

附上一个好链接：各种电机的动画和原理都有，拒绝死记硬背

<https://www.pengky.cn/dianjixilie022/7-kjdh-jiaoliujijiegou/kjdh-jiaoliujijiegou.html>

第一章

电机的结构及常用定律

● 常用物理量

电流 I ：导体中的自由电荷在电场力的作用下做有规则的定向运动就形成了电流

电压 V ：衡量单位电荷在静电场中由于电势不同所产生的能量差的物理量

磁通量 Φ ：标量，磁感线穿过的平面的投影面积与磁感应强度的乘积

磁极：磁体上磁性最强的地方

磁感线：磁感线是闭合曲线，外磁感线都是从 N 极指向 S 极，磁体内磁感线从 S 极指向 N 极

电动势 E ：电子运动的趋势，能够克服导体电阻对电流的阻力，使电荷在闭合的导体回路中

流动的一种作用

电阻 R ：导体对电流的阻碍作用

磁感应强度 B ：矢量，磁感应强度是指描述磁场强弱和方向的物理量

感应电动势：在电磁感应现象中产生的电动势叫做感应电动势

感应电流：闭合回路在原磁场内产生的磁场阻碍原磁场磁通量发生变化的电流叫做感应电流

磁场强度 H ：只与产生磁场的电流以及这些电流分布有关

磁导率 μ ：表示媒介质导磁性能好坏

● 常用定律

电磁感应定律：又称法拉第电磁感应定律，因磁通量变化产生感应电动势的现象

电流磁效应：通电导线附近产生环绕磁场，电流越大，磁场越强

安培环路定律：稳恒磁场中，沿任何一条闭合回线 L ，磁场强度的线积分等于闭合回线所包

围电流的代数和

左手定则：判断通电导体在磁场中受力方向

右手定则：判断电场磁场方向

右手螺旋定则：判断磁场或电流绕转方向

● 直流电机结构

定子：定子铁心（产生励磁磁场）

励磁绕组（产生主磁通）

机壳（起支撑作用，作为部分磁路）

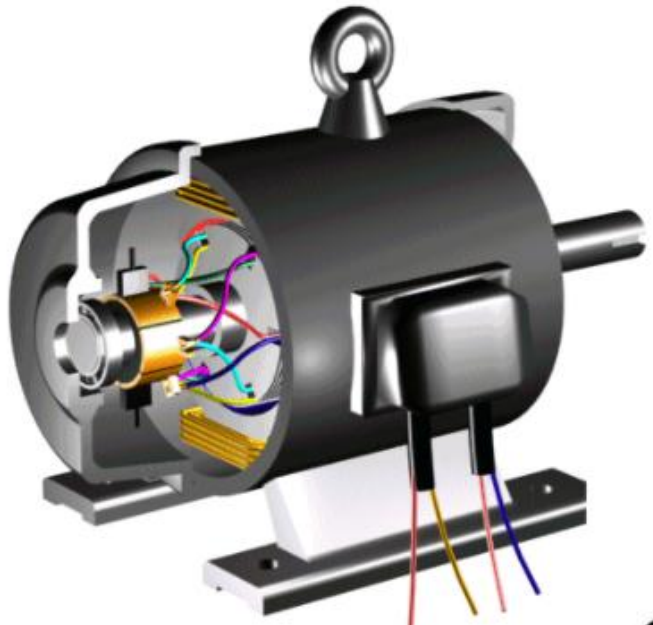
端盖（保护内部结构）

电刷（引入或引出直流电）

转子：电枢绕组， 电枢铁芯（产生电动势， 流过电流， 产生电磁转矩）

换向器

转轴



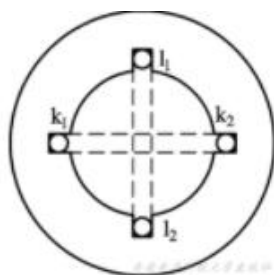
***电刷和换向器是直流电机特有的吗？为什么？**

是；换向器的作用是接通电流并转换电流的方向（保证电流方向），电刷的作用是电机（除鼠笼式电动机外）传导电流的滑动接触体（将直流电流接通至转子）。在直流电机中，它还担负着对电枢绕组中感应的交变电动势，进行换向（整流）的任务。

● **异步交流伺服电动机结构**

实质：两相异步电动机

定子：两相绕组互成 90°



转子：

1) 鼠笼型转子：无换向器以及移动部件，结构简单，性能可靠，转速-
转矩特性难以改

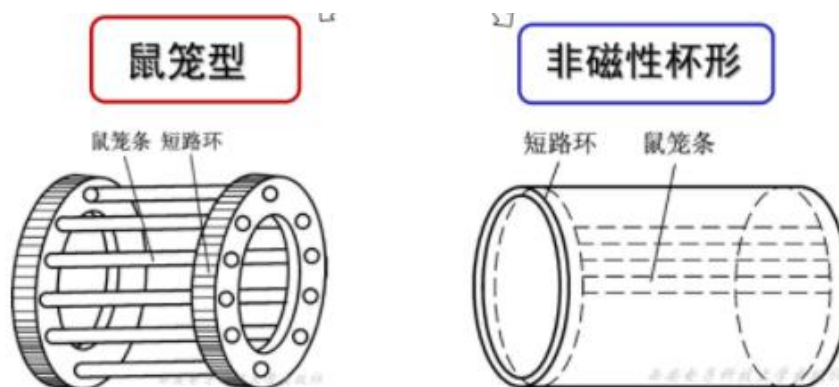
变，只能通过改变电源频率来提高或降低

转速

2) 绕线型转子：又称滑环电动机，通过感应接收电流，而不是通过外
部电源，线圈通

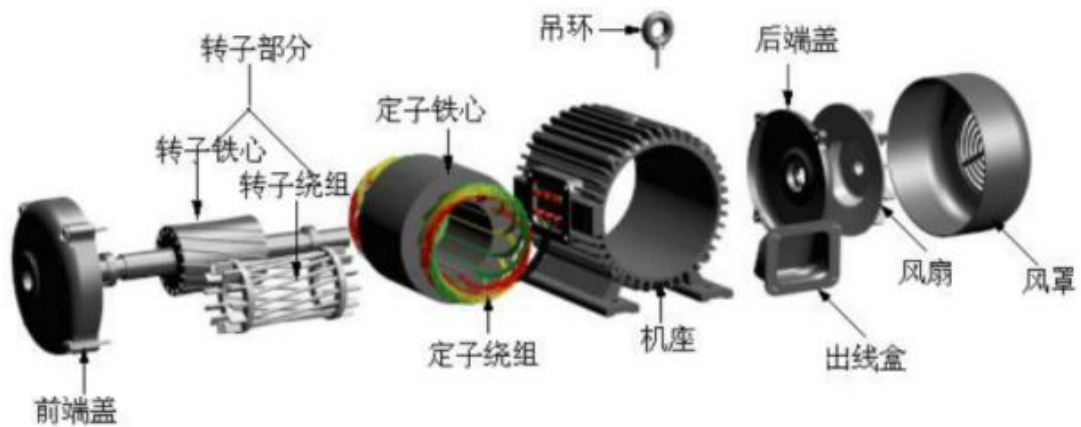
过滑环连接到一个可变电阻

异步电动机常用的为鼠笼型转子，鼠笼型转子属于应用时间**最长**的转子；



图右边为杯型转子，属于鼠笼型转子的一种特殊形式，可以看作导条很多，紧靠
一起的鼠笼型转子

短路环的作用：位于转子两端，其作用是短路转子线圈使其线圈中的感应电动势
闭合产生电流（为转子提供电流通路），电流形成磁场与定子旋转磁场相互作用，带
动转子；



● 永磁交流伺服电动机结构

与异步电动机大致相同，唯一的区别在于转子的结构

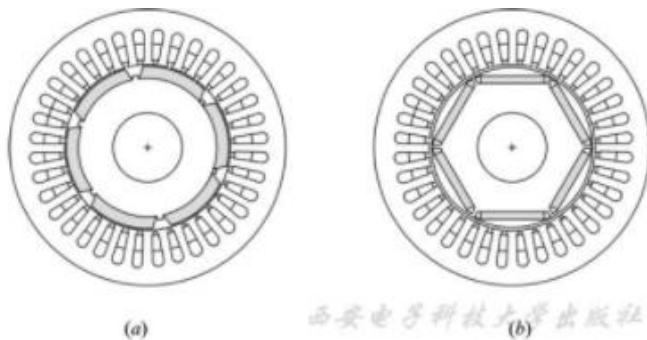


图9—2 永磁交流伺服电动机本体结构

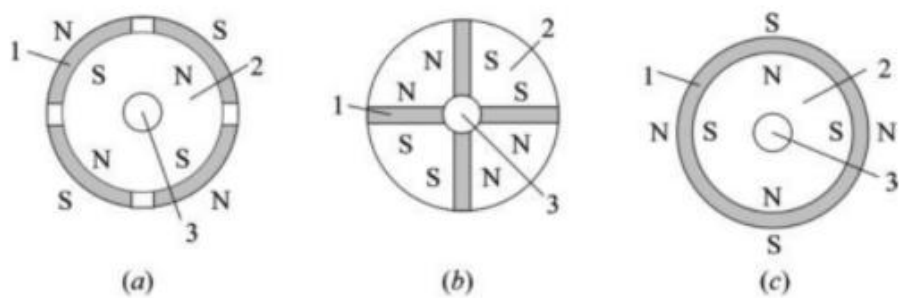
(a) 表贴式；(b) 内置式

表贴式：为径向充磁

内置式：为平行充磁

● 无刷直流电机结构

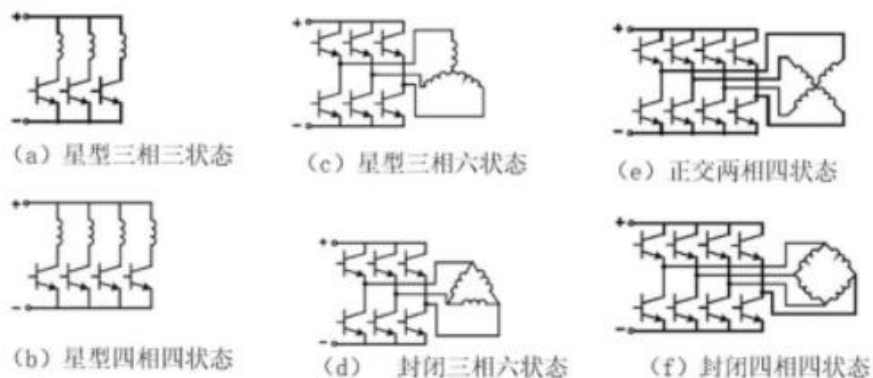
转子：分为内转子，外转子



1—永磁体；2—转子铁心；3—转轴

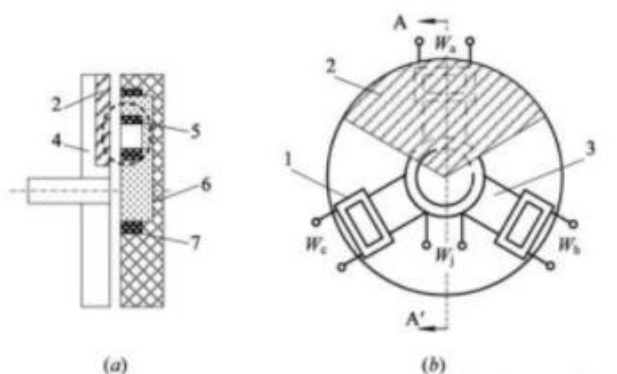
图10-3 无刷直流电动机内转子结构型式
(a) 面贴式；(b) 内嵌式；(c) 整体粘结式

定子：电动机的电枢，



此外，还有位置传感器，检测转子磁场相对于定子绕组的位置；

1) 电磁式传感器：利用电磁感应原理



2) 光电式位置传感器：利用光电效应，由固定在定子上的数个光电耦合开关和

固定在转子

轴上的遮光盘组成，性能稳定，输出

直流信号无需整流

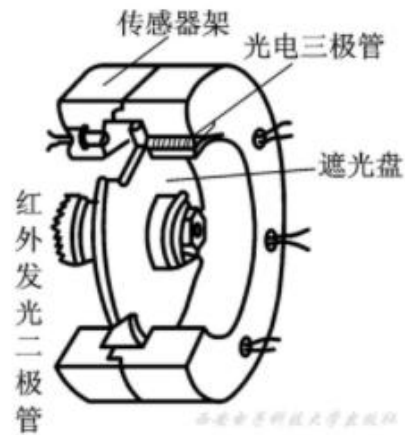
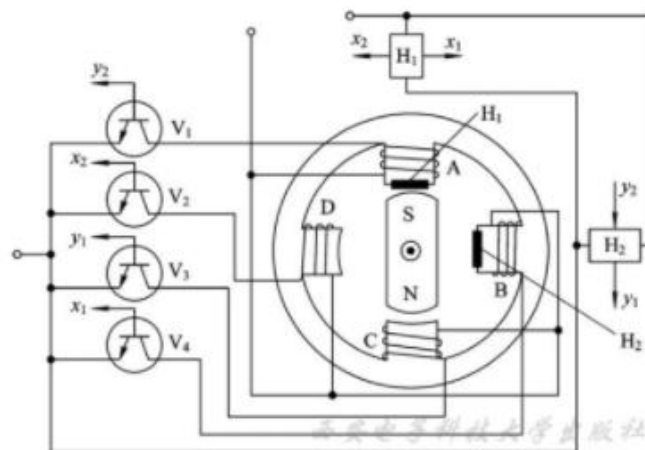


图 10 - 6 光电式位置传感器

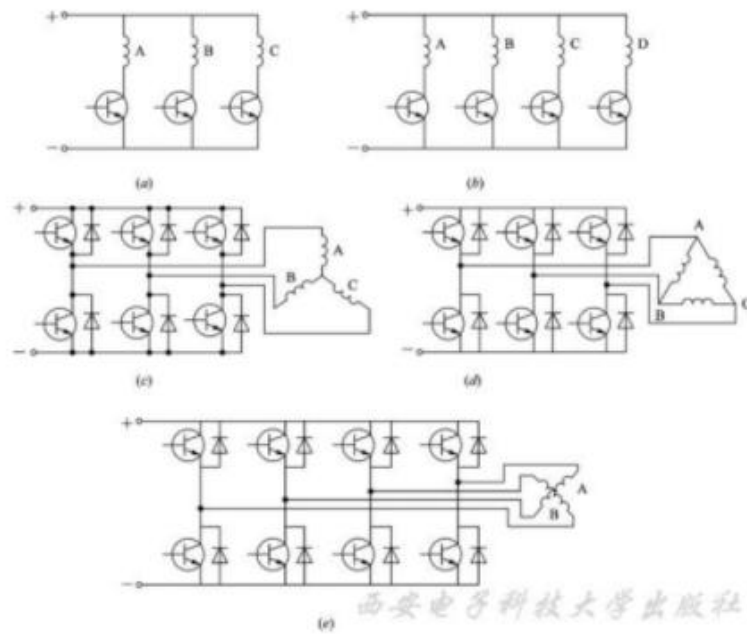
3) 霍尔元件式位置传感器：利用半导体材料的霍尔效应产生输出电压的，实际
上是其电参

数按一定规律随周围磁场变化

的半导体磁敏元件



功率电子开关电路：分为桥式和半桥式，其工作频率由转子转速决定



一般来说相数越多，转矩脉动越小，成本也越高，在相数相同的情况下，桥式会比半桥

式转矩脉动小，绕组利用率高；

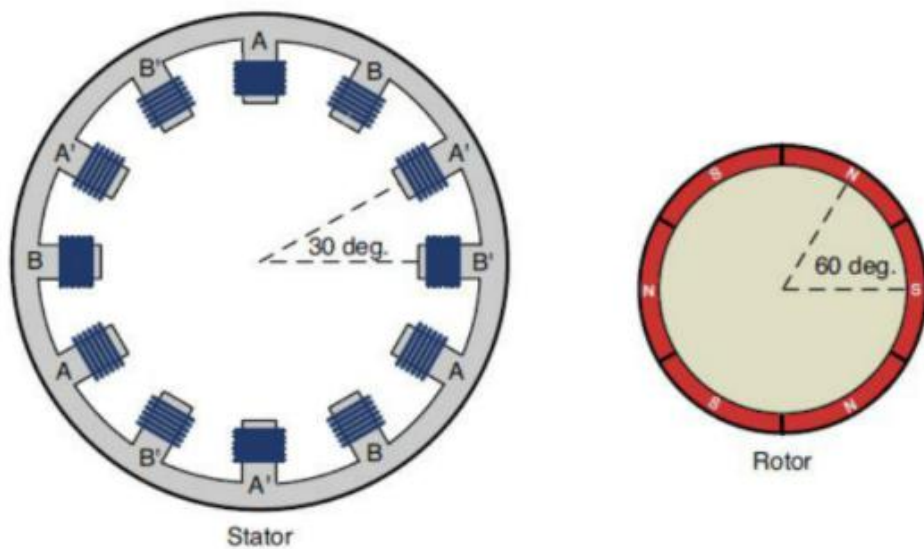
控制器：是无刷直流电动机正常运行并实现各种调速伺服功能的指挥中心

- 1) 正反转以及停车控制
- 2) 根据给定负载大小调节电流或扭矩，实现开环闭环控制
- 3) 实现短路，过流，过电压，欠电压等故障检测和保护

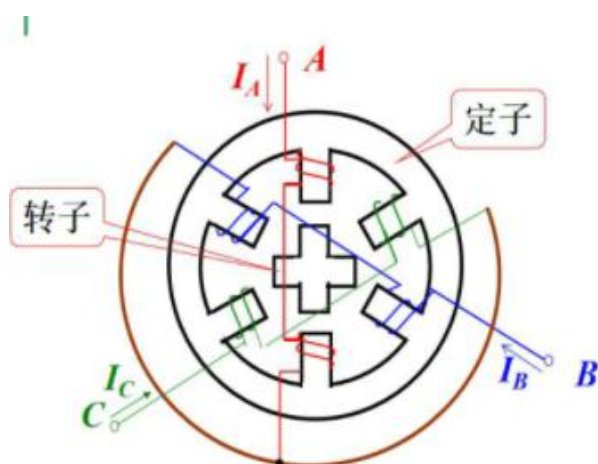
● 步进电机结构

步进电机有：反应式（磁阻式），永磁式与混合式

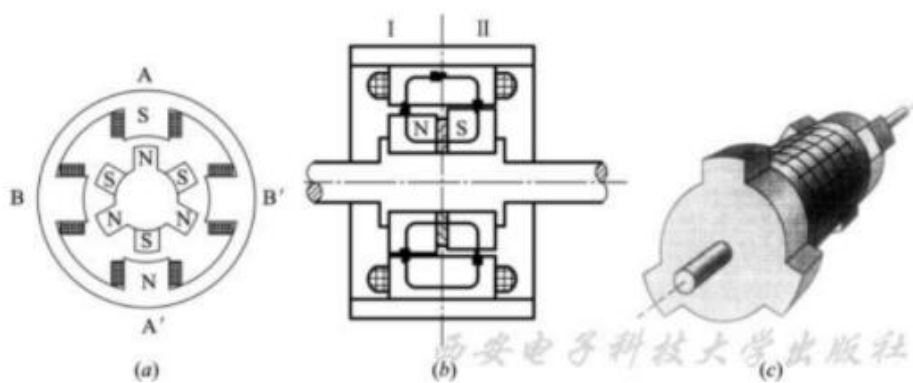
永磁式步进电机与内转子 BLDC 相比，有更多的转子磁铁和绕组



本章研究的使反应式步进电机和混合式步进电机



反应式步进电机结构



混合式步进电机结构

第二章

● 直流测速发电机的工作原理及结构

1.工作原理:

输入机械的机械转速信号变换为电压信号输出，输出的电压信号与转速信号成正比；

通过**换向器**的作用，无论线圈转到什么位置，电刷通过换向片只与处于**一定极性**下的导

体相连接，处在一定极性下的导体电势方向不会改变，因而**电刷两端的电势极性不变**，

一句话：**换向器是机械整流器！输出为直流电动势**

2.电磁式:

他励式：单独励磁，励磁特性好；缺点：需要两个直流电源

并励式：同一电源供电，励磁绕组与电磁绕组并联（最常用）

串励式：同一电源供电，励磁绕组与电磁绕组串联

复励式：同一电源供电，既有并联也有串联

3.永磁式：永磁铁贴在机壳上，中小功率常用

4.自控系统对直流测速发电机的要求:

- 1.输出电压与输出转速成正比，且相对稳定
- 2.转速为 0 时，输出电压要小
- 3.输出电压的极性或相位能反应被测对象的转向
- 4.转动惯量小，以保证反应迅速

5.灵敏度高，输出电压对转速灵敏，输出特性曲线斜率大

***为什么直流发电机的定子是静止的？**

因为要想产生感应电动势，则需要转子作切割磁感线运动，定子为转子提供磁场，若定子

不是静止的，则磁场方向不确定，不能确保时刻产生感应电动势，无法产生感应电流

***直流电机中，励磁绕组的电流是？**

直流

***直流电机的磁极铁芯是否可以采用整块铁芯，为什么？**

整块的铁芯在通电线圈中由于受电流所产生的变化磁场的作用，在整块铁芯内部产生了感

应电流，这种电流以磁通的轴线为中心呈涡流旋形态，故称涡流。在磁极铁芯中，由于涡

流的存在，会使铁芯发热，温度升高，造成电能损耗，为了减少涡流损耗，可以用许多硅

钢片薄片叠成铁芯，片间有绝缘物质隔开，同时，硅钢片有少量的硅，来增加铁芯涡流的

电阻，以减少涡流，从而减少电能损耗。

● **直流测速发电机的特性及电路分析**

直流电动势：

$$E_a = \frac{pN}{60a} \Phi n$$

其中可以记常数 C_e 为

$$E_a = C_e \Phi n$$

电势系数 K_e 记为

$$K_e = C_e \Phi$$

则 E_a 可表示为电枢电动势，当磁通 Φ 为常数时，电机的转速和输出电势呈正比！

$$E_a = K_e n$$

电路分析：

负载时测速发电机的输出电压等于感应电势减去它的内阻压降

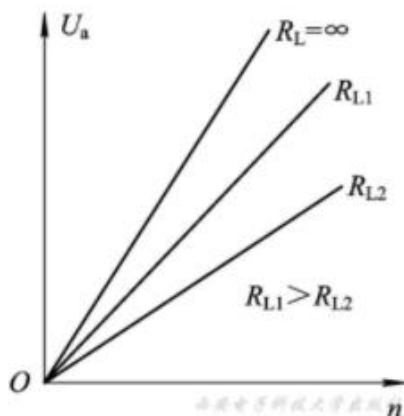
$$U_a = E_a - \frac{U_a}{R_L} R_a$$

在直流发电机中 $E_a > U$

$$U_a = \frac{E}{1 + \frac{R_a}{R_L}} = \frac{C_e \Phi}{1 + \frac{R_a}{R_L}} n$$

只要保持式子中的 R_a 和 R_L 以及 Φ 为常数，即电机转速和输出电势 U_a 即为线性

的



工作过程：

- (1) 电磁转矩和转速一定是反向
- (2) 电势一定大于输出电压
- (3) 转矩 T_1 一定大于 T_{em}



电磁转矩：在直流发电机中，是一个制动转矩！！

$$T_{em} = C_T \Phi I_a$$

记原动机输入转矩为驱动转矩 T_1 ，机械摩擦及磁铁引起的空载转矩为 T_0 ；

易得： **$T_1 = T_0 + T_{em}$**

功率平衡方程：

电磁功率

励磁损耗

最重要的

$$P_{em} = P_{cu} + P_2$$

输出功率

输入功率

$$P_{em} = P_1 - P_0 = T_{em} \Omega = E_a I_a$$

铁耗

直流发电机转子旋转时克服制动性质的电磁转矩所消耗的机械功率 $T_{em}\Omega$ 转化为等量的电枢回路中的电功率 $E_a I_a$

关于空载损耗：

转子转起来才有空载损耗

- 1) 铁损耗
- 2) 附加损耗
- 3) 机械摩擦损耗

三大方程：

电压方程 $E_a = U + I_a R_a$

转矩方程 $T_1 = T_{em} + T_0$

功率方程 $P_{em} = P_{cu} + P_2$

● 直流测速发电机习题

***为什么直流电机会有铁耗？**

铁磁材料加上交变磁场就会产生磁滞损耗和涡流损耗，合称铁耗，有**交变磁场**是产生铁耗

的必要条件，直流电机的转子在固定的磁场中转动，相当于在交变磁场中，因此存在铁耗

***铁耗存在于哪里，定子还是转子？**

都有；直流电机稳定工作时定子磁场恒定不变，转子电枢绕组产生的磁场也是恒定的，且与定子磁场没有相对运动。但是转子铁心在转动时，时刻切割着这个恒定的磁场，因此转子铁心也会产生涡流损耗和磁滞损耗，也就是说存在着铁耗。此外，负载变化或者转速变化，以及起动与停止过程中，电机的磁场也是变化的。此时定子铁心也会有些铁耗

计算题：

2-1：一台25kW、125V的他励直流电机，以恒定转速3000r/min运行，并具有恒定励磁电流，开路电枢(感应电动势)为125V，电枢电阻为 0.02Ω 。

- (1) 当端电压分别为128V和124V时，它分别作为电动机还是发电机运行？
- (2) 端电压就是124V时，计算电枢电流，端部功率、电磁功率和电磁转矩。

2-2：2-1中的直流发电机，励磁电流保持恒定，转速为3000r/min，感应电势为125V。当端电压为124V时，测得端部功率为24kW。计算这台电机的转速。

(1) 与电枢电压125V来对比:

当端电压分别为128V时, 它作为电动机运行。

当端电压分别为124V时, 它作为发电机运行。

(2) 端电压124V时:

$$\text{电枢电流 } I_a = \frac{E_a - U}{R_a} = \frac{125 - 124}{0.02} = 50 \text{ (A)}$$

$$\text{端部功率 } P = UI_a = 124 \times 50 = 6.2 \text{ (kW)}$$

$$\text{电磁功率 } P_{em} = E_a I_a = 125 \times 50 = 6.25 \text{ (kW)}$$

$$\text{电磁转矩 } T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{6.25 \times 10^3}{100\pi} = 19.9 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$
$$\Omega = \frac{2\pi}{60} n$$

2.2: 2.1中的直流发电机, 励磁电流保持恒定, 转速为3000r/min, 感应电势为125V。当端电压为124V时, 测得端部功率为24kW。计算这台电机的转速。

解答关键: $E_a = C_e \Phi n$

输出电压与转速
为正比例关系

$$I_a = \frac{P}{U} = \frac{24000}{124} = 193.5 \text{ (A)}$$

$$E_a = U + I_a R_a = 124 + 193.5 \times 0.02 = 127.87 \text{ (V)}$$

$$n = 127.87 / 125 \times 3000 = 3069 \text{ (r/min)}$$

***为什么直流发电机的电枢绕组元件的电势是交变电势, 而电刷电势是直流电**

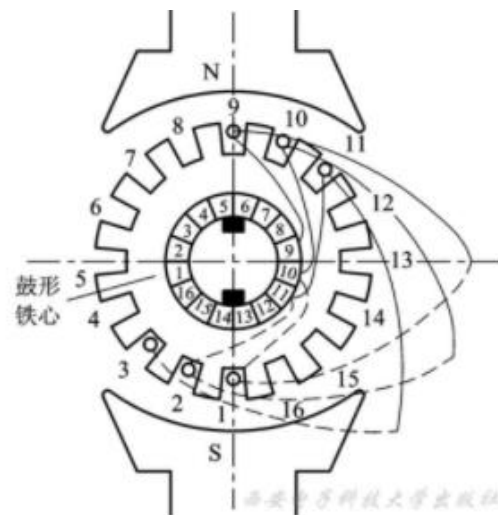
势?

电枢连续旋转, 导体 ab 和 cd 轮流交替地切割 N 极和 S 极下的磁力线, 因

而电枢绕组的电

势及线圈电势是交变的；由于通过换向器的作用，无论线圈转到什么位置，电刷通过换向片只与处于一定极性下的导体相连接，而处在一定极性下的导体电势方向是不变的，因而电刷两端得到的电势极性不变，为直流电势。

*电枢绕组图（虽然不太可能考）



补全连线技巧：两根线必有一根连自己，作正交中心线，另一根线则在正交中心线上，例

如图中 9 和 1，且每一组正交中心线转过 $(360/n)^\circ$ ，其中 n 为槽数；

右手定则判定得：内圈 2~9 垂直纸面向里
内圈 10~1 垂直纸面向外
电刷极性：上负下正

第三章

● 直流伺服电动机的工作原理及转矩方程

工作原理：输入的电压信号转化为转轴的角位移或角速度输出。改变输入信号的大小和极性

可以改变伺服电动机的**转速与转向**，故输入的电压信号又称为控制信号或控制电压。

可逆性：同一台直流电机遵从可逆原理，即在一定条件下，可作发电机运行，而在一定条件下可作电动机运行，**与直流发电机的电机结构并无不同，只是运作方式发生改变。**

感应电势 ——> 发电机：主电动势，反转矩

感应电势 ——> 电动机：反电动势，主转矩

简而言之，当 $E_a > U$ ，为发电机（电负载，克服电磁转矩）

当 $E_a < U$ ，为电动机（机械负载，克服反电动势）

转矩：我们知道转子在磁场中转动会产生切割磁感线，产生电磁转矩，电流绕组在磁场中运

动会有安培力，即： $F = BIL$ ，在这里 L 为电枢铁芯长度， I 为流过电枢的电流， B 为气

隙磁通密度；所以电磁转矩为 $T = BIL \cdot D/2$ ，其中 D 为电枢直径。

若导体数为 N ，则有

导体数为 N ，则电机转子所受到的总转矩为

$$T = \sum_{i=1}^N t_i = \sum_{i=1}^N B_x l i_a \frac{D}{2} = N B_p l i_a \frac{D}{2}$$

↓ $B_p = \frac{\Phi}{\tau l}, \tau = \frac{\pi D}{2p}, i_a = \frac{I_a}{2a}$

$$T = N \cdot \frac{2p\Phi}{\pi D l} \cdot l \frac{I_a}{2a} \cdot \frac{D}{2} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a$$

↓ $C_T = \frac{pN}{2\pi a}$

$$T = C_T \Phi I_a$$

前面第二章提到过**电势系数 C_e** ，其表示为 $C_e = pN/60a$ ，记 C_T 为电机的转矩系数

易得：

$$C_T = \frac{60}{2\pi} C_e$$

p 为极对数， N 为总导体数， a 为单波绕组并联支路对数， $N/2a$ 为每条支路导体数

这样就使**电机转矩系数**和**电势系数**联系上了，则电机转矩 T 可表示为：

$$T = C_T \Phi I_a = K_T I_a \quad C_T \text{ 为电机的转矩常数}$$

一般的 $C_T = 9.55C_e$

注意： C_e 和 C_T 实际上都是电机的结构参数，只要电机做出来，就是定值，与工作磁场

环境无关

● 直流伺服电动机的特性方程和使用

在直流电机中，电磁转矩 T_{em} 是一个制动转矩， T_2 为输出转矩，电机在无负载稳态运行时，

稳态运行时的转矩平衡方程式：

$$T_{em} = T_2 + T_0$$

电机在保持稳态运转的情况下（产生的电磁转矩恒定不变）， T_2 为允许外加负载转矩，其等于 T_L ； T_0 为阻转矩，由反电势产生，记外加负载转矩为 T_L ，则记总的阻转矩为 T_s ，其等于 T_0 与 T_L 之和； $T_s = T_0 + T_L$

当电机运行行为稳态时，正常工作条件下必定存在： $T_{em} = T_s$

此外

当电机的转速改变时，由于电机及负载具有转动惯量，将产生惯性转矩 T_j ， $T_j = J \frac{d\Omega}{dt}$

动态转矩平衡方程式： $T_2 = T_L + T_j = T_L + J \frac{d\Omega}{dt}$

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60}$$

$\frac{d\Omega}{dt} > 0$ ，加速； $\frac{d\Omega}{dt} = 0$ ，匀速； $\frac{d\Omega}{dt} < 0$ ，减速。

在直流发电机中，电磁转矩会和外转矩方向相反，转向和外转矩方向一致，所以产生的电磁转矩会与转向相反；而在电动机中，电磁转矩与外转矩，转动方向一致，

会产生反电势，在电机运转的所需的端电压中，需要加上等值的电压来抵消反电势。

电动机反电势和端电压平衡方程式如下：

$$E_a = C_e \Phi n$$

$$U_a = E_a + I_a R_a$$

联立两式可得关于**电动机转速**的关系式：

$$n = \frac{U_a - I_a R_a}{C_e \Phi}$$

由于电枢电流可表示为：

$$I_a = \frac{U_a - E_a}{R_a} = \frac{U_a - C_e \Phi n}{R_a}$$

$$T = C_T \Phi I_a$$

即 n 的表达式可整理为：

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T$$

由上面式子可得在稳态时：

当外负载 T_L 增大时， $T \uparrow$ ， $I \uparrow$ ， $n \downarrow$ ；

当外负载 T_L 减少时， $T \downarrow$ ， $I \downarrow$ ， $n \uparrow$ ；

直流电动机工作过程：



可得出三个结论：

- 1) 输入电压大于电势
- 2) 电势和电流一定反向
- 3) 转向一定和电磁转矩方向相同

***对于任意一台负载的直流电机，电势和转矩是否同时存在？**

电势和转矩是同时存在；

发电机:先有转速发电后有电流

电动机:先有电流受力后有转速

● 直流伺服电动机的控制方法和稳态特性

额定功率：额定功率指直流电动机在额定运行时，其轴上输出的机械功率

对于**直流电动机**， P_N 是指输出的**机械功率**，所以公式中还应有效率 η_N 存在。 $P_N = U_N I_N \eta_N$

额定电流：额定电流是指电动机在额定电压下，负载达到额定功率时的电枢电

流和励磁电流

值

额定电压：额定电压是指在额定运行情况下，直流电动机的励磁绕组和电枢绕

组应加的电压

值

额定转速：额定转速是指电动机在额定电压和额定功率时每分钟转数

定额：按电动机运行的持续时间，定额分为“连续”、“短时”和“断续”三种

额定转矩：额定电压以及额定功率下输出的转矩

转速和角速度的关系：

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60}$$

额定转矩可表示为：

$$T_2 = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{P_2}{n}$$

直流电机的启动：

- 1) 启动时转矩要大
- 2) 电枢电流要小（启动瞬间，端电压全部落在电枢绕组上避免过大烧坏电枢绕组）
- 3) 缩短启动时间：较小的转动惯量，在加速过程中，保持较大的电磁转矩

方法：A.直接启动（小容量电机） B.电枢回路串电阻启动 C.降压启动（抑制启动电流）

直流电机调速方式：

由转速 n 的表达式可知：

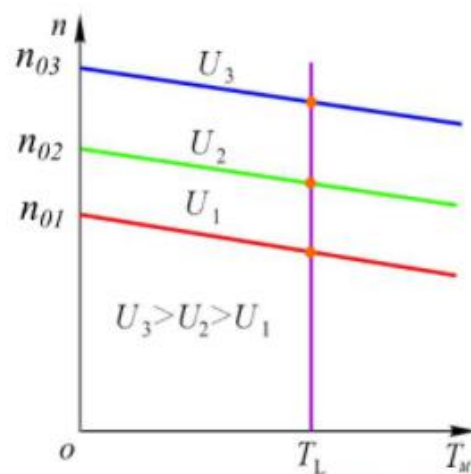
- 1) 改变电枢电压：转速既可上升也可下降，配合励磁调节，调速范围更宽，是一种普

遍应用的调速方式。

2) 改变磁通：几乎不影响电动机，效率，只适合升速调节，且调速范围不大

3) 改变电枢回路电阻：增加电枢回路损耗，效率低，只适合降级调速

若是调节电枢电压，则有：



A.斜率一致

B.截距 n_0 不同

C.升压升速，降压降速，

可以准确计算

特点：平滑调速，机械特性硬度较高，负载调速稳定，调速范围一致，属于无级调速

例子：

设一台直流电动机原来运行情况为：电机端电压 $U_a=110\text{ V}$ ， $E_a=90\text{ V}$ ， $R_a=20\text{ }\Omega$ ， $I_a=1\text{ A}$ ， $n=3000\text{ r/min}$ 。如电源电压降低一半，而负载转矩不变，转速将降低到原来的百分之几？

解：当负载转矩不变时，即 T_L 不变时，电磁转矩 T 不变，电枢电流 I_a 不变

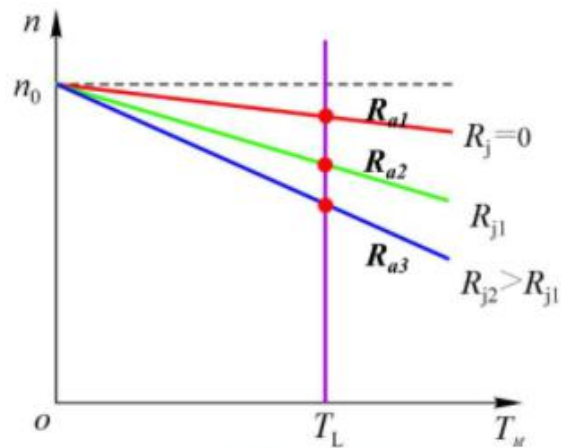
若此时 $U_a\downarrow$ ，则 $E_a\downarrow$ ；若磁通量 ϕ 不变，在 $E_a\downarrow$ 的情况下，转速 $n\downarrow$

$$\frac{n'}{n} = \frac{\frac{E'}{C_e \Phi}}{\frac{E_a}{C_e \Phi}} = \frac{E'_a}{E_a} = \frac{U'_a - I'_a R_a}{U_a - I_a R_a} = \frac{55 - 1 \times 20}{110 - 1 \times 20} = 0.39$$

调压方法：

- 1) 调交流，整流后为直流
- 2) 数字斩波技术，可控硅
- 3) 脉宽调制 PWM，占空比（最好）

若是调节电枢回路电阻，则有：



其本质：相当于降压

特点：电阻变化量与转速成反比；转速只能调慢不能调快，调速平滑性差；

效率低，电阻

耗能；属于有级调速

例子

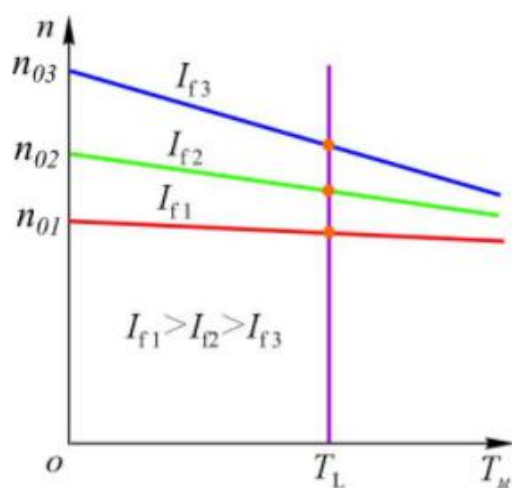
设一台直流电动机原来运行情况为：电机端电压 $U_a=220\text{ V}$ ， $E_a=210\text{ V}$ ， $R_a=1\ \Omega$ ， $I_a=10\text{ A}$ ， $n=1500\text{ r/min}$ 。今在电枢回路中串电阻降低转速，设 $R_{ij}=10\ \Omega$ 并设转速降低后负载转矩不变，这时转速将降低到原来的百分之几？

解：当负载转矩不变时，即 T_L 不变时，电磁转矩 T 不变，电枢电流 I_a 不变；串联电阻后，

电枢回路中分压（压降）增大，感应电动势 $E_a \downarrow$

$$\frac{n'}{n} = \frac{\frac{E'}{C_e \Phi}}{\frac{E_a}{C_e \Phi}} = \frac{E'_a}{E_a} = \frac{U_a - I_a(R_a + R_{ij})}{U_a - I_a R_a} = \frac{220 - 10 \times (1 + 10)}{220 - 10 \times 1} = 0.523$$

若是调节磁通，则有：



磁通减弱时，励磁电流 $I_f \downarrow$ ，截距 $n_0 \uparrow$ ，斜率 $k \uparrow$

特点：调节方便，能耗小；调速平滑，可实现无级调速；调速范围不大；

例题

设一台直流电动机原来运行情况为： $U_a=110\text{ V}$ ， $E_a=90\text{ V}$ ， $R_a=20\Omega$ ， $I_a=1\text{ A}$ ， $n=3000\text{ r/min}$ 。为了提高转速，把励磁回路的调节电阻 R_{ff} 增加，使 Φ 减小10%，如负载转矩不变，问转速如何变化？

解：当负载转矩不变时，电磁转矩 T 不变， I_a 本来也应不变，但由于磁通量 Φ 的减少， I_a 就应

该增大，以维持电磁转矩 T 不变

$$\text{所以 } I_a' = I_a(\Phi/\Phi') = 1 \times (1/0.9) = 1.11\text{ A}$$

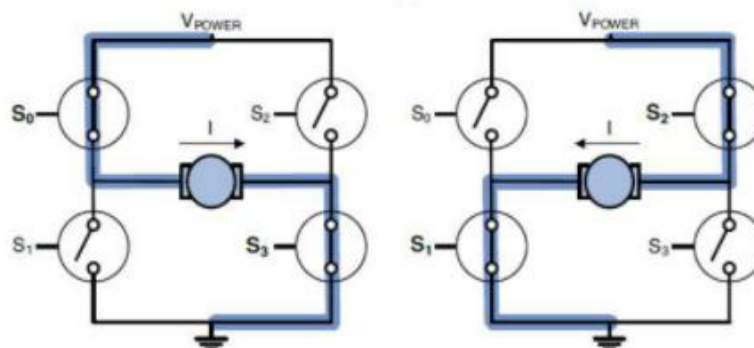
$$\frac{n'}{n} = \frac{\frac{E_a'}{C_e \Phi'}}{\frac{E_a}{C_e \Phi}} = \frac{E_a' \Phi}{E_a \Phi'} = \frac{(U_a - I_a' R_a) \Phi}{(U_a - I_a R_a) \Phi'} = \frac{(110 - 1.11 \times 20) \times 1}{(110 - 1 \times 20) \times 0.9} = 1.08$$

改变电动机转向： 1) 改变磁通方向；2) 改变电枢电流方向（极性）

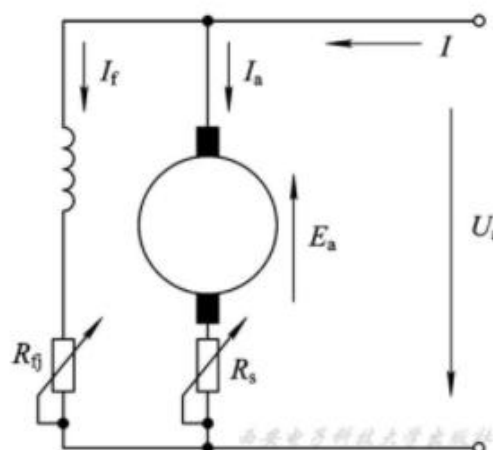
(适用于励磁和永磁励磁直流电动机)

单路控制：回流晶体管（让反电势回流通路）

双向控制：H 桥（四个独立电子开关）



注意：1.电机启动时要使励磁磁通最大（并励电动机电枢支路和励磁支路应并联在电源上）



2.运转过程中，切勿不能断开励磁回路

设一台S-261 直流电动机，其电枢电压 $U_a=110\text{ V}$ ， $R_a=50\ \Omega$ ，空载时的电枢电流 $I_{a0}=0.062\text{ A}$ ，负载后，当 $I_a=0.4\text{ A}$ 时其转速 $n=3600\text{ r/min}$ 。若励磁回路断开后剩磁下降为正常磁通的 0.04 ，问励磁回路断开后将会产生什么后果？

当电机加上负载时，依据转矩平衡关系，当负载转矩 T_L 不变，电磁转矩 T 也不会改变，

则在励磁回路断开后，电磁转矩不变，但由于磁通降低，为了使电磁转矩不变，电枢电流 I_a

会瞬间增大；

$$I'_a = \frac{C_T \Phi}{C_T \Phi'} I_a = \frac{1}{0.04} \times 0.4 = 10\text{ A}$$

而原电机电枢允许通过电流为 2.2 A （启动电流初始值），也称为堵转电流，显然电枢电流

瞬间增大已经超出堵转电流值，则目前电机的电磁转矩所需电流小于负载转矩所需电流；

长时间堵转会使电枢绕组烧坏！！

当电机空载时，电磁阻转矩 T_{em} 等于电机本身阻转矩 T_0 ，此时空载电枢电流为

$$I'_{ao} = \frac{C_T \Phi}{C_T \Phi'} I_{ao} = \frac{1}{0.04} \times 0.062 = 1.55 A$$

这一瞬间的变化，会使转速瞬间增至最大，而实际上会大大超出额定转速值，简称“飞

车”现象，容易机械损坏换向器，同时电流大大超出额定值，损坏电枢绕组与换向器

励磁回路断开后的转速对断开前的负载转速之比为

$$\frac{n'}{n} = \frac{\frac{E'}{C_e \Phi'}}{\frac{E_a}{C_e \Phi}} = \frac{E'_a \Phi}{E_a \Phi'} = \frac{(U_a - I'_{a0} R_a) \Phi}{(U_a - I_a R_a) \Phi'} = \frac{(110 - 1.55 \times 50) \times 1}{(110 - 0.4 \times 50) \times 0.04} = 9$$

即电机的转速 $n' = 9n \times 3600 = 32400 \text{ r/min}$ 。

综上所述，即有两种故障可能性：

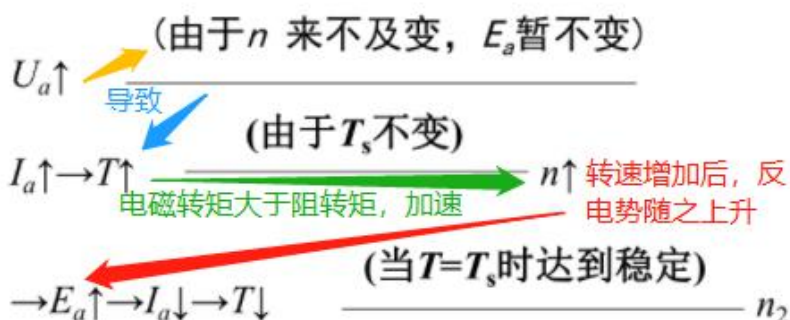
磁通很小的可能性：

- 负载很小很轻松， $n_0 \uparrow \uparrow \rightarrow \infty$ ，飞车
- 负载很大带不动， $I_a \uparrow \uparrow \rightarrow$ 堵转，烧毁

控制思想（很重要呀）：

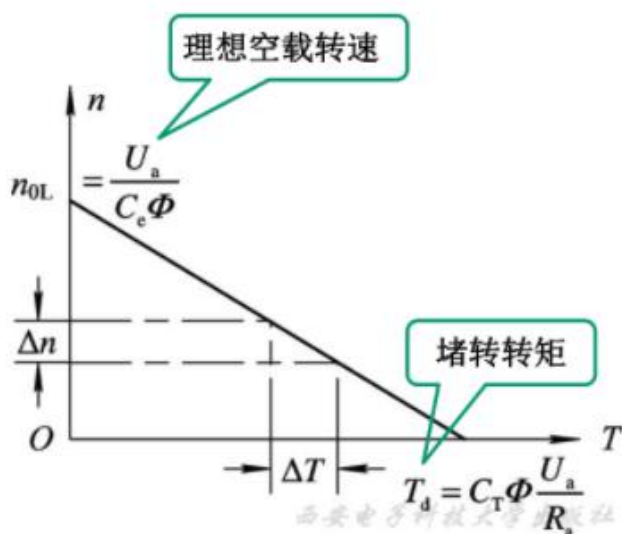
$$\begin{cases} U_{a1} = E_{a1} + I_{a1}R_a = C_e \Phi n_1 + I_{a1}R_a \\ T = T_s \end{cases}$$

当 T_s 、 Φ 不变时，



直流伺服电动机的稳态特性:

机械特性: 在电机 U_a 不变时, 转速随负载转矩 (或电磁转矩) 变化的规律



机械特性可看作线性变化, k 大变化大, 所以机械特性软; k 小变化小, 机械

特性硬;

电动机的机械特性可看作为**抗变化能力**, 此外机械特性斜率 k 与电枢电阻 R_a

成正比, 一般期

望在电机满足需求的情况下, 电机要具备较高的机械特性!

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T$$

$$n = n_0 - kT$$

机械特性斜率: $k = \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2}$

k 大, 机械特性软
 k 小, 机械特性硬

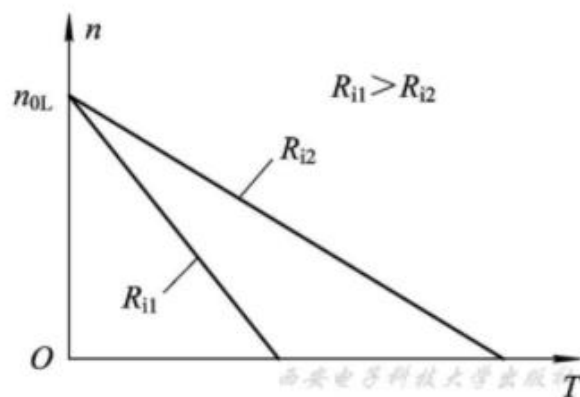
k 正比于 R_a , 应尽量使 R_a 的数值较小, 此外, 一般 k 的表达式还会存在放大器内阻 R_i , 在实际应用中, 也会要求降低放大器内阻, 以改善电机特性!

$$E_i = I_a R_i + U_a = E_a + I_a (R_a + R_i)$$

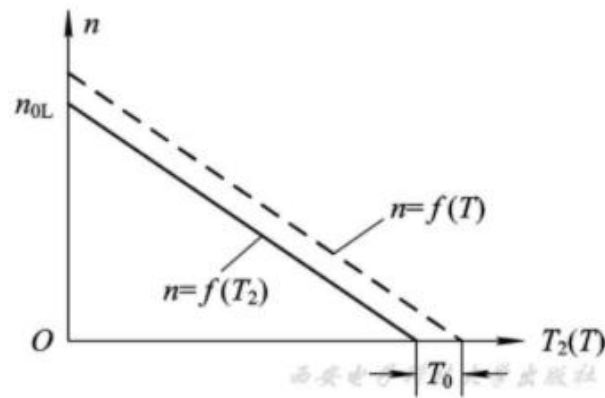
↓
放大器内阻

$$k = \frac{R_a + R_i}{C_e C_T \Phi^2}$$

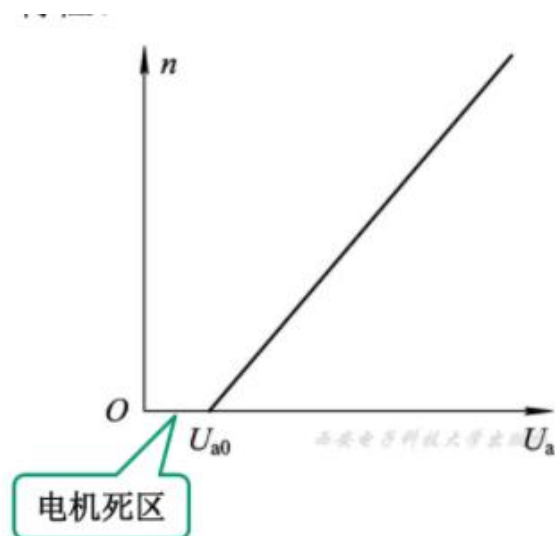
当存在放大器内阻 R_i 时, 它对机械特性的影响等价于电枢电阻 R_a 对机械特性的影响, 电阻越大, k 越大, 机械特性就越软



事实上，在实际应用中，电磁转矩 T_{em} 我们是无法测量的出，应该考虑转速随输出转矩 T_2 的变化；随输出转矩的变化类似，相当于电磁转矩与转速的特性曲线向左平移，即可得到 T_2 和转速 n 的变化关系；



调节特性：是指电机在一定的负载转矩下，稳态转速随控制电压变化的关系



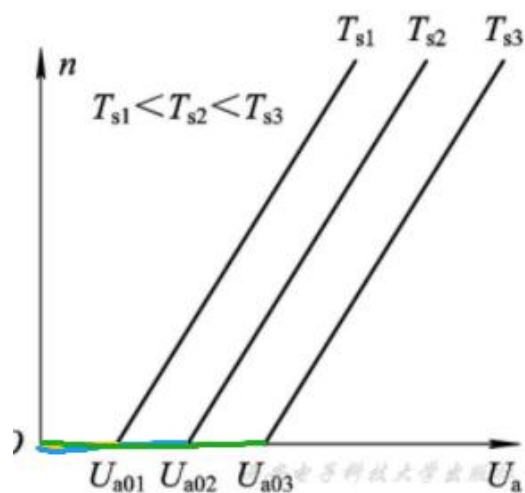
当负载为常数时，会存在死区，可看作为小于始动电压（电机动与不动的临界区）

的区域

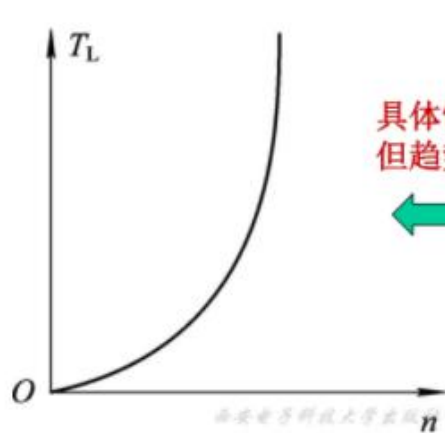
电动机的总阻转矩 $T_s = T_L + T_0$

$$\left\{ \begin{aligned} U_a &= U_{a0} = \frac{T_s R_a}{C_T \Phi} = I_a R_a && \text{负载越大} \\ &&& \text{死区越大} \\ k &= \frac{I}{C_e \Phi} && \text{调节特性斜率，与电机} \\ &&& \text{本身参数相关} \end{aligned} \right.$$

当负载不同时，始动电压也不同，但斜率不改变



当负载可变时，其特性曲线为：增加到一定程度会出现增长缓慢的情况（斜率不断改变）



具体情况不同，
但趋势一致

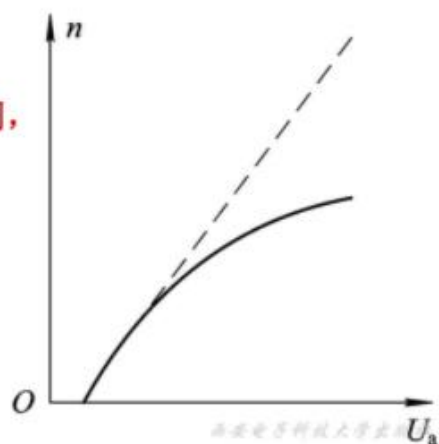


图 3 - 18 空气阻转矩与转速的关系

图 3 - 19 可变负载时的调节特性

直流电机低速运转的不稳定性：（转速不均匀）

原因：1. 反电势平均值不大，齿槽效应造成电势脉动，电磁转矩波动

2. 控制电压小，换向器与电刷压降接触不稳定，导致电磁转矩

不稳定

3. 换向器与电刷之间摩擦转矩不稳定，导致电机本身阻转矩

T_0 ，进而导致输出转

矩 T_2 不稳定

危害：自控系统造成误差

措施：闭环控制策略或选用低纹波稳定性好的直流力矩电动机或直流惯量电

动机

● 直流伺服电动机与直流测速发电机的异同

一图解释清楚！！

(1) 直流发电机和直流电动机是直流电机在不同的外界条件下的两种不同的运行状态，即发电机状态和电动机状态，它们的输入量和输出量是相互倒置的。如表 3-1 所示。

表 3-1 直流发电机、电动机对照表 → 同一种电机结构

	直流发电机	直流电动机
输入量	机械能或转速信号 n	电能或电压信号 U_a
输出量	电能或电压信号 U_a	机械能或转速信号 n
能量转换关系	机械能→电能	电能→机械能
信号转换关系	转速 n →电压 U_a	电压 U_a →转速 n

(2) 发电机和电动机中都存在感应电势和电磁转矩，而且感应电势和电磁转矩的表达式相同，即 $E_a = C_e \Phi n$ ， $T = C_T \Phi I_a$ ，但 E_a 和 T 在两种运行状态中的作用却相反。比较如下：

发电机运行状态	电动机运行状态
T ——制动转矩	T ——驱动转矩
E_a 和 I_a 方向相同	E_a 和 I_a 方向相反
E_a 为正电势	E_a 为反电势

(3) 发电机和电动机中都同时存在电压平衡和转矩平衡这两种平衡关系，其中电压平衡方程式反映了直流电机和外电源或外电路的联系，转矩平衡方程式反映了直流电机和外部机械的联系，但这两种平衡关系在两种运行状态中却不同。比较如下：

电负载 发电机运行状态	电动机运行状态 机械负载
$U_a = E_a - I_a R_a$ ↓	$U_a = E_a + I_a R_a$ ↓
$(E_a > U_a)$ 克服制动转矩	$(U_a > E_a)$ 克服反电势
$T_1 = T + T_0$	$T_2 = T - T_0$
(T_1 为输入转矩)	(T_2 为输出转矩)

● 直流伺服电动机习题

题 1:

4. 已知一台直流电动机，其电枢额定电压 $U_a = 110 \text{ V}$ ，额定运行时的电枢电流 $I_a = 0.4 \text{ A}$ ，转速 $n = 3600 \text{ r/min}$ ，它的电枢电阻 $R_a = 50 \text{ } \Omega$ ，空载阻转矩 $T_0 = 15 \text{ mN} \cdot \text{m}$ 。试问该电动机额定负载转矩是多少？

4. 解: $E_a = U - I_a R_a = 110 - 0.4 \times 50 = 90 \text{ (V)}$

电磁功率: $P_{em} = E_a I_a = 90 \times 0.4 = 36 \text{ (W)}$

角速度: $\Omega = \frac{2\pi}{60} n = \frac{2\pi}{60} \times 3600 = 120\pi \text{ (rad/s)}$

电磁转矩: $T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{36}{120\pi} = 0.0955 \text{ (N} \cdot \text{m)}$

负载转矩: $T_L = T_{em} - T_0 = 0.0955 - 0.015 = 0.0805 \text{ (N} \cdot \text{m)}$

题 2:

12. 一台直流伺服电动机带动一恒转矩负载(负载阻转矩不变), 测得始动电压为 4 V, 当电枢电压 $U_a=50 \text{ V}$ 时, 其转速为 1500 r/min。若要求转速达到 3000 r/min, 试问要加多大的电枢电压?

12. 解: $T = T_0 + T_L \Rightarrow T_L \text{ 不变时} \rightarrow T \text{ 不变}$

$$\left. \begin{array}{l} T \text{ 不变} \\ T = C_T \Phi I_a \end{array} \right\} \Rightarrow I_a \text{ 不变} \rightarrow \text{始动电压 } U_{a0} \text{ 不变}$$

$$\frac{n'}{n} = \frac{\frac{E'}{C_e \Phi}}{\frac{E_a}{C_e \Phi}} = \frac{E'}{E_a} = \frac{U'_a - I_a R_a}{U_a - I_a R_a} = \frac{U'_a - 4}{50 - 4} = \frac{3000}{1500}$$

所以 $U'_a = 96 \text{ V}$ 。

第四章

● 异步型交流伺服电动机的工作原理

工作原理：定子端励磁绕组通入交流电，产生定子旋转磁场，转子受到定子产生的旋转磁场

磁感应产生感应电流，通电导体在磁场中受到安培力作用后，产生电磁转矩，电

磁转矩方向与旋转磁场转动方向一致，电机就动了起来；转子无源，需要感应

异步：是因为电磁转矩的产生较旋转磁场的产生在相位上迟滞，根本原因就是电磁转矩是由

导体在旋转磁场切割运动产生，而在旋转磁场产生时，电磁转矩并不能立刻产生！

*转子能否追上磁铁的转速，为什么？

不能；在不考虑机械负载的情况下，转子转动本来所需要驱动力矩就来源于有电流流过的

导体切割旋转磁场产生，旋转磁场产生后，先有感应电流，后有电磁转矩，从旋转磁场的

产生到电磁转矩的产生，电流在相位上呈现一定的滞后性，所以转子速度不能追上磁铁转

速，即旋转磁场的转速

*转子超过磁铁的转速，会怎么样？

异步电动机转子转速大于旋转磁场转速时为发电运行状态，转矩由驱动变为制动，即转矩方向与旋转方向相反；电流相位与电动状态（转子转速低于旋转磁场转速）时是相反的

● 异步型交流伺服电动机的特性

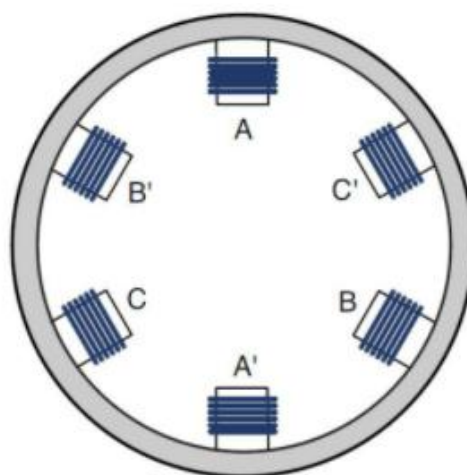
一般来说，转子转速低于磁场转速是受到**负载转矩 T_L** 以及**自身阻转矩 T_0** 影响比较大

转速差多少，一般由**负载转矩 T_L** 决定，成一定的比例关系；

负载 $\uparrow \Rightarrow T \uparrow \Rightarrow I_R \uparrow \Rightarrow$ 相对运动大 $\Rightarrow n \downarrow$

负载 $\downarrow \Rightarrow T \downarrow \Rightarrow I_R \downarrow \Rightarrow$ 相对运动小 $\Rightarrow n \uparrow$

两极三相电动机的定子：



磁极数：每相的绕组数目
三个相相距 120°

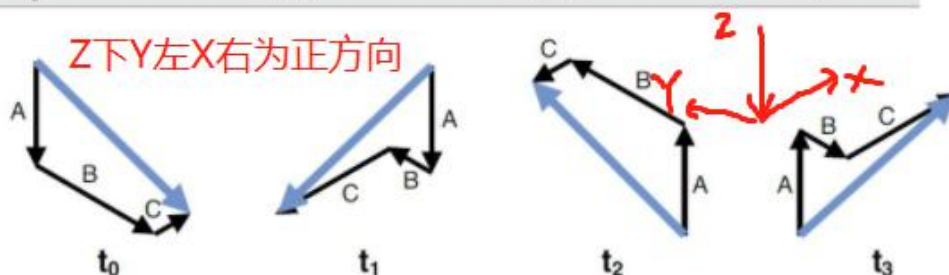
三个相电压，相电流两两之间在时间上的相位上也相差 120° ，这样的排布方

式，得到一个在定子中的旋转磁场，且分布符合正弦式分布；由于磁场的强度正比于

相电流，相电压，所以可以用相电压来评估磁场的强度；

画出四个时间点的箭头。黑色箭头代表绕组的磁场，合成箭头代表给定时间点的总磁场。

	A	B	C
t_0	0.738	-0.952	0.286
t_1	0.738	0.357	-0.976
t_2	-0.762	0.952	-0.310
t_3	-0.738	-0.381	1.0



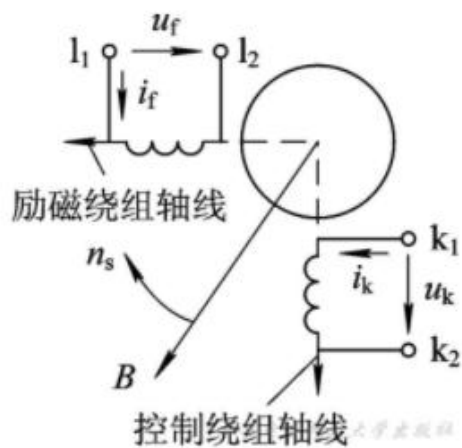
圆形磁场产生条件：

- 1) 两脉振磁通密度的轴线空间上相夹 90° 电角度（轴线正交）
- 2) 脉振时间相位差为 90°
- 3) 两脉振磁通密度幅值相等

注意：如果三相不对称，会形成椭圆旋转磁场！

● 异步型交流伺服电动机的控制方法和稳态特性

磁场旋转方向决定了电机的转动方向



电机转向：

- 1) 取决于交流电流相序
- 2) 调换任意两相电源线可以改变转向（改变相序）

旋转磁场转速：（同步速 n_s ）

- 1) 定子绕组极对数
- 2) 电源频率 f

$$n_s = \frac{f}{p} (\text{r/s}) = \frac{60f}{p} (\text{r/min})$$

这个表，可以通过上述公式推导出：

p		1	2	3	4
$n_s / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$f = 50 (\text{Hz})$	3000	1500	1000	750
	$f = 400 (\text{Hz})$	24 000	12 000	8000	6000

转速与转差率：

- 1) 转子导体切割磁场的相对速率为转差
- 2) 转差与同步速的比值为转差率

$$\Delta n = n_s - n$$

$$s = \frac{\Delta n}{n_s} = \frac{n_s - n}{n_s}$$

即可以确定转速表达式为：

$$n = n_s(1-s)$$

转差率越大，转速越小；当负载转矩变化时，为了有足够的电磁转矩去平衡负载转矩，转速也会随之变化；

转子电流 I_R 、转速 n 、转差率 s 随负载转矩 T_L 变化的情况可表示为

$$\begin{aligned} T_L \uparrow &\longrightarrow I_R \uparrow \longrightarrow n \downarrow \longrightarrow s \uparrow \\ T_L \downarrow &\longrightarrow I_R \downarrow \longrightarrow n \uparrow \longrightarrow s \downarrow \end{aligned}$$

当 $s=0$ 时， $n_s=n$ 时，处于**理想空载**的情况下，不承受负载转矩，但仍有自身的阻转矩；

当 $s=1$ 时， $n=0$ 时，旋转磁场以同步速 n_s 切割转子，转子导体电流及电动势很大，处于**堵转状态**

(电机启动瞬间或负载转矩卡住电机轴的情况)

所以 s 的范围必定是在 $(0,1]$ 之间，不可能等于 0 且小于等于 1；

由 $n_1 = \frac{60 f_1}{p}$ (转/分) \rightarrow $f_1 = \frac{n_1}{60} p$ $f_2 = s f_1$

转子感生
电流频率 $f_2 = \frac{n_1 - n}{60} p = \frac{n_1 - n}{n_1} \times \frac{n_1}{60} p = s f_1$

● 异步型交流伺服电动机和直流伺服电动机的异同

异:

结构上: 前者无电刷和换向器

工作环境: 前者处于旋转磁场中, 后者处于恒定磁场中

输入信号: 前者为交流, 后者为直流

同:

都是要在励磁绕组产生的磁场中进行切割磁感线运动

● 异步型交流伺服电动机习题

例1: 三相异步电动机 $p=3$, 电源 $f_1=50\text{Hz}$, 电机额定转速 $n_N=960\text{r/min}$ 。

求: 转差率 s , 转子电动势的频率 f_2

$$\text{同步转速: } n_1 = \frac{60 f_1}{p} = \frac{60 \times 50}{3} = 1000 \text{ r/min}$$

$$\text{转差率: } s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1000 - 960}{1000} = 0.04$$

$$f_2 = s f_1 = 0.04 \times 50 = 2 \text{ Hz}$$

第五章

● 永磁交流伺服电动机的工作原理

转子上放有永磁体，依靠定子的旋转磁场与转子的永磁体磁场相互作用，产生电磁转矩；

转子转速始终等于同步速；

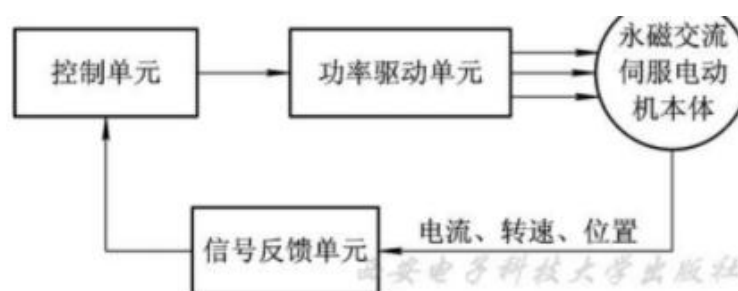


图9-1 永磁交流伺服电动机系统的组成

在负载不超过限度的情况下，永磁同步电机的转速为

$$n = n_s = \frac{60 f}{p_n} \quad (\text{r/min})$$

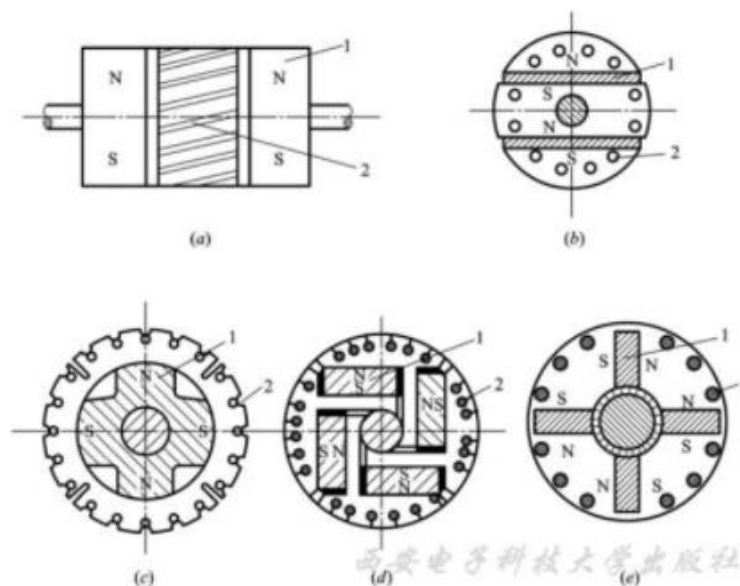
只取决于电源频率和电机极对数！

当负载转矩超过最大限度，在临界处会有一个**最大同步转矩**，当负载转矩大于最大同步转矩就会出现失步现象；

永磁同步电机不能自启动原因：

- 1) 转子及所带负载存在惯性
- 2) 定子供电频率过高，使定子与转子之间转速差值过大

自启动永磁电机结构，往往会采用异步交流电机的形式，转子处外加鼠笼型导条



在控制上，一般先以低频电流启动永磁同步电机后，再逐步提高电源频率从而提高转速；启动方式类似于异步交流启动的方式；由定子绕组，转子鼠笼绕组，永磁体这三者的磁场相互作用而形成；

- 永磁交流伺服电动机的特性

不作考察！！

- 永磁交流伺服电动机的控制方法和稳态特性

不作考察！！

- 永磁交流伺服电动机和异步型交流伺服电动机的异同

异：

转子上多加了一个永磁体产生磁场与电子磁场

前者不可以自启动，后者可以

前者转子转速与定子磁场转速一致，后者转子转速落后于磁场转速

同：

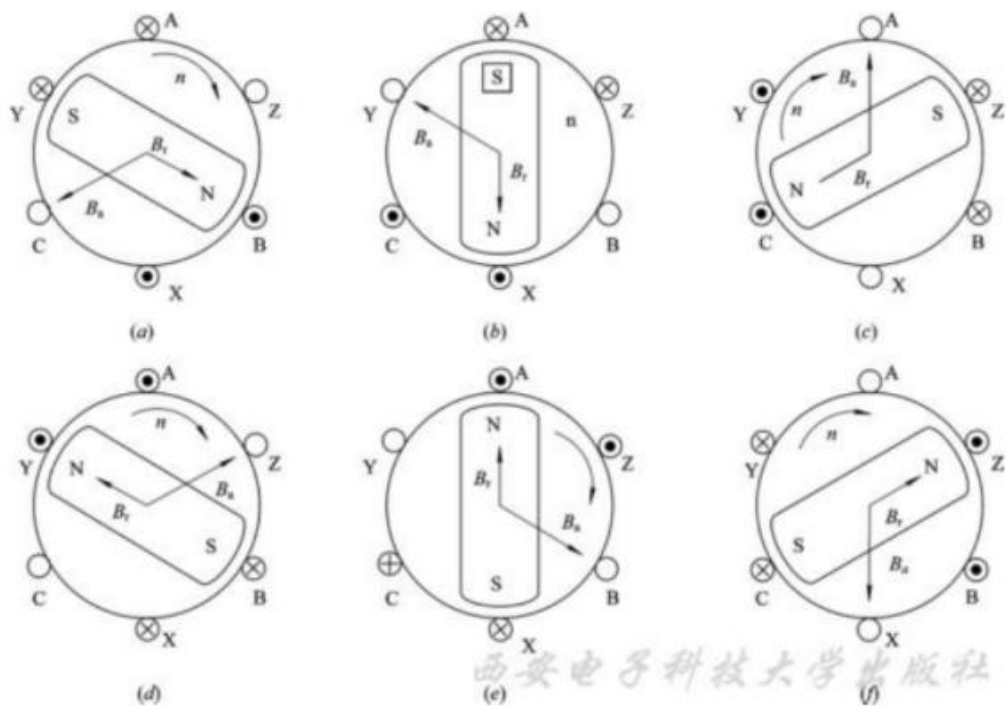
定子产生的磁场是连续的

输入信号都为交流

第六章

- 无刷直流电动机的工作原理

转子在定子产生的跳跃式磁场中的转动



当转子磁场连续转动 60° 时，定子合成磁场方向才跳跃 60° ，定子的磁场是一个

跳跃式旋转磁

场，其中 B_r 为转子永磁体产生的磁场， B_a 为电枢绕组在空间产生的磁场；

每通电循环一次，转子转过 360° 电角度，而定子共有六个通电状态，开关管导通时间为转子转过 120° 所需的时间，前后出现的两个不同磁状态的磁状态的磁场轴线间所夹电角度称为磁状态角 α_m ， $\alpha_m = 60^\circ$

在方波无刷直流电机中，由转子永磁极产生的气隙磁通密度 B_g 沿圆周的理想分布为矩形或具有一定平顶宽度的梯形波。

永磁极存在边缘漏磁，假如不考虑定子齿槽的影响，则气隙磁通密度以极中心线为对称，在极弧范围内基本维持不变（三相电机中其平顶宽度至少应有极距的 $2/3$ ），而在磁极边缘处逐渐衰减，在几何中性线处为零

● 无刷直流电动机的特性

反电动势的大小和波形与气隙永磁场的幅值大小、分布形状和绕组结构形式有关；反电动势幅值正比于转速 n ；

$$E_a = 2NB_{gm}l \frac{\pi D_a}{60} n = K_E' B_{gm} n \quad (\text{V})$$

$K_E = K_E' B_{gm}$ 称为电势系数

于是可以记为：

$$E_a = K_E n$$

$K_E' = 2NB_{gm}l \cdot \pi D_a / 60$ 只与电机结构有关

电势平衡公式：

$$U_s = 2R_a I_a + 2E_a + 2U_T$$

其中 U_T 是开关管压降

电枢电流：

$$I_a = \frac{U_s - 2E_a - 2U_T}{2R_a} = \frac{1}{R_a} \left(\frac{U_s}{2} - E_a - U_T \right)$$

当电机堵转时 $n=0, E_a=0$ ，可根据上式得到**堵转电流值**

电磁转矩：

$$T = 2 \cdot 2NB_{gm} I_a \frac{D_a}{2} = K_T' B_{gm} I_a = K_T I_a \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

知道转矩系数可以用上述公式求解

若只知道反电动势 E_a 和 I_a 或**电磁功率**可以用下式求解：

$$P_e = e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C = 2E_a I_a$$

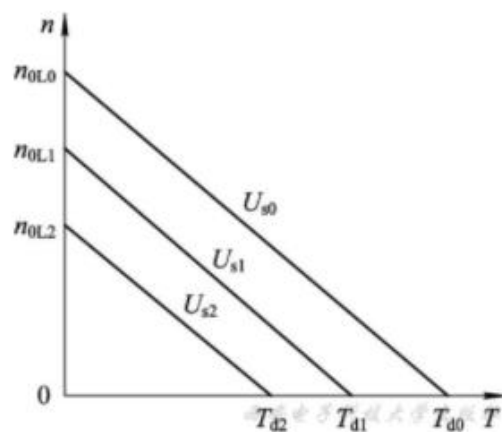
$$T = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{2}{\Omega} E_a I_a$$

同时由上式子可知，电磁转矩正比于定子电流

机械特性：

$$n = \frac{U_s}{2K_E} - \frac{R_a}{K_E K_T} T = n_{0L} - \frac{R_a}{K_E K_T} T$$

忽略的开关管的压降 U_T ，记 n_{0L} 为理想空载转速，易得到机械特性曲线



从图中特性曲线可以看出，无刷直流电机具有他励直流电动机的相同的输出特性

● 无刷直流电机的控制方法和稳态特性

要想控制电机，得先清楚电机的模型；

无刷直流电动机：无中性线的 Y 型联结（了解）

$$\begin{cases} u_A = R_A i_A + p\phi_A + e_A \\ u_B = R_B i_B + p\phi_B + e_B \\ u_C = R_C i_C + p\phi_C + e_C \end{cases}$$

相电压 u , 微分算子 $p = d/dt$, 相电阻 R , 定子相电流 i , 引起的磁链 ϕ , 反电势 e

其中相电流引起的磁链可表示为：

$$\begin{cases} \phi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C \\ \phi_B = L_B i_B + M_{BA} i_A + M_{BC} i_C \\ \phi_C = L_C i_C + M_{CA} i_A + M_{CB} i_B \end{cases}$$

定子绕组三相自感 L , 定子绕组相间互感 M

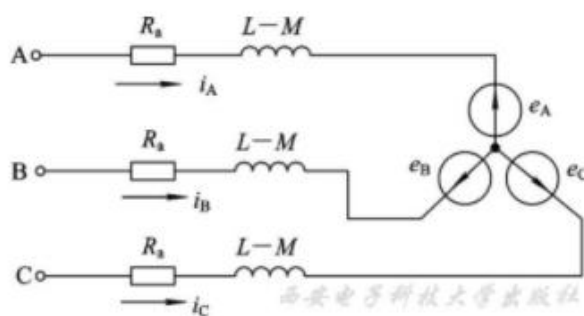
若三相绕组对称，必然存在，相电阻相等，三相绕组自感相等，相间互感亦相等

由于 Y 型联结且无中性线，则 $i_A + i_B + i_C = 0$ ，导致 $M_{i_B} + M_{i_C} = -M_{i_A}$

相电压的关系可用矩阵表示：

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 \\ 0 & 0 & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix}$$

等效电路图模型：



实际运用的相电压方程式为：

$$\begin{bmatrix} u_{AB} \\ u_{BC} \\ u_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & -R_a & 0 \\ 0 & R_a & -R_a \\ -R_a & 0 & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & M-L & 0 \\ 0 & L-M & M-L \\ M-L & 0 & L-M \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{AB} \\ e_{BC} \\ e_{CA} \end{bmatrix} \quad (10-21)$$

式中, $e_{AB}=e_A-e_B$; $e_{BC}=e_B-e_C$; $e_{CA}=e_C-e_A$ 。

转子运动方程:

输出转矩 $\leftarrow J \frac{d\Omega}{dt} = T - T_0 - T_L - K_\Omega \Omega \quad (10-22)$

式中, T 为电磁转矩; T_0 为空载阻转矩; T_L 为负载转矩; K_Ω 为粘滞转矩系数; J 为包括负载在内的系统转动惯量。

转矩脉动:

1) 绕组换相: 电枢绕组电感的存在, 相电流不能突变, 电流只能缓慢变化

2) 电流调制: 电流在一平均值附近很小的范围内以锯齿形状波动, 不能保证绝对

恒定

3) 齿槽转矩: 定子齿槽与转子永磁体相互作用, 产生一个幅值随转子转角变化而

变化的转矩 (定位转矩)

4) 反电动势非理想: 因为电机制造工艺或转子永磁体充磁不理想, 导致不是理想

梯形波, 但控制系统仍按照

梯形波情况供给方波电流

无位置传感器的转子位置检测：硬件检测和软件计算

反电动势过零点检测原理：定子绕组反电动势过零点与电机转子位置之间有着固定的联系

该固定联系为：每次反电动势过零点都发生在不通电的那一相，也就是转子会在与不通电的那

一相的轴线的正交处停下来，即反电势过零点时，转子会处于将要到达正交

处超前 30° 处；所说的正交处为需要换相的时刻，不然电机就会停转，所以换

相时刻应该比反电动势过零点处延迟 30° 电角度

三个相的零点检测方程：

$$e_A = u_{A0} - u_N$$

$$e_B = u_{B0} - u_N$$

$$e_C = u_{C0} - u_N$$

中性电压点可由另外两相通电的平衡电势方程得到：

$$e_A = u_{A0} - \frac{1}{2}(u_{B0} + u_{C0})$$

$$e_B = u_{B0} - \frac{1}{2}(u_{A0} + u_{C0})$$

$$e_C = u_{C0} - \frac{1}{2}(u_{A0} + u_{B0})$$

作用：知道转子的所处角度作为反馈信息，可以对定子绕组换相时间的确定提供帮

助

硬件比较法：端电压利用电阻分压后滤波，再利用对称电阻网络**虚构一个中性点**，通过端电压

与中性点电压比较来获得反电势过零点信息；

软件计算法：端电压分压后滤波，再利用 A/D 转换由微处理器读取三路电压，通过实时计算得

到反电势过零点信息；

由于得到的反馈信息有一定的延迟，会存在对零点检测有延迟角 α ：

所示电路的延迟角 α 为

$$\alpha = \arctan \frac{2\pi f R_1 R_2 R_3 C_1}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} \quad (10-31)$$

式中， f 为信号频率。

三段式启动：电机静止或转速较低时，反电动势信号没有或者很小，无法根据反电势过零检测知

道转子具体位置，所以得开环启动到一定转速，再切换到位置检测的闭环运行；

1) 预先给两相绕组通以短暂的电流，使转子磁极稳定在两相绕组合成的磁场轴线上，

以此获得

初始转子位置；

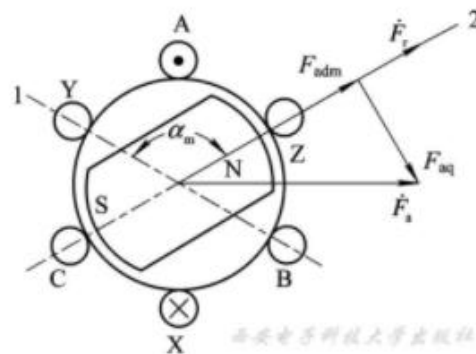
2) 按照定子，转子间正确的空间关系，送出控制开关信号，是功率开关管导通，并逐渐增加控

制信号频率，电机启动并升速；

3) 当电机反电动势随转速升高到一定数值时，可通过反电势过零检测得到确定的转子位置，由

开环启动切换到自同步运行（闭环控制）；

电枢反应：电枢磁场对主磁场的影响



在轴线 1 上由有最强的去磁作用（Ba 正交 Br），而到轴线 2 时，直轴分量又增磁

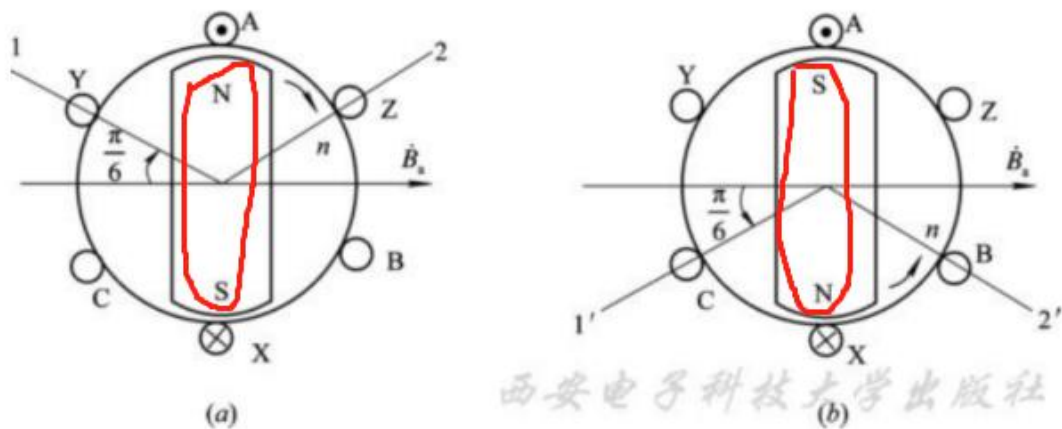
（Ba 分量与 Br 同向），其最大值为：

$$F_{adm} = F_a \sin \frac{\alpha_m}{2}$$

电枢反应可能会导致转子永磁体不可逆地去磁，影响电机性能，控制时应尽量避免

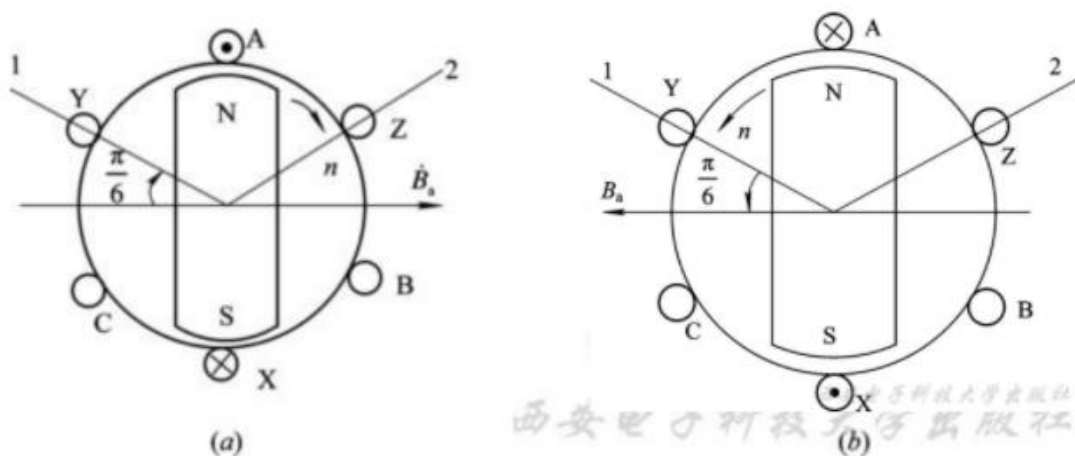
改变直流无刷电机转向的方法：

1) 改接位置传感器的输出信号：基于改变励磁磁场极性



由于正反转使，电枢电流方向不变，因而电枢磁场 B_a 也不变，(a) 中通电顺序 ABC，(b) 中为 ACB

2) 改变定子绕组电流方向：电源极性反置或开关管组成倒向电路



● 无刷直流电动机和永磁交流伺服电动机的异同

异：

前者励磁磁场属于跳跃性，非连续；后者为连续的旋转磁场

前者输入信号为方波直流，后者为正弦波交流；

同：

都属同步电机

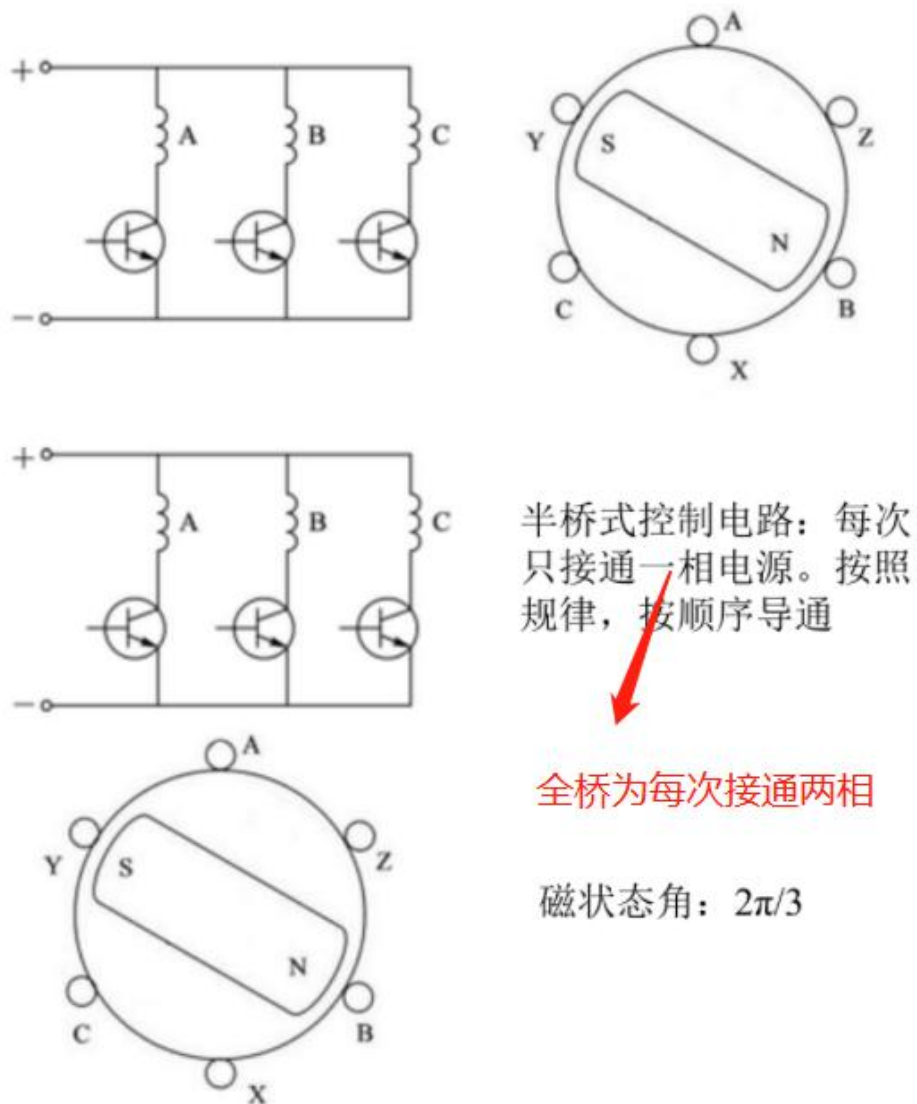
转子结构上都放置了永磁体

都无法自启动，前者需要三段式启动，后者需要类异步交流电机启动方式启

动

● 无刷直流电动机习题

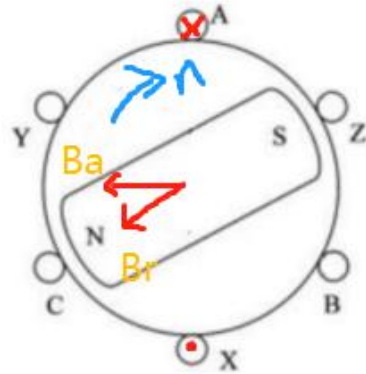
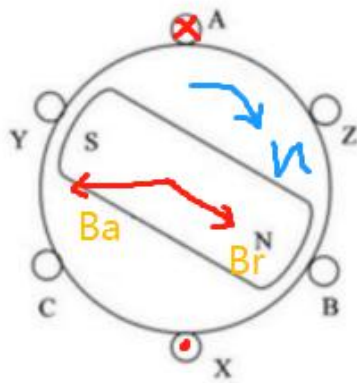
10-5 分析三相直流无刷电机用半桥方式控制时的运行原理



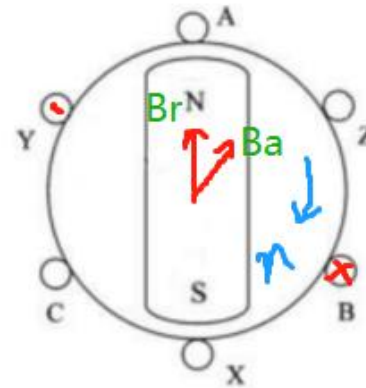
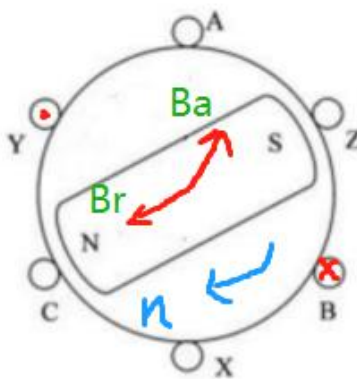
半桥式运行规律表

电角度	$0^{\circ} \sim 120^{\circ}$	$120^{\circ} \sim 240^{\circ}$	$240^{\circ} \sim 360^{\circ}$
导电顺序	A (+)	B (+)	C (+)
V1	--导通--		
V2		--导通--	
V3			--导通--

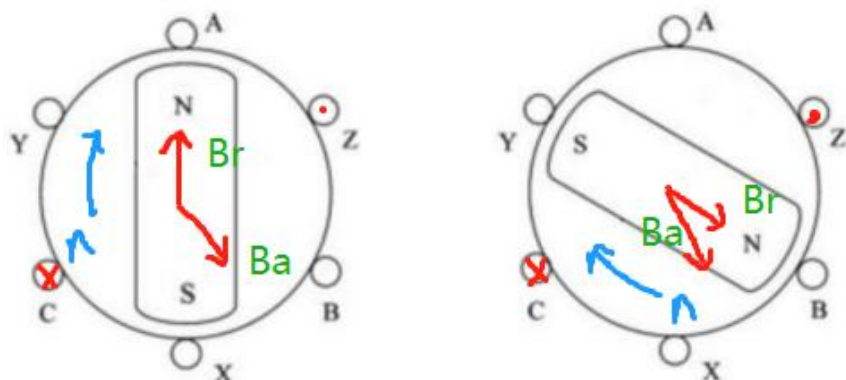
状态1: $0^{\circ} \sim 120^{\circ}$



状态2: $120^{\circ} \sim 240^{\circ}$



状态3: $240^\circ \sim 360^\circ$



课堂练习:

求电流、电磁转矩和转速?

求n-T 曲线, 机械特性表达式?

电流

取A相正向通电 ($0^\circ \sim 120^\circ$ 区间) 来求电枢电流。当A相绕组通电时, 绕组线电压 u_{AB} 等于直流电源电压 U_s , 电势平衡方程为

$$U_s = R_a I_a + E_a + U_T$$

则电枢电流为

$$I_a = \frac{U_s - E_a - U_T}{R_a}$$

当电机堵转时, $n=0$, $E_a=0$, 所以堵转电流为

$$I_{ad} = \frac{U_s - U_T}{R_a}$$

先按照安培力定理，取A相通电的时间区间来求电磁转矩 T 。由于A相导体处于磁通密度幅值为 B_{gm} 的磁场下，流过的电流为 I_a ，因此产生的电磁转矩 T 为

$$T = 2NlB_{gm}I_a \frac{D_a}{2} = K_T I_a \quad (\text{N}\cdot\text{m})$$

机械特性 ■

$$I_a = \frac{U_s - E_a - U_T}{R_a} \quad I_a = \frac{U_s - K_E n - U_T}{R_a}$$

可得电机的转速为

$$n = \frac{U_s - I_a R_a - U_T}{K_E} \quad (\text{r/min})$$

可得机械特性方程式为

$$n = \frac{U_s - U_T}{K_E} - \frac{R_a}{K_E K_T} T = n_{ol} - \frac{R_a}{K_E K_T} T$$

式中， $n_{ol} = \frac{U_s - U_T}{K_E}$ 为理想空载转速。

电机堵转时的转矩为 $K_T I_{ad} = K_T \frac{U_s - U_T}{R_a}$

第七章

● 步进电动机的工作原理

反应式步进电机工作原理：

根据输入的电脉冲信号，每改变一次通电状态，就会转换成相应的角位移或线位移，若不改变通电状态，则静止不动；其输出的角位移或线位移与输入脉冲数成正

比，转速与脉冲频率成正比，它和 BLDC 的区别在于控制信号的区别；电脉冲信号所引起的磁阻转矩带动转子转动

混合式步进电机工作原理：

利用永磁磁场和变磁阻的原理来控制；只有转子磁场和定子磁场相互作用下，电动机才产生电磁转矩，将电机转子拉向稳定平衡位置，该稳定平衡位置为时通电相磁路的磁阻最小的位置，

一般定转子之间异极性时，极下磁阻最小，同极性时，极下磁阻最大；

● 步进电动机的特性

三相步进电机定子上有六个磁极，由于定子和转子上皆有小齿，所以也就存在了两个运动参数

齿距角：

转子相邻两齿间的夹角

$$\theta_t = \frac{360^\circ}{Z_R} \quad Z_R \text{ 为转子齿数}$$

步距角：

θ_b ：每输入一个脉冲电信号，转子转过的角度。

$$\theta_b = \frac{\theta_t}{N} = \frac{360^\circ}{Z_R N}$$

N 为运行拍数，通常为相数的整数倍。

由于步进电机的控制方式来源于脉冲信号，当同一电机采用不同供电方式时，步距角可能会有两种不同的数值

● 步进电动机的控制方法和稳态特性

一个循环并不意味着转一圈！！

控制方式：

步进电机工作时，每相绕组由专门驱动电源通过环形分配器按一定规律轮流通电。



励磁方式 { 分配方式
状态数、拍数 { 单拍制分配：状态数=相数
双拍制分配：状态数=2相数
$$f_{\text{相}} = \frac{f}{N}$$

一次循环通电 N 次，即为拍数，但每相上面脉冲次数只为 1（单 \times 拍），所以电脉冲频率是每相脉冲电压的 N 倍！

转速控制：

$$n = \frac{60f}{Z_R N} \quad (\text{r/min})$$

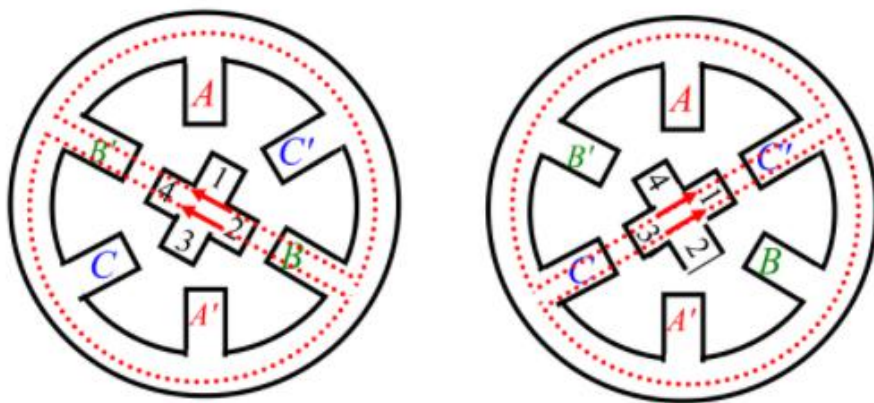
f 为控制脉冲的频率，即每秒输入的脉冲数。

转向控制：改变绕组通电顺序！！

反应式步进电机：

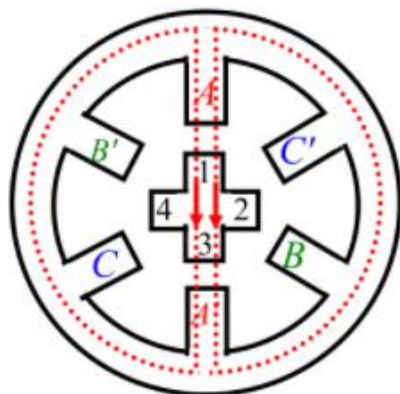
三相单三拍：由三相绕组控制每次单相通电，三次通电一个循环，A-B-C

- (1) 每来一个电脉冲，转子转过 30° 。此角称为步距角，用 θ_s 表示。
- (2) 转子的旋转方向取决于三相线圈通电的顺序，改变通电顺序即可改变转向。
- (3) 转速取决于各绕组通电和断电的频率（即输入的脉冲频率）。



同理， B 相通电，转子2、4齿和 B 相轴线对齐，相对 A 相通电位置转 30° ； C 相通电再转 30° 。

三相单双六拍：A-AB-B-BC-C-CA 一个循环 (步距角时单三拍一半)



A相通电，转子1、3齿和AA'相对齐。

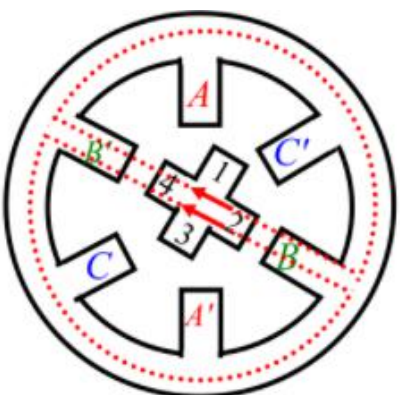


A、B相同时通电

(1) BB' 磁场拉住 2、4 齿。

(2) AA' 磁场继续拉住 1、3 齿。

转子转到两磁拉力平衡的位置上。
相对AA'通电，转子转了15°。



B相通电，转子2、4齿和BB'相对齐，
又转了15°。



B、C相同时通电

(1) BB' 磁场继续拉住 2、4 齿。

(2) CC' 磁场拉住 1、3 齿。

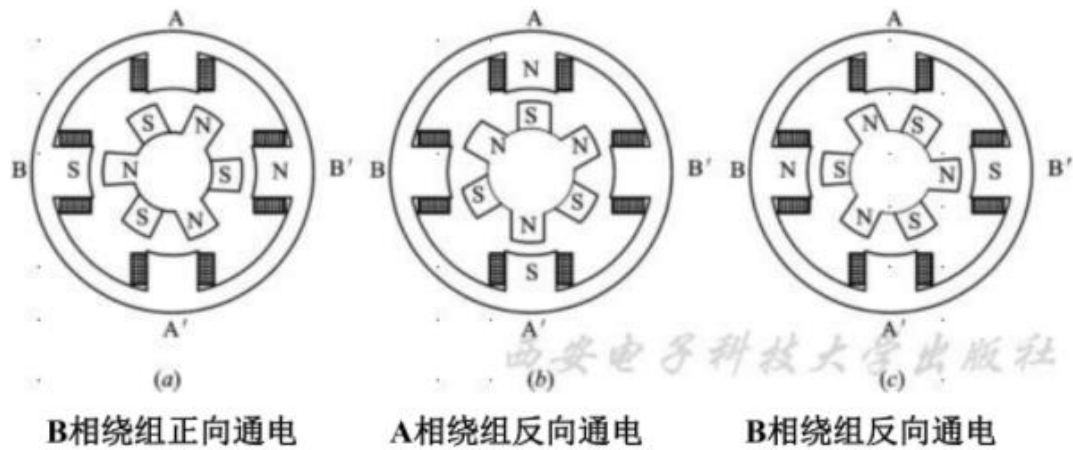
转子转到两磁拉力平衡的位置上。
转子又转了15°。

三相双三拍：AB-BC-CA 一个循环，步距角和单三拍一样，只不过提供了更大的电磁转矩

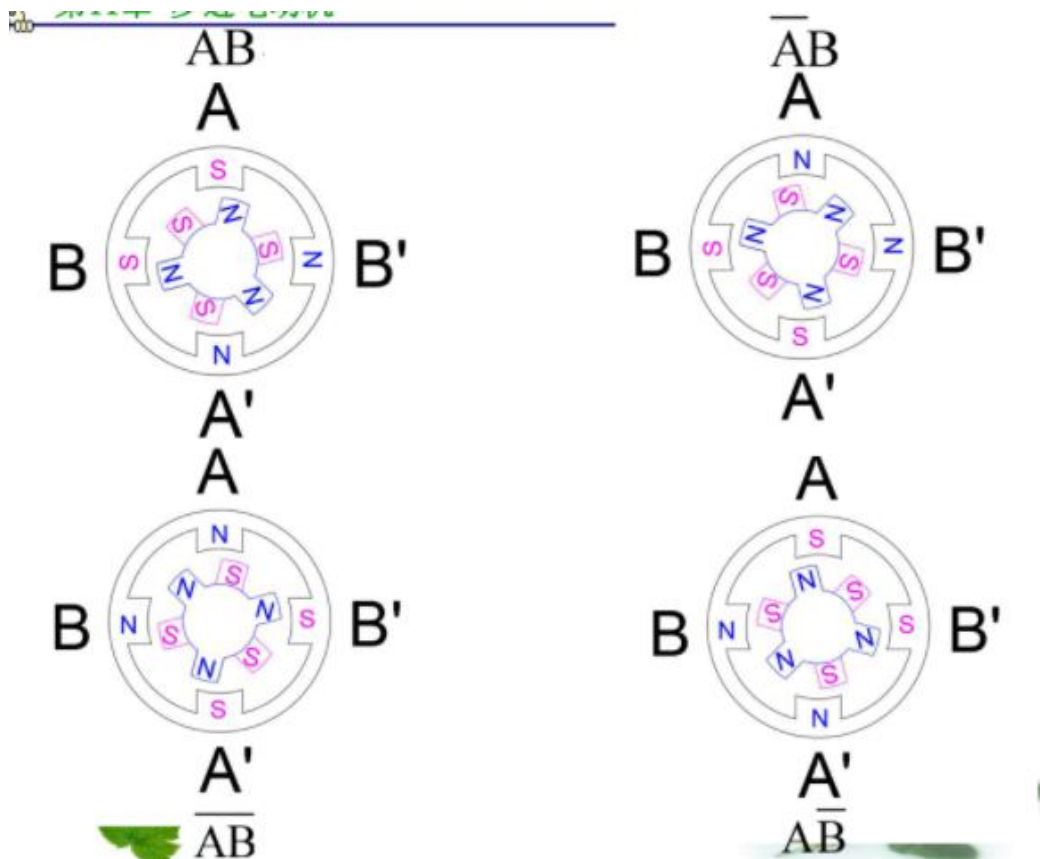
四相单四排，单双八拍，双四拍和三相一样分析即可！！不作赘述！

混合式步进电机：

两相单四拍：A-B-非A-非B



两相双四拍：AB-非AB-非A非B-A非B



两相单双八拍（半步运行）：A-AB-B-B非A-非A-非A非B-非B-非BA

● 步进电动机和无刷直流电动机的异同

异：

结构上前者定，转子上有小齿，比后者多绕组和转子磁铁

控制信号上，前者为电脉冲，不连续后者为方波信号

前者具有自锁能力，后者没有

同：

转子上都有永磁铁（混合式）

定子磁场都是跳跃式，不连续的

● 步进电动机电动机习题

一台五相十拍运行的步进电动机，转子齿数 $Z_R = 48$ ，在A相绕组中测得电流频率为 $600H_Z$

? 求电机的步距角、转速



:

$$\theta_b = \frac{360^\circ}{Z_R N} = \frac{360^\circ}{48 \cdot 10}$$

$$n = \frac{60f}{Z_R N} = \frac{60 \times 60}{48 \times 10}$$

独家整理

● 五种电机的异同

	直流电机	异步交流电机	永磁同步电机	无刷直流电机	步进电机
结构	电刷，换向器	鼠笼型，绕线型	转子永磁体的表贴式和内置式	电子换向，位置传感器，无电刷	转子无绕组，转子定子上有小齿，无电刷
原理	转子在定子 恒定磁场 中运动	转子 旋转磁场 中运动，一定的滞后性	转子嵌入永磁体在 旋转磁场 中运动	转子嵌入永磁体在定子产生的 脉励式旋转磁场 中运动	凸极转子 横轴磁阻 与 直轴磁阻 之差所引起的磁阻转矩转动
控制信号	直流	交流（正弦波）	交流（正弦波），直流	直流（方波，正弦波）	直流脉冲信号
效率	平均效率适中	平均效率较高	平均效率高	平均效率高	平均效率比较低
转速	低，受电刷机械特性影响	高	较高	高，不受电刷机械特性影响	低，精准的转矩和力矩
电磁噪声	高	较低	低	低	较高
成本	低	低	较高	较高，转子内嵌永磁体	低
寿命	较短	长	较长	较长	长

