10, 四相 8/6 极结构的开关磁阻电动机, 每相通电频率 60Hz, 其转速为: _____。采用光电元件和遮光片作为位置传感器, 需用_____个光电元件; 遮光片槽宽_____度 (机械角)。位置传感器的位置信号可以直接用于 SR 电动机的_____控制。

11, 开关磁阻电动机转子上既无_____也无_____, 定子齿极上绕有_____。

12, 开关磁阻电动机电流斩波通常有三种实现方法 (1) _____, (2) _____和 (3) PWM 斩波调压控制。

13, 直线电机的_____和_____分别对应旋转电动机的定子和转子。

14, 三相直线感应电机的磁场是作直线移动的_____磁场, 若绕组通电频率为 30Hz, 极距 5cm, 该磁场的移动速度为_____。当滑差率为 0.02 时, 该直线电机运动速度为_____。

本题分数	64
得 分	

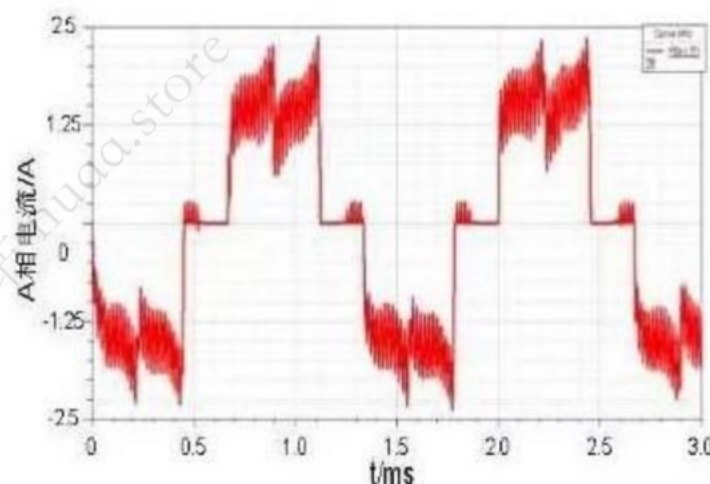
二. 问答题 (共 64 分)

(1~3 题)

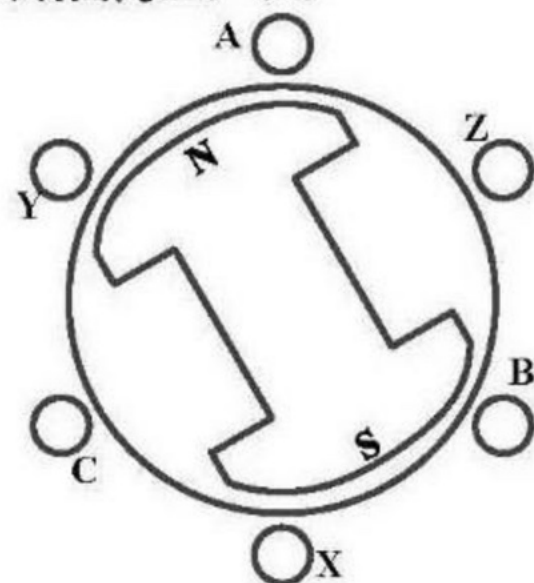
1. 一个反应式五相步进电机, 采用五相十拍控制方式, 步进角 1.5 度 (机械角度), 请问它的转子齿数是多少? 该电机每相通电频率 $f_{\text{相}} = 240\text{Hz}$ 时, 请问它的转速多少? 此时控制脉冲频率多大? 如何进一步提高控制精度? (9)
2. 结合矩角特性曲线说明步进电机静态稳定区和动态稳定区的概念。三相步进电动机采用单双六拍控制方式和三相单三拍控制方式时的稳定裕度分别是多大? (11)
3. 一个采用星形连接三相桥式主电路的无刷直流电机采用三相六状态的控制方式, 其线电动势系数为: $K_e = 0.1 \text{ V} \cdot \text{min/r}$; 当直流电源电压 150V, 每个功率开关管的导通压降为 1V 时, 空载转速多少? 若其额定转速 1400r/min (不斩波), 而相绕组的电阻为 0.25Ω , 请问其额定转矩多大? (忽略换相过程)。(8)

二. 问答题 (4~5 题)

4, 一台三相无刷直流电动机的 A 相电流波形如下图所示, 请结合电路图说明该电机采用了哪种 PWM 方式? (8)

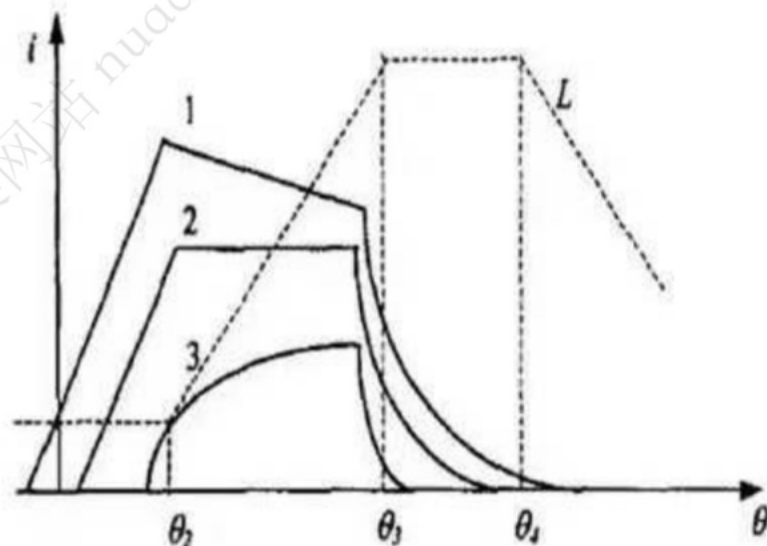


5, 一台无刷直流电机转子处于初始位置时, 如下图所示。若要求采用二二导通方式, 当电机顺时针旋转时 (正转) 其各相电流流向应如何? 若电机需要逆时针旋转相电流流向又如何? 列表总结正、反转的通电逻辑顺序 (以流入纸面为正) (7)



二. 问答题 (6~8 题)

6, 结合开关磁阻电机的线性模型, 推导下图 3 条电流波形曲线的发生条件。(7) (电源电压 U_s , $K = (L_{\max} - L_{\min})/(\theta_3 - \theta_2)$)



不同开通角下电流波形

7, 为什么开关磁阻电机在电流值小的情况下电磁转矩与电流平方成正比, 而在电流较大时, 电磁转矩与电流的一次方成正比? 请用准线性模型进行说明。(7)

8, 画出四相开关磁阻电动机的 H 桥型主电路, 结合两相斩波方式说明其工作原理与特点。(7)

一. 填空题

1. 工作原理, 结构, 性能
2. 单电压功率, 高低压, 斩波恒流
3. 4.5, 1.5, 1.5
4. 永磁式, 感应子式
5. 逆变器, 电机本体, 位置检测器
6. 6, 30
7. $U_s = 4E_m$, $U_s > 4E_m$

一、填空题

8. 2ms , 120° 电角度 (60° 机械角)

9. H-pwm - L-pwm , 2

10. 600rpm , 2 , 30 , 定角度斩波

11. 绕组, 永磁体, 集中绕组

12. 限制电流上下幅值, 电流上限和关断时间恒定

13. 初级, 次级

14. 行波, 3m/s , 2.94m/s

二、问答题

1. (1) 由于步距角 $\theta_b = \frac{360^\circ}{N Z_r}$

因此 $Z_r = \frac{360^\circ}{N \theta_b} = \frac{360^\circ}{10 \times 1.5^\circ} = 24$ 个

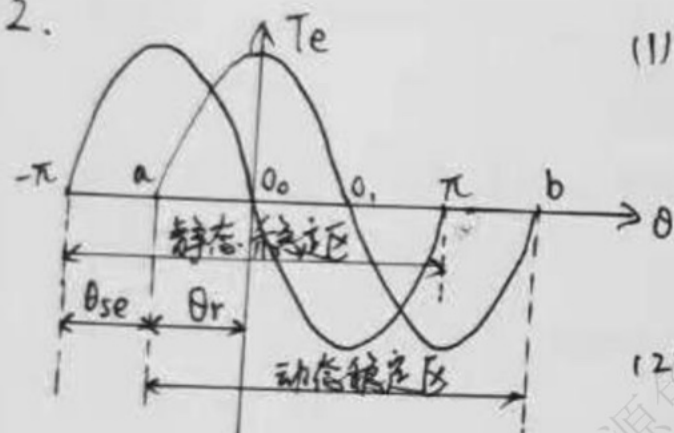
(2) $f = f_p N = 240 \times 10 = 2400 \text{ Hz}$

$n = \frac{\theta_b}{6^\circ} f = \frac{1.5^\circ}{6^\circ} \times 2400 = 600 \text{ rpm}$

(3) 控制脉冲频率 $f = f_p \cdot N = 2400 \text{ Hz}$

可以采用角度细分控制, 把步距角减小, 将原来的一步分为若干步, 可以大大提高对执行机构的控制精度, 同时可以减小或消除振荡, 降低噪声, 并抑制转矩脉动。

2.



(1) 静态稳定区: 当转子静止时, 若转子上无任何强制作用, 则稳定平衡点为原点 O_0 , 当受外力转子位置离开原点, 只要失调角在 $-\pi < \theta_e < \pi$ 内, 当外力消失后, 转子均能回到平衡点, 而在 $\theta_e < -\pi$ 或 $\theta_e > \pi$ 时则不行, 因此 $-\pi < \theta_e < \pi$ 为静态稳定区

(2) 换相后新的平衡点为 O_1 , 且其静态稳定区为 $-\pi + \theta_{se} < \theta_e < \pi + \theta_{se}$ 在换相瞬间, 转子位置只要在这范围内, 就能趋向新平衡点, 因此称为动态稳定区

(3) 稳定裕度 $\theta_r = \pi - \theta_{se} = \pi - \frac{2\pi}{mCZ_r} = \frac{\pi}{mC} (mC - 2)$

三相双六拍 $m=3, C=2$ 因此 $\theta_r = \frac{2}{3}\pi = 120^\circ$

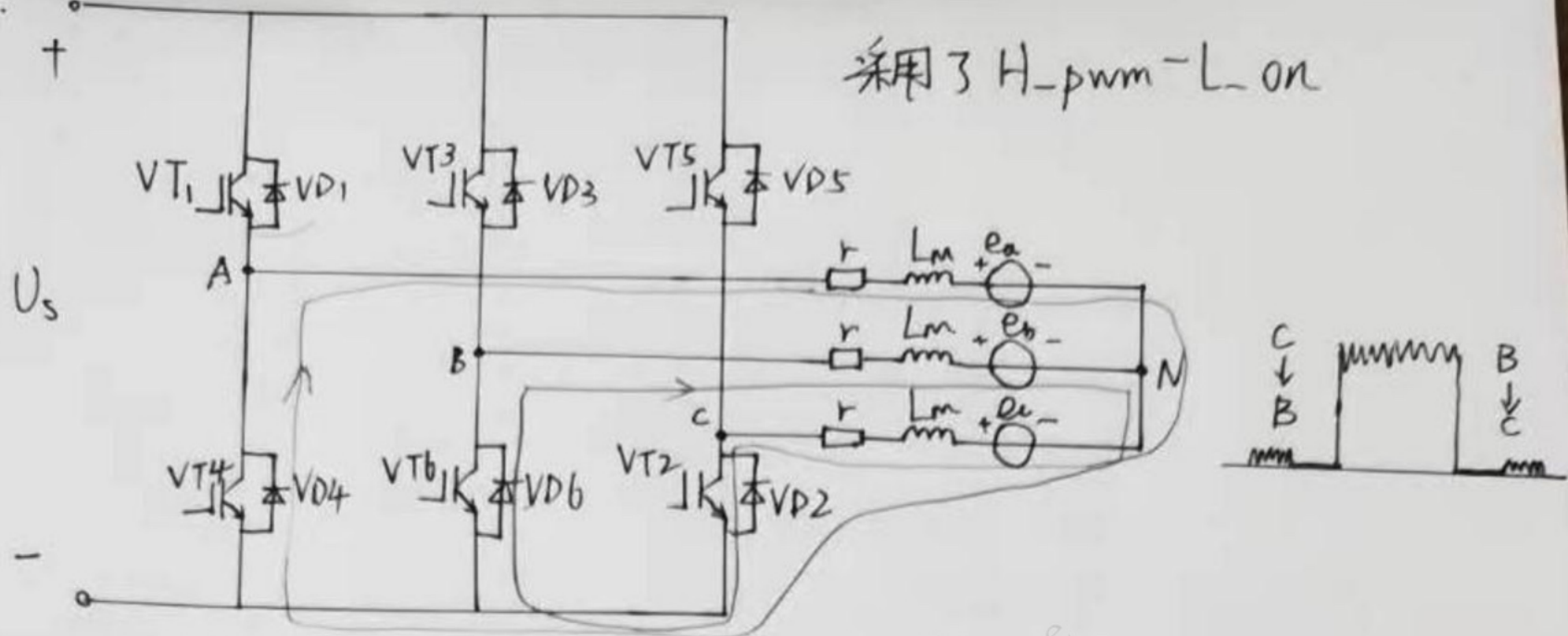
三相单三拍 $m=3, C=1$ 因此 $\theta_r = \frac{\pi}{3} = 60^\circ$

3. (1) 空载转速 $n_0 = \frac{U_s - 2U_r}{K_e} = \frac{150 - 2}{0.1} = 1480 \text{ rpm}$

(2) $I_a = \frac{U_s - 2U_r - K_e n}{2r} = 16 \text{ A}$

$T_e = \frac{2E_m I_a}{\pi} = \frac{E I_a}{\pi} = \frac{K_e n I_a}{2\pi n / 60} = \frac{0.1 \times 16}{2\pi / 60} = 15.28 \text{ N}\cdot\text{m}$

4. 二、问答题



当A相为非导通相时，以B相→C相为例，且\$VT_3\$管进行PWM，当\$VT_3\$关断，电流经\$VT_2\$和\$VD_6\$续流，此时\$U_B = U_C = 0\$，中点\$U_N = \frac{U_B + U_C}{2} = \frac{e_b + e_c}{2} = 0\$，而\$U_a = e_a + U_N = e_a\$，因此当\$e_a < 0\$时，\$VD_4\$管导通将\$U_A\$钳位在0，在非导通相A中产生正向续流。\$e_a\$呈梯形波，在前30°为正，后30°为负，故在后30°产生正向续流。当C相→B相时情况类似，\$VT_5\$关断使电流经\$VD_2\$续流，此时\$U_N = 0\$，\$U_a = e_a\$，当\$e_a < 0\$，即前30°区间产生正向续流，而后30°无正向续流。因此该电路为H-pwm-L-on

5.



顺时针正转时 A相电流为-，B相电流为+，导通相 B→A

导通相	\overline{BA}	\overline{CA}	\overline{CB}	\overline{AB}	\overline{AC}	\overline{BC}
导通管子	VT_3, VT_4	VT_5, VT_4	VT_5, VT_6	VT_1, VT_6	VT_1, VT_2	VT_3, VT_2



逆时针反转时 A相电流为+，B相电流为-，导通相 A→B

导通相	\overline{AB}	\overline{CB}	\overline{CA}	\overline{BA}	\overline{BC}	\overline{AC}
导通管子	VT_1, VT_6	VT_5, VT_6	VT_5, VT_4	VT_3, VT_4	VT_3, VT_2	VT_1, VT_2

6. 在 $\theta_2 \leq \theta \leq \theta_{off}$ 区域内, $L = L_{min} + K(\theta - \theta_2)$

$$\begin{aligned} \text{电压方程 } \frac{U_s}{j\omega} &= L \frac{di}{d\theta} + i \frac{dL}{d\theta} = [L_{min} + K(\theta - \theta_2)] \frac{di}{d\theta} + iK \\ &= (L_{min} - K\theta_2) \frac{di}{d\theta} + K\theta \frac{di}{d\theta} + iK \\ &= (L_{min} - K\theta_2) \frac{di}{d\theta} + \frac{d(K\theta i)}{d\theta} \end{aligned}$$

$$\text{对 } \theta \text{ 积分} \Rightarrow \frac{U_s}{j\omega} \theta + C = [L_{min} + K(\theta - \theta_2)] i$$

代入 $i(\theta_2) = U_s(\theta_2 - \theta_{on}) / (j\omega L_{min})$ 的初始条件得 $C = -U_s \theta_{on} / j\omega$

$$\text{得 } i(\theta) = \frac{U_s(\theta - \theta_{on})}{j\omega [L_{min} + K(\theta - \theta_2)]} \quad \text{及 } \frac{di}{d\theta} = \frac{U_s}{j\omega} \cdot \frac{L_{min} + K(\theta - \theta_{on})}{[L_{min} + K(\theta - \theta_2)]^2}$$

当 $\theta_{on} < \theta_2 - L_{min}/K$ 时 $\frac{di}{d\theta} < 0$, 如曲线 1, 电流下降
 当 $\theta_{on} = \theta_2 - L_{min}/K$ 时 $\frac{di}{d\theta} = 0$, 如曲线 2 电流不变
 当 $\theta_{on} > \theta_2 - L_{min}/K$ 时 $\frac{di}{d\theta} > 0$, 如曲线 3, 电流上升

7. 在电流值较小时为线性, 由于 $W_m = W_m' = \frac{1}{2} i \psi = \frac{1}{2} L i^2$

$$\text{从而 } T_e = \frac{\partial W_m'}{\partial \theta} \Big|_{i=\text{const}} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta}$$

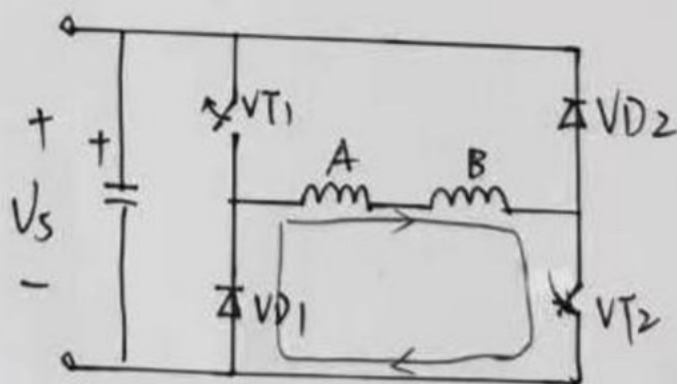
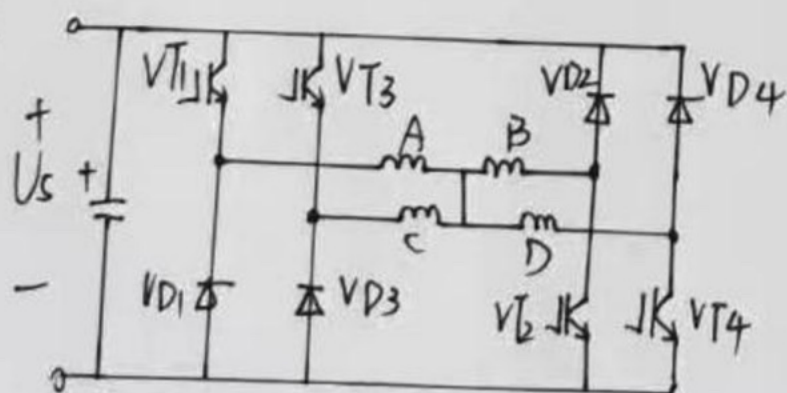
因此在电感变化区内 $T_e \propto i^2$

电流较大时进入饱和区, 用准线性模型分析, 饱和段视为与 $\theta=0$ 处的磁化曲线平行, 斜率为 L_{min} . 非饱和区斜率为电感不饱和值

$$\text{对于 } \theta_2 < \theta < \theta_3, \quad W_c(i, \theta) = \int \psi di = \int L_{min} i + K(\theta - \theta_2) i \, di$$

$$T_e = \frac{\partial W_c(i, \theta)}{\partial \theta} = \begin{cases} \frac{1}{2} K i, & i < i_s \\ K i, & i \geq i_s \end{cases} \quad \text{因此电流大时 } T_e \propto i$$

8.



两相斩波: 在一个导通区间内 仅对上桥 VT_1 和 VT_3 斩波, 另一桥臂开通,

以 A、B 相为例, VT_1 关断, VT_2 导通, AB 相电流通过 VD_1 续流, 当 VT_2 和 VT_1 均导通时, 电源对 AB 相供电

特点: 续流期间绕组两端电压近似为 0, 电源下降缓慢, 无能量回馈至电源