

第1章 电动机的工作原理及特性

- 掌握直流电动机的电势方程式，转矩方程式和电压平衡方程式；三相异步电动机的同步转速和转差率的概念；
掌握电动机的机械特性，特别是人工机械特性；
- 掌握电动机起动，制动，调速的各种方法和应用场所；
- 了解用机械特性来分析电动机运行状态的方法；
- 了解常用控制电机的应用场合。

1.1 直流电机的工作原理及特性

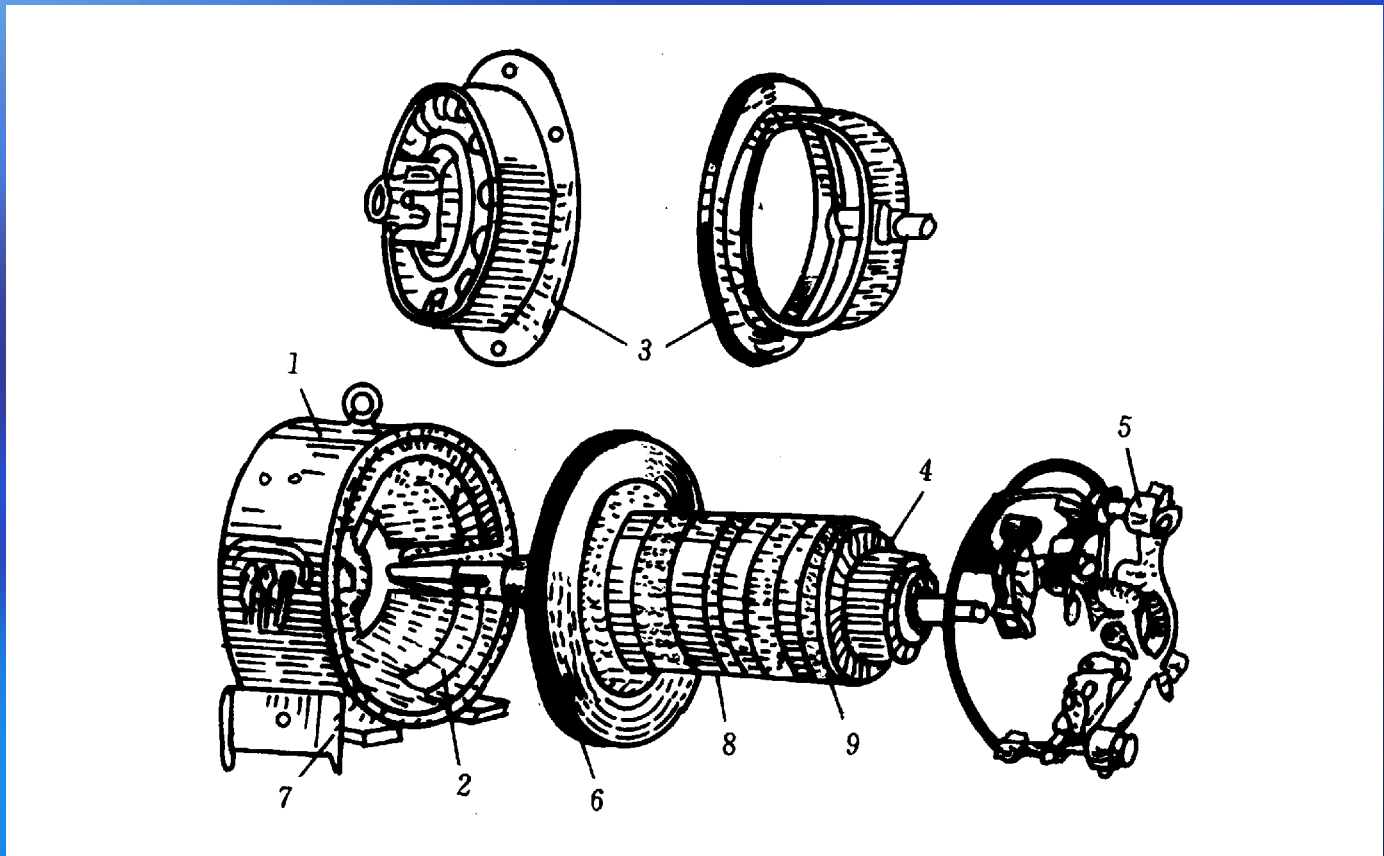
■ 1. 直流电机的基本结构

主磁极

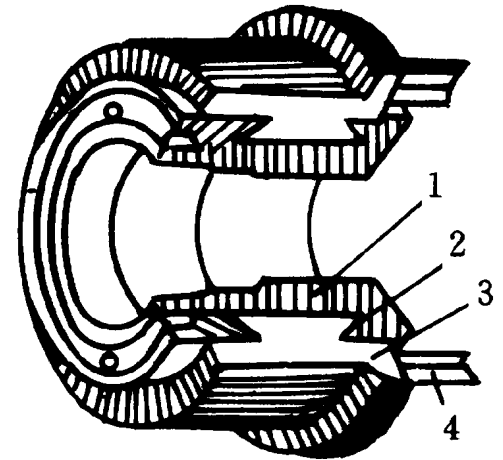
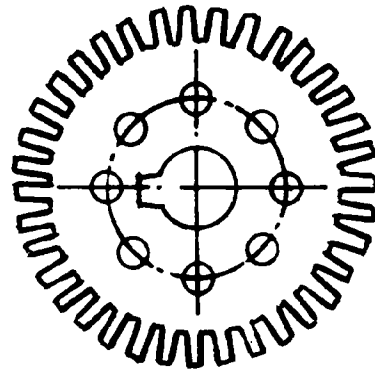
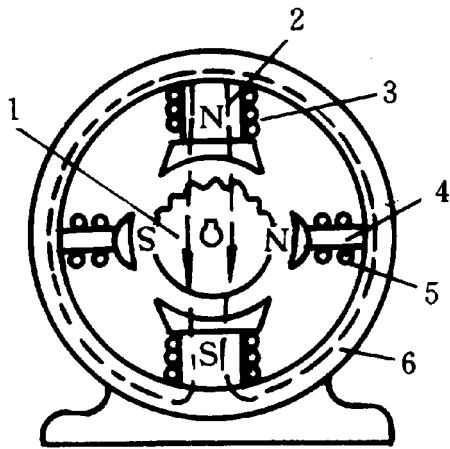
电枢

换向器

电刷装置



直流电机的结构图



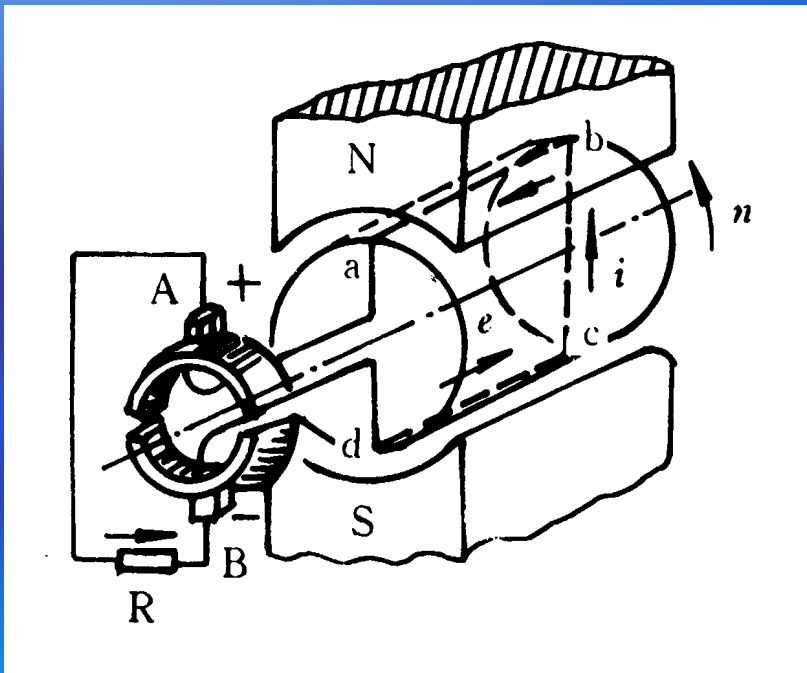
剖面图：电枢 1 ；
主磁极 2 ；换向
极 4 ；机座 6

电枢铁心冲片

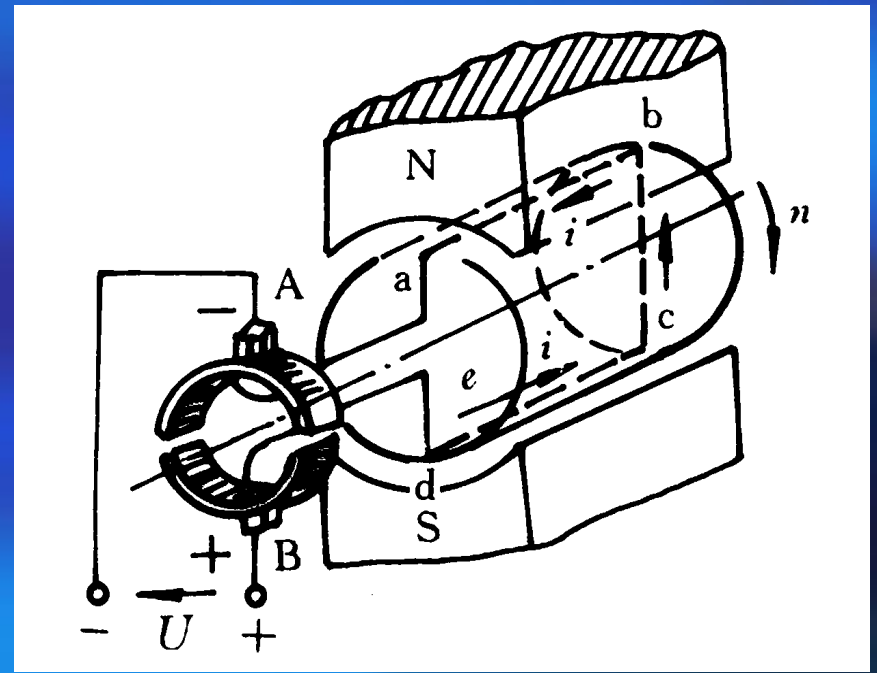
换向器：换向片 3 ；
连接片 4 ；云母环 2

2. 直流电机的基本工作原理

简化为一对磁极，一个线圈



发电机



电动机

2. 直流电机的基本方程式

■ 1) 感应电势 E

$$E = K_e \phi n$$

式中： E - 电动势 (V);

■ ϕ - 一对磁极的磁通 (Wb);

■ n - 电枢转速 (r/min);

■ K_e - 与结构有关的常数。

■ 2) 电磁转矩 T

$$T = K_t \phi I_a$$

式中：

■ T - 电磁转矩 (Nm);

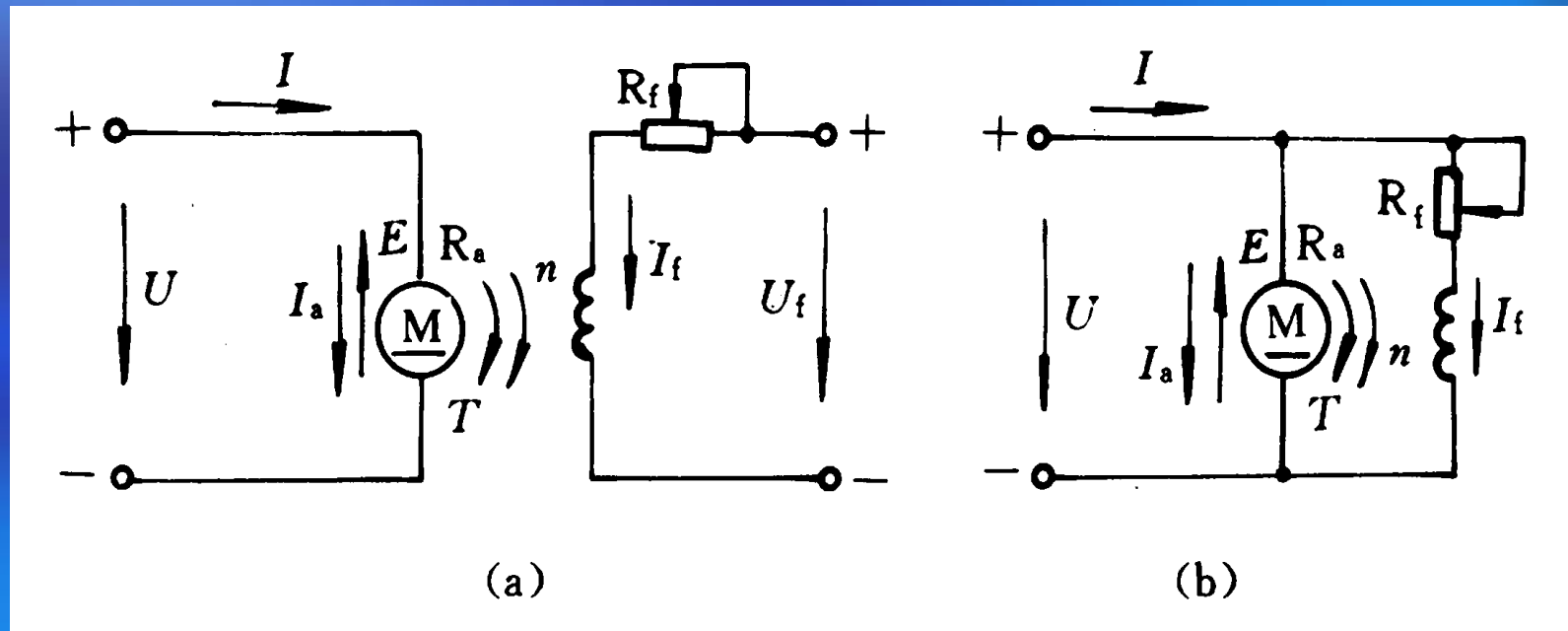
■ ϕ - 一对磁极的磁通 (Wb);

■ I_a - 电枢电流 (A);

■ K_t - 与结构有关的常数。

3. 直流电动机的机械特性

- 1. 他激和并激直流电动机的机械特性
- 1) 原理电路图



1) 直流电动机机械特性方程式

■ 直流电动机电枢电压平衡方程式

$$U = E + I_a R_a$$

■ 式中, R_a 为电枢电阻. 以

$$E = K_e \phi n$$

■ 代入得:

$$n = \frac{U}{K_e \phi} - \frac{R_a}{K_e \phi} I_a$$

■ 由

$$T = K_t \phi I_a$$

■ 将 I_a 值再代入, 得:

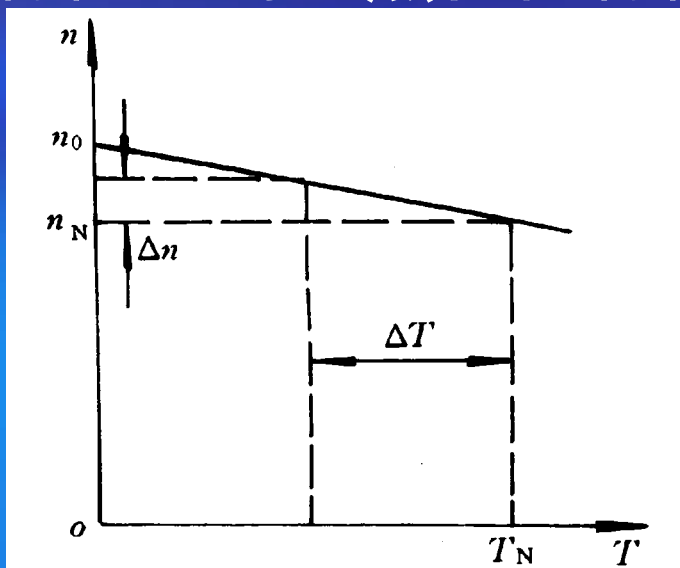
$$n = \frac{U}{K_e \phi} - \frac{R_a}{K_e K_t \phi^2} T = n_0 - \Delta n$$

上式为直流电动机机械特性的一般表达式

机械特性曲线 $n=f(T)$

$$n = \frac{U}{K_e \phi} - \frac{R_a}{K_e K_t \phi^2} T = n_0 - \Delta n$$

- 4. 固有（自然）机械特性和人工机械特性
- 1) 他激直流电动机的自然机械特性（正转）
- 在额定电压，额定磁通，电枢电路内不外接电阻时的机械特性即为自然机械特性。



额定负载时，转速降落不多，是硬特性；

金属切削机床，冷轧机，造纸机等宜于选用硬特性的电动机。

■ 2) 自然机械特性曲线的作法

■ 已知电动机的 P_N, U_N, I_N, n_N , 由公式可计算出 R_a ,

$K_e \Phi_N$ n_0, T_N , 找出两个点, 即理想空载点 $(0, n_0)$ 和额定运行点 (T_N, n_N) , 通过这两点作出自然机械特性。

■ (1) 电枢电阻 R_a 的估算:

$$R_a = (0.50 - 0.75) \left(1 - \frac{p_N}{U_N I_N} \right) \frac{U_N}{I_N}$$

■ (2) 理想空载转速 n_0 计算:

$$n_0 = \frac{U_N}{K_e \phi_N}$$

$$K_e \phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N}$$

■ (3) 额定转矩 T_N 的计算:

$$T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N}$$

3) 举例

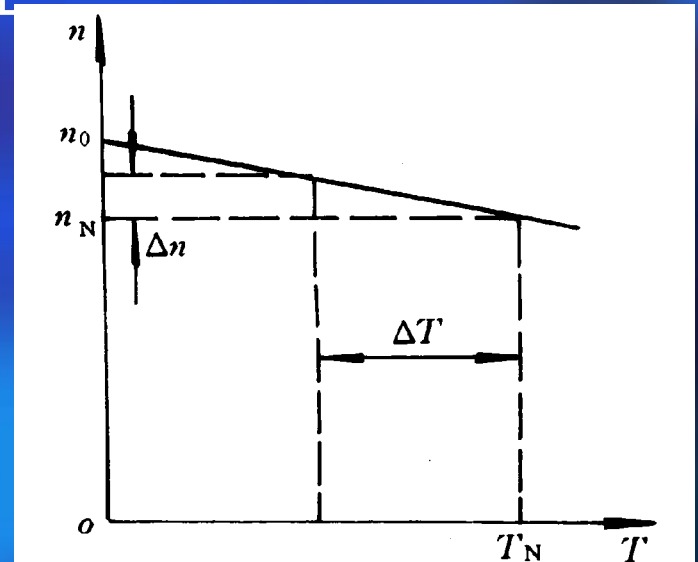
- (1) 一台 Z2-51 型直流他激电动机，已知额定功率 5.5kW，额定电压 220V，额定电流 31A，额定转速 1500r/min，忽略损耗，求自然机械特性。
- 解：分析 只要求出理想空载点和额定运行点，就可绘出机械特性。

$$R_a = (0.50 - 0.75) \left(1 - \frac{P_N}{U_N I_N} \right) \frac{U_N}{I_N} = 0.71$$

$$K_e \phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = 0.132$$

$$n_0 = \frac{U_N}{K_e \phi_N} = 1667 \text{r/min}$$

$$T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N} = 35 \text{Nm}$$

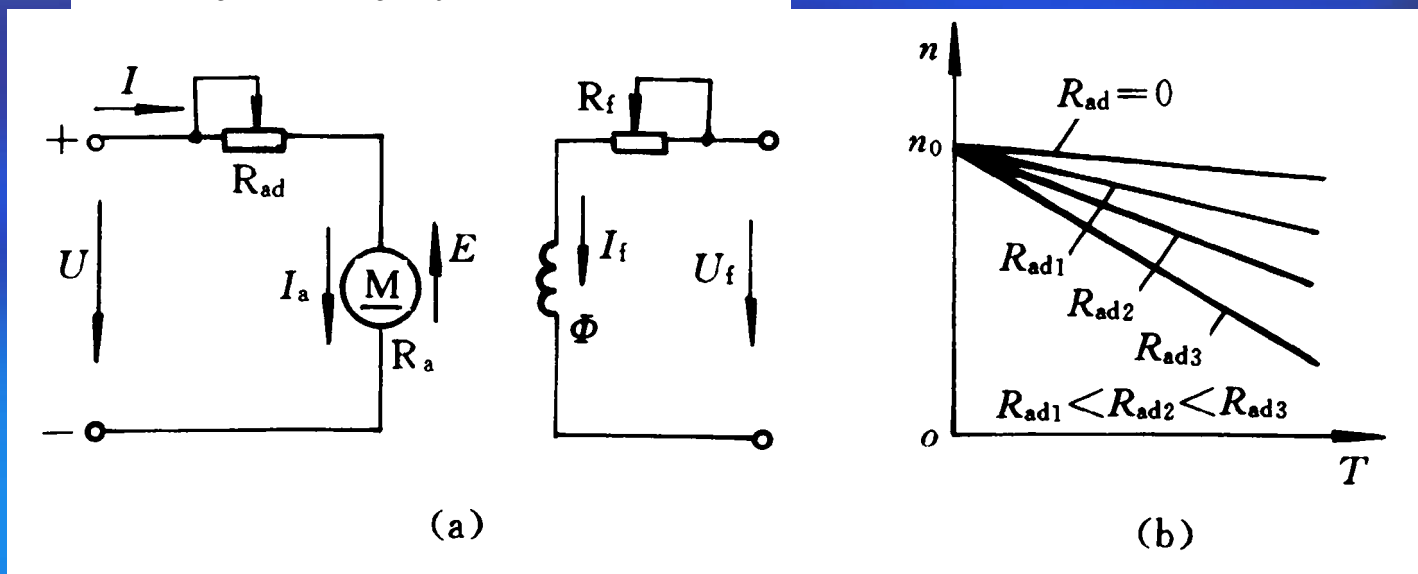


4) 电动机人工机械特性 (三种)

$$n = \frac{U}{K_e \phi} - \frac{R_a}{K_e K_t \phi^2} T = n_0 - \Delta n$$

- (1) 电枢回路串附加电阻 R_{ad} 的人工机械特性
- 在自然机械特性方程式中，用 $(R_{ad} + R_a)$ 代替 R_a ，得到串电阻的人工机械特性方程式：

$$n = \frac{U_N}{K_e \phi} - \frac{R_{ad} + R_a}{K_e K_t \phi^2} T = n_0 - \Delta n$$



附加电阻 R_{ad} 越大，机械特性越软。

(2) 改变电枢电压的人工机械特性

$$n = \frac{U}{K_e \phi} - \frac{R_a}{K_e K_t \phi^2} T = n_0 - \Delta n$$

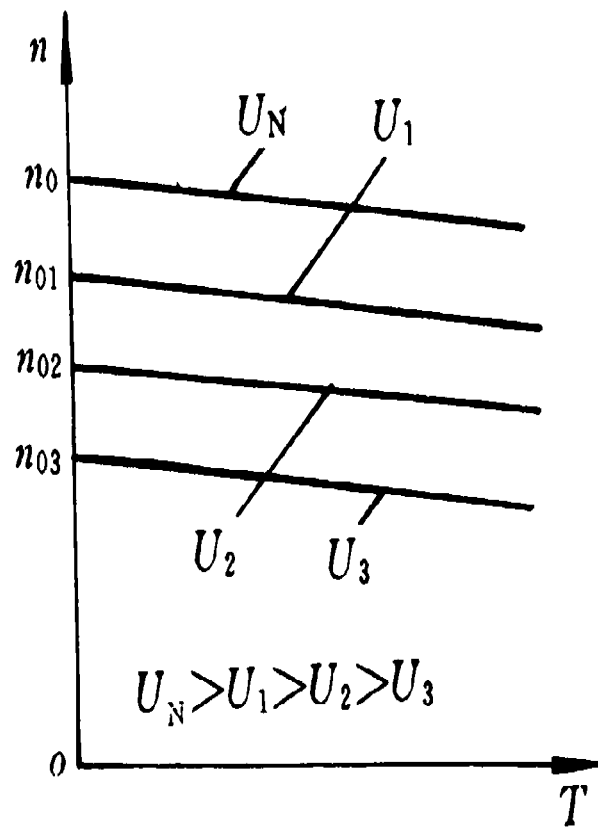
$$n_0 = \frac{U_N}{K_e \phi_N}$$

随 U 的变化而变化

U 改变，但转速降不变

因此，变电枢电压的人工机械特性是一簇与自然机械特性平行的特性曲线。

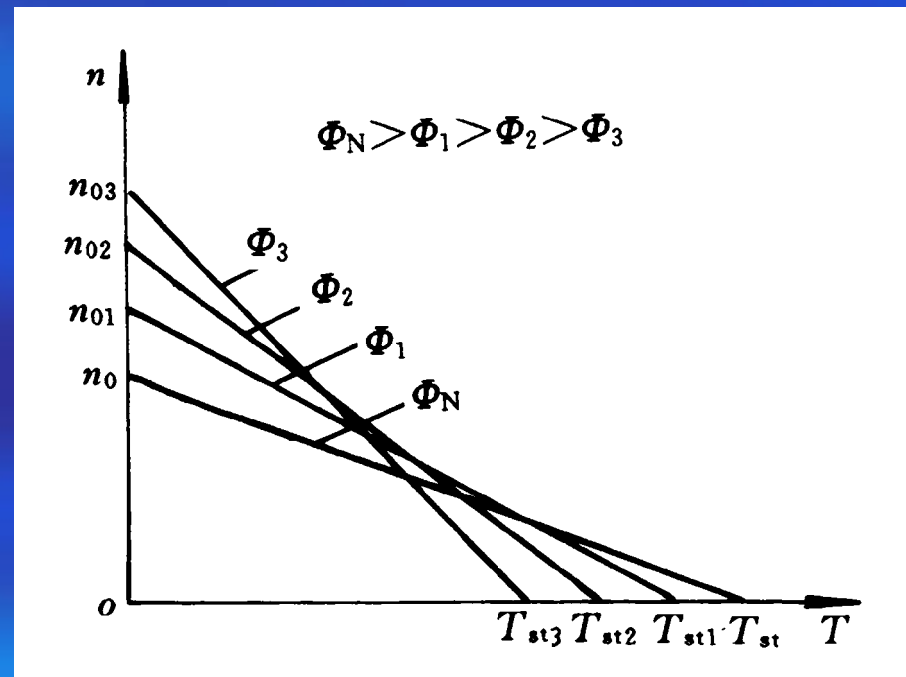
只允许在额定电压以下调节。
在后面的自动调速系统学习中有广泛的应用。



(3) 改变磁通的人工机械特性

$$n = \frac{U}{K_e \phi} - \frac{R_a}{K_e K_t \phi^2} T = n_0 - \Delta n$$

- 从机械特性方程可知，改变磁通时，电动机的理想空载转速和转速降落都会随磁通的变化而变化。
- 磁通只能在额定值以下调节，理想空载转速和转速降落都要增大 ----- 弱磁增速。
- 使用中，要防止电动机过载，更要防止飞车，因此，直流他激电动机设有失磁保护。



串激直流电动机的机械特性

- 1) 特点：电枢电流就是激磁电流。

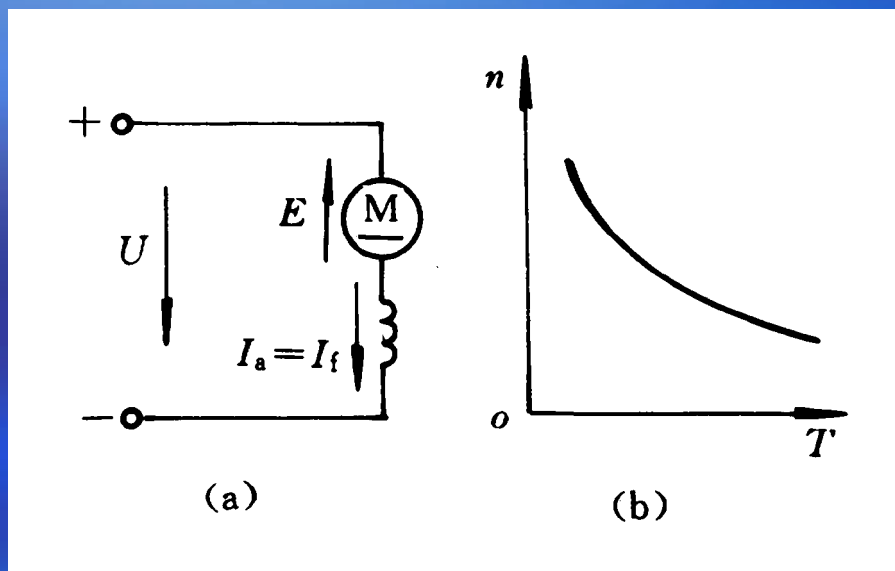
- 2) 机械特性分析：

- 第一段，电动机轻载时，机械特性具有双曲线的形状，理想空载转速趋近无穷大。

- 第二段，电动机负载较重时，磁路趋于饱和，机械特性近似一条直线。

- 3) 注意事项：

- 直流串激电动机不允许空载运行 ---- 飞车事故。



4 直流他激电动机的起动特性

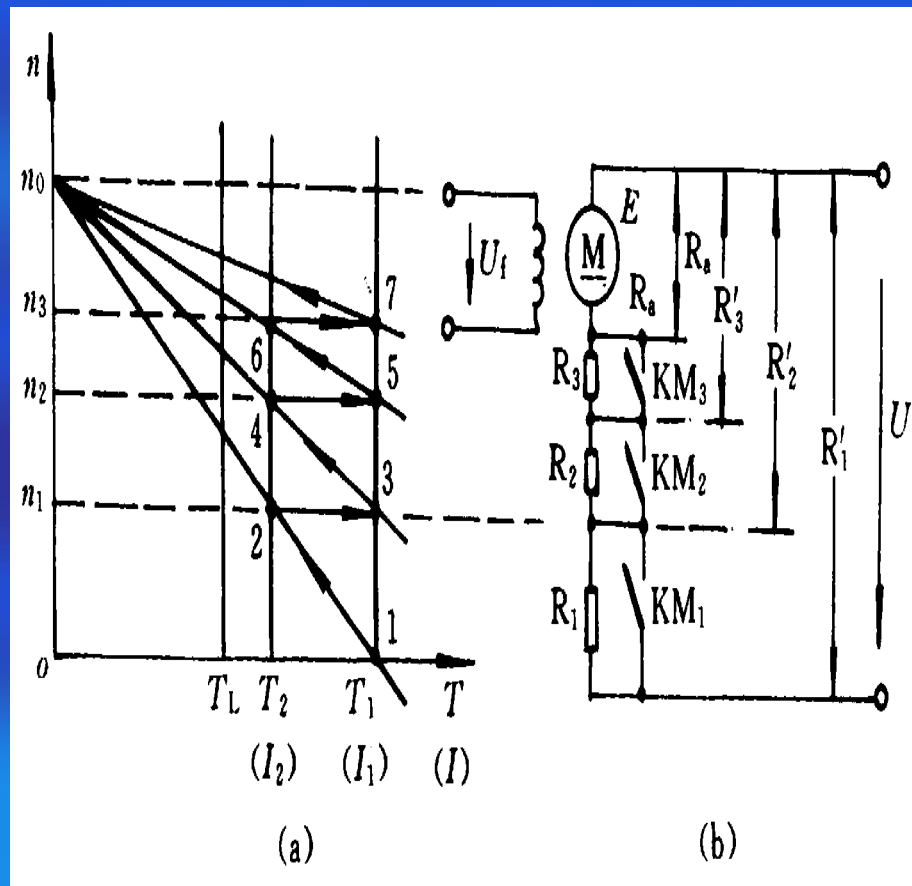
- 直流他激电动机的起动电流是额定电流的(10-20)倍,不允许直接起动.限制其起动电流的方法有两种.

1. 降压起动:

组成 SCR-M 自动调速系统的起动环节,是后面学习的一个重点.

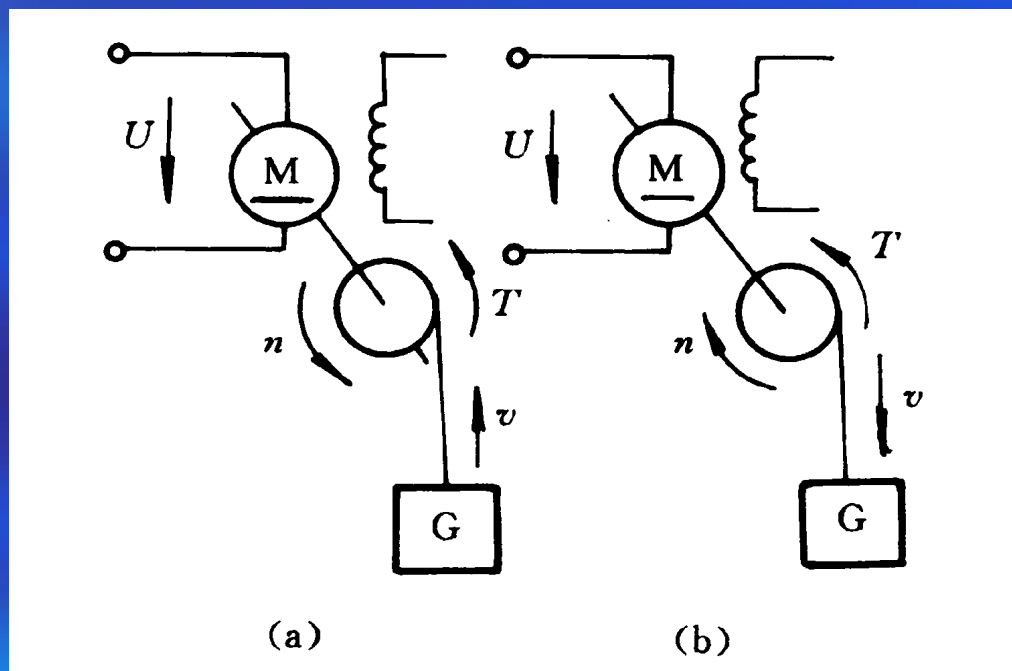
2. 电枢电路串外接电阻起动

右图为具有三段起动电阻的他激电动机电路原理图和起动特性,其起动特性就是前面刚刚学习过的一种人工机械特性.



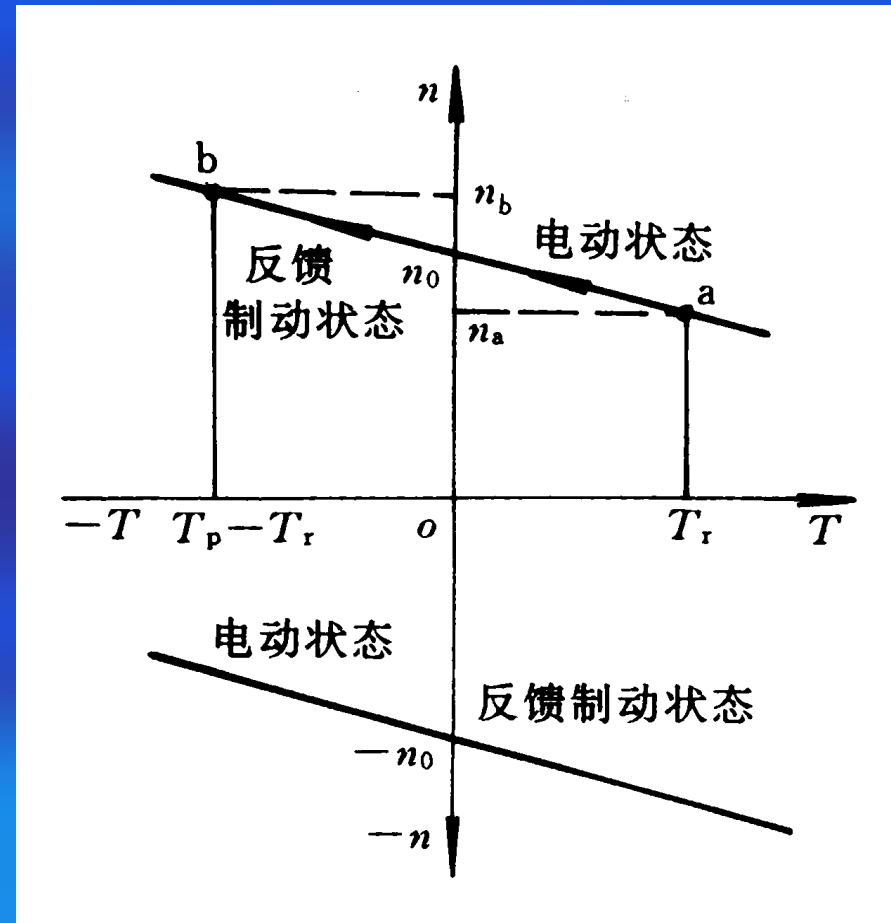
5. 直流他激电动机的制动特性

- 直流他激电动机的工作状态分为电动状态和制动状态，如右图所示。
 - 图中，(a) 为电动状态；
 - (b) 为制动状态。
- 1) 特点：电动机的转矩 T 与转速 n 方向相反，电机处于发电工作状态。
 - 2) 制动形式：稳定的制动状态；
过渡的制动状态。
 - 3) 制动方法有 3 种：
 - 反馈制动；
 - 反接制动；
 - 能耗制动



1. 反馈制动

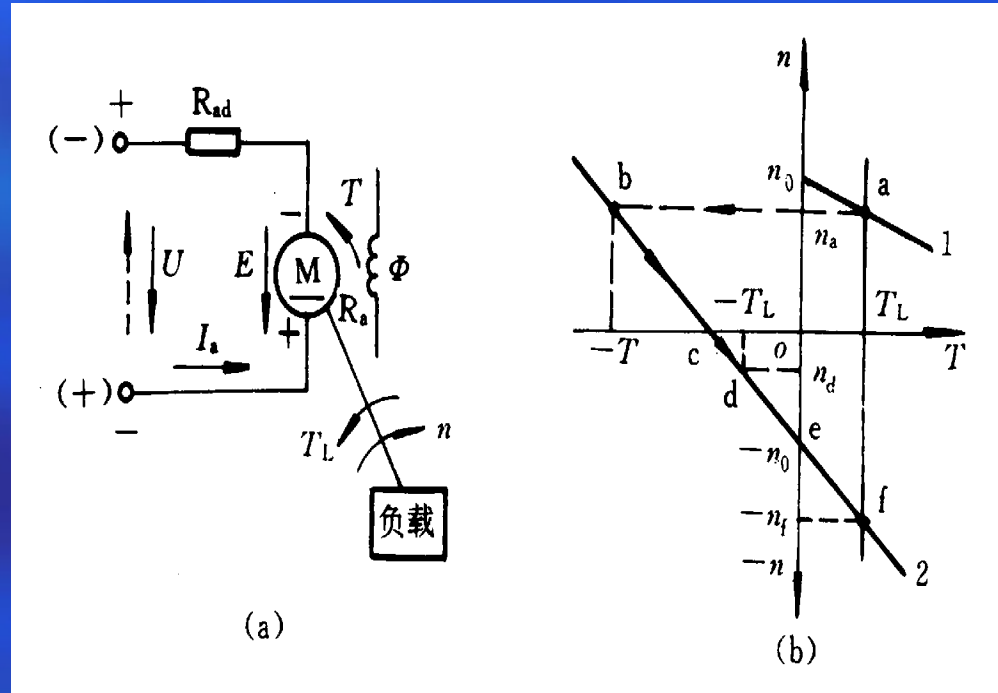
- 1) 实现条件：外部作用使电动机的转速 n 大于其理想空载转速 n_0 。如，电车下坡，起重机下放重物。
- 2) 机械特性：正转时，是第一象限的机械特性在第二象限内的延伸，如右图所示。
- 3) 特点：
 - (1) 利用位能转矩带动电动机发电，将机械能变成电能，向电源馈送。
 - (2) 重物下放时电动机的转速仍高于理想空载转速，运行不太安全。



2. 反接制动

- 1) 实现条件：电枢电压或电枢电势反向。
- 2) 分类：
 - (1) 电源反接制动。改变电枢电压 U 的方向所产生的制动。
- 机械特性方程式为；

$$n = \frac{-U}{K_e \phi} - \frac{R_a + R_{ad}}{K_e K_t \phi^2} T$$

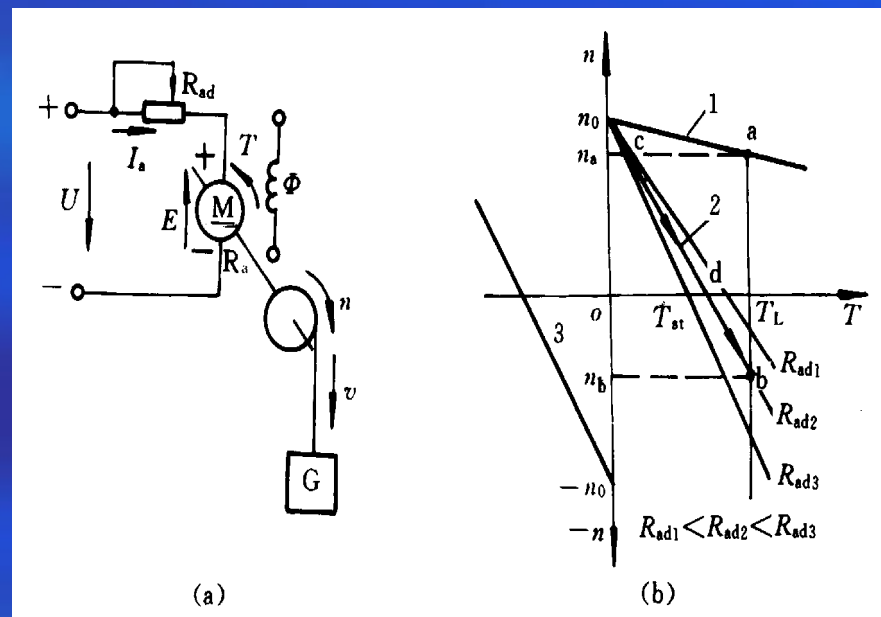


为了限制制动时比较大的电枢电流，实施电源反接制动时，一定要在电枢电路中串入限流电阻。

应用需要迅速减速或频繁正反转的机械上。

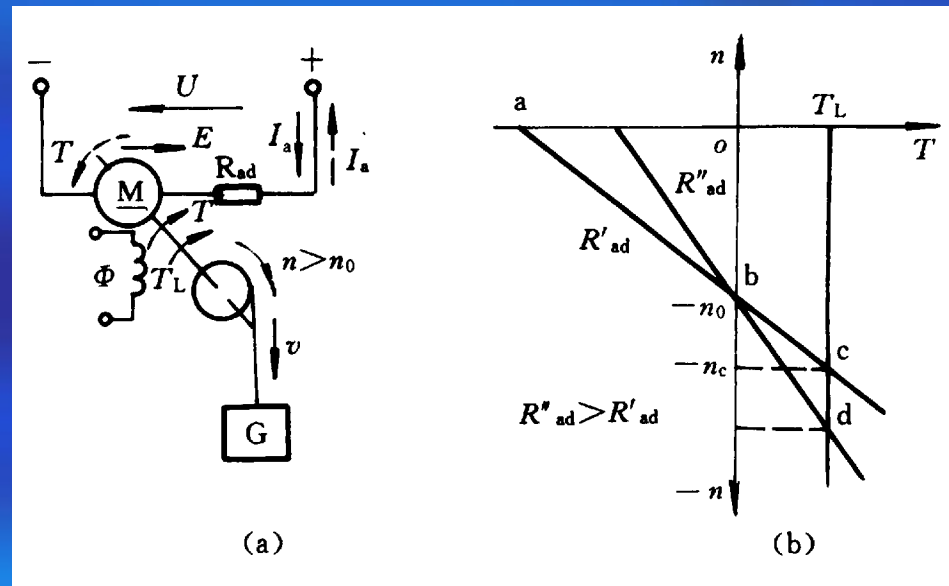
反接制动

- (2) 倒拉反接制动. 改变电枢电势方向所产生的制动.
- 如: 起重机的重物下降时, 电枢反转, 电势反向. 此时, 位能负载转矩 T_L 使重物下放, 电动机转矩 T_M 反对重物下放 ----- 制动.
- 特点: 适当选择电枢电路中的附加电阻, 可以得到低的转速, 保证安全;
- 转速稳定性较差.
- 制动特性如右图所示. 是第一象限在第四象限的延伸或第三象限在第二象限的延伸.



3. 能耗制动

- 1) 实现条件：将电枢电压突然降为零，串一外接电阻使电枢短接。此时电动机继续旋转产生的转矩 T 与 n 反向 ----- 制动。
- 2) 特点：制动时的机械能转变为电能使外接电阻发热而消耗，称之为“能耗”；
■ 稳定性好，电动机不可能反向起动。
- 3) 应用：要求迅速准确停车的场合；重物恒速下放。



6. 直流他激电动机的调速特性

$$n = \frac{U}{K_e \phi} - \frac{R_a + R_{ad}}{K_e K_t \phi^2} T$$

- 由直流他激电动机人工机械特性方程式
- 直流电动机的调速方法：

式中， K_e, K_t, R_a 均为常数，因此，电动机有 3 种调速方法

1. 变电枢电路外接电阻 R_{ad} ;
2. 变电枢电压 U ;
3. 变磁通 ϕ 。

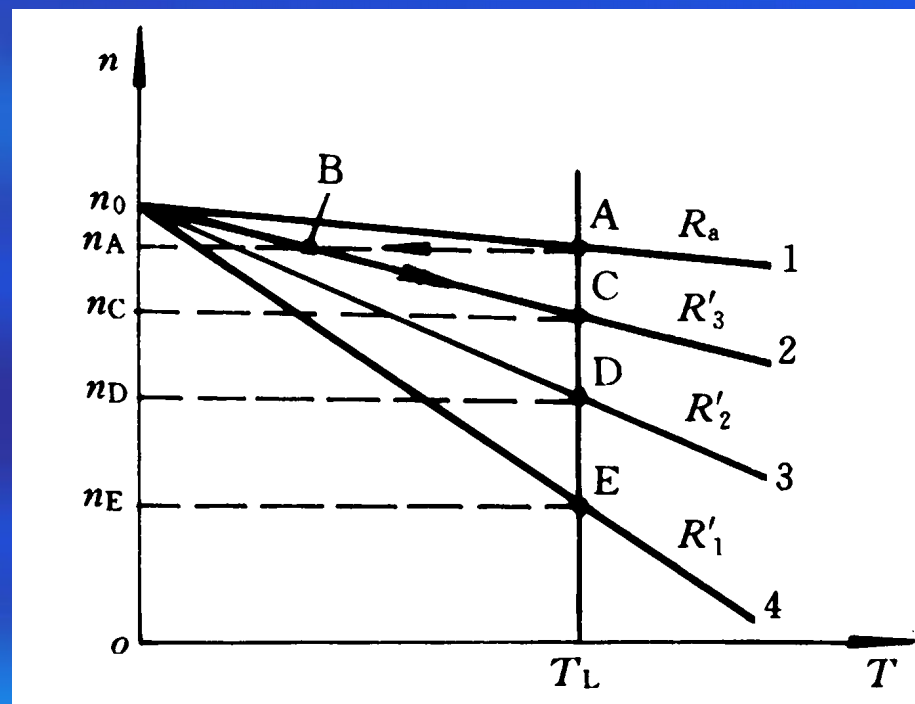
1. 改变电枢电路外接电阻调速

■ 电动机电枢电路串电阻后，其人工机械特性如右图示。

1) 应用： 起重机，卷扬机；

2) 缺点：机械特性软，实现无级调速困难；

3) 注意：串电阻调速与起动特性相似，但起动电阻与调速电阻不同。

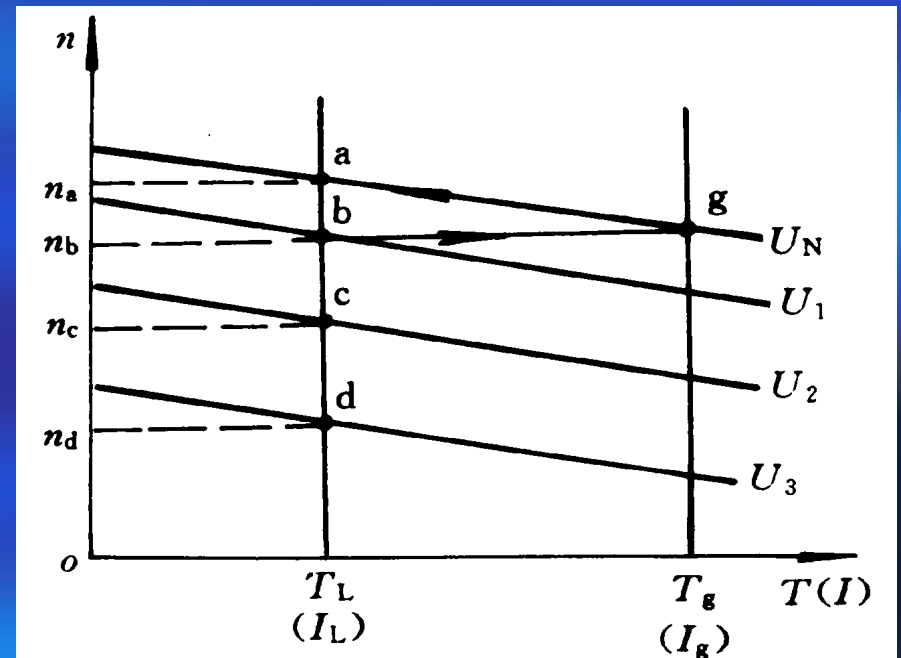


2. 改变电动机电枢供电电压调速

■ 变电枢电压调速的机械特性如右图。

1) 特点：容易实现无级调速；机械特性是一组平行线，硬度不变；不需其他起动设备。

2) 应用：适用于恒转矩负载，组成 SCR-M 系统，在工业生产中广泛应用。第 11 章将重点学习。



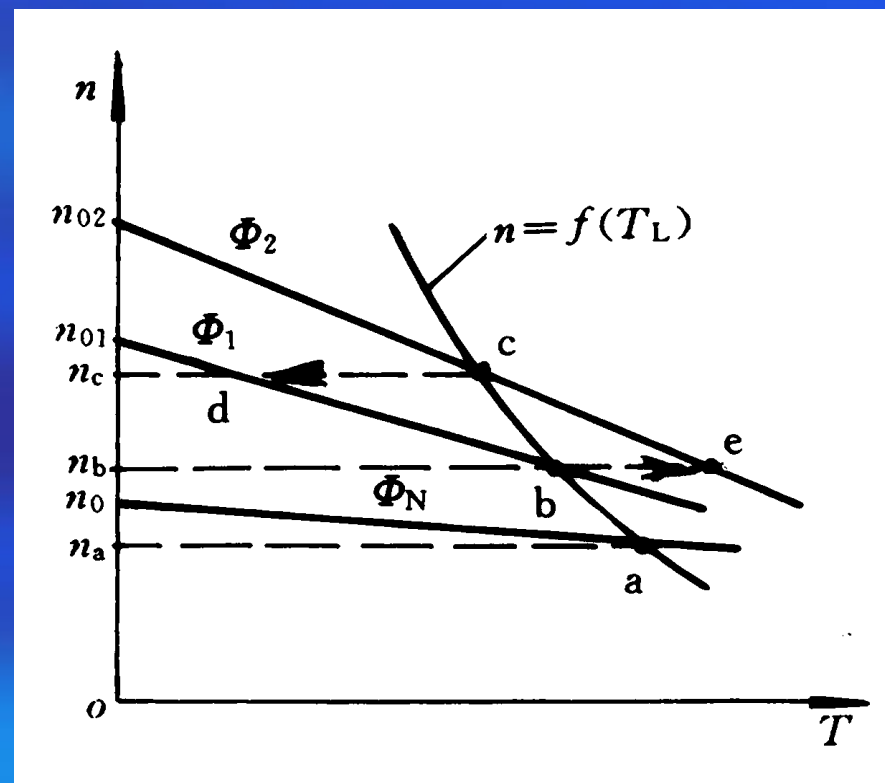
3. 改变电动机主磁通调速

■ 变磁通调速的机械特性如右图示。

1) 特点：可以实现无级调速；机械特性软；调速范围不大。

2) 应用：适用于恒功率负载。一般与调压配合使用。

3) 注意：在额定转速以上调节 ----- 弱磁增速。



例题

- 例：一台直流他激电机的额定数据为； $P_N=2.2\text{kW}$, $U_N=220\text{V}$, $I_N=12.4\text{A}$, $n_N=1500\text{r/min}$, $R_a=1.7$ 欧；如果电动机在额定转矩下运行，求 (1) 电动机的电枢电压降到 180V 时，电动机的转速是多少？(2) 激磁电流 $I_f=I_{fM}$ (即磁通为额定值的 0.8 时) 时，电动机的转速是多少？(3) 电枢电路串入 2 欧的附加电阻时，电动机的转速是多少？

- 解 (1) 此时, $U=180\text{V}$, $R_a=1.7$ 欧

$$T = T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N} = 9.55 \frac{2200}{1500} = 14$$

$$K_e \phi = K_e \phi = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 12.4 \times 1.7}{1500} = 0.13$$

$$n = 1962$$

$$K_t \phi = 9.55 K_e \phi = 9.55 \times 0.13 = 1.24$$

$$K_e K_t \phi^2 = 0.13 \times 1.24 = 0.16$$

$$n = \frac{U}{K_e \phi} - \frac{R_a}{K_e K_t \phi^2} T_N = \left(\frac{180}{0.13} - \frac{1.7}{0.16} \times 14 \right) = 1236$$

例题求解

(2) 此时, $U=U_N=220V, R_a=1.7 \text{ 欧}$

$$K_e \phi = 0.8 K_e \phi_N = 0.1$$

$$K_t \phi = 9.55 K_e \phi = 0.99$$

$$K_e K_t \phi^2 = 0.099$$

$$n = \frac{U_N}{K_e \phi} - \frac{R_a}{K_e K_t \phi^2} T_N = \left(\frac{220}{0.1} - \frac{1.7}{0.099} \right) \times 14 = 1962 \text{ r/min}$$

(3) 此时, $U=U_{Na}=220V$; 电枢电路总电阻 $R=R_a+R_{ad}$
 $=1.7+2=3.7$

$$K_e \phi = 0.13$$

$$K_t \phi = 1.24$$

$$K_e K_t \phi^2 = 0.16$$

$$n = \frac{U_N}{K_e \phi_N} - \frac{R_a + R_{ad}}{K_e K_t \phi^2} T_N = \left(\frac{220}{0.13} - \frac{3.7}{0.16} \right) \times 14 = 1368$$

(以上转速单位为 r/min)

n)

1.2 000000000000000000

1). 000000000000

000000000000 , 0000000000 .

(1) 00

00000 , 00 , 0000000 .

000 0.5mm 00000000 ;

0000000000000 ;

0000000000 , 0000000000000 .

(2) 00

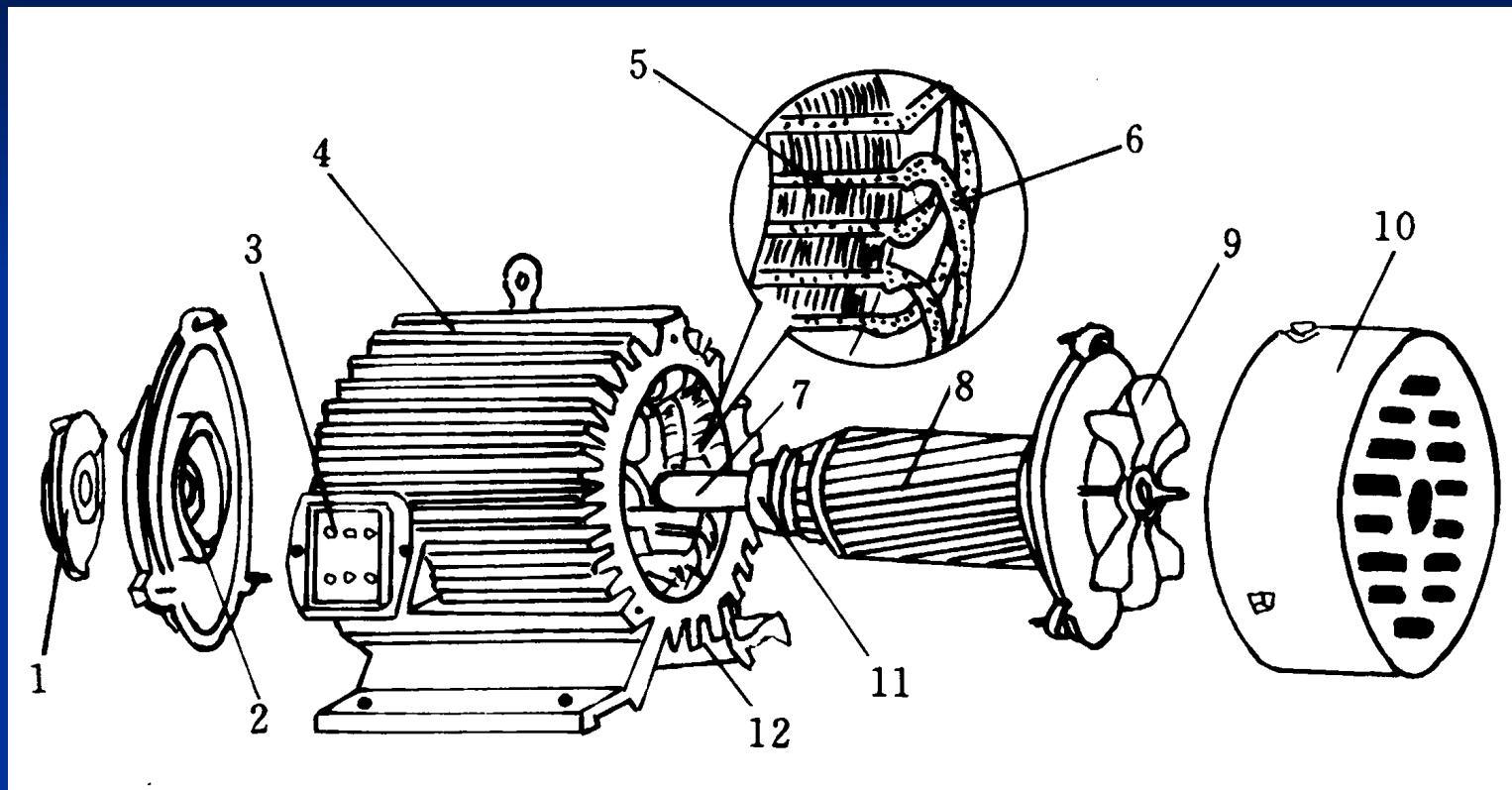
0000000000 .

000000000000 , 0000000 ;

00000000000000 .

000000000000 , 0000 .

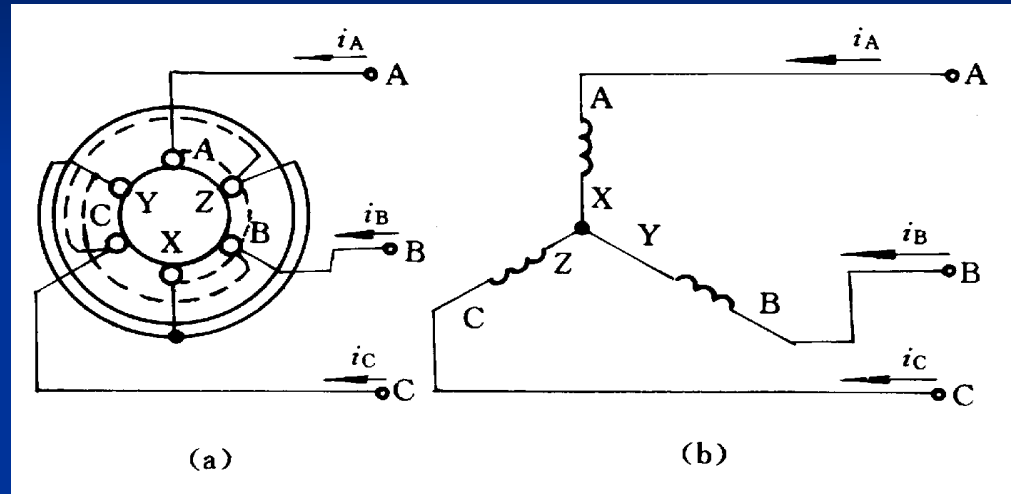
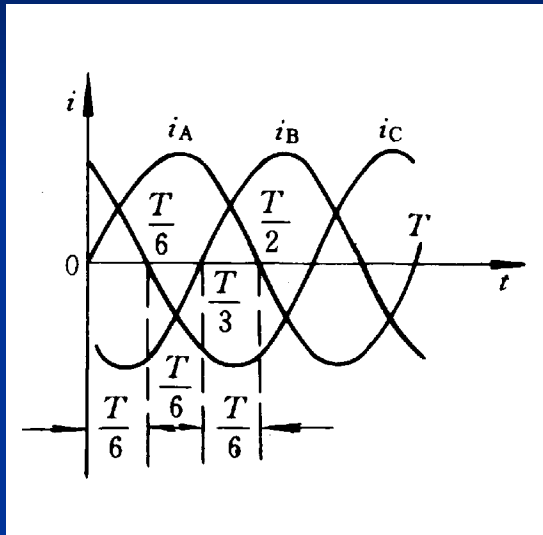
电动机的主要部件



5. 定子铁心, 6. 定子绕组, 7. 转轴, 8. 转子, 9. 风扇, 11. 轴承, 12. 机座

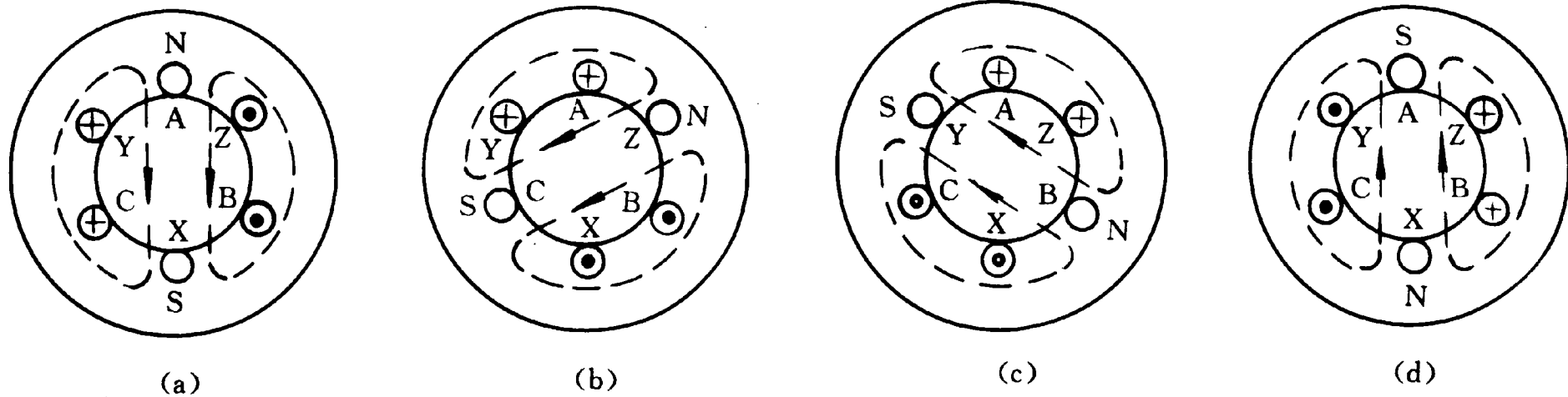
3). 三相交流电

(1) 三相交流电的波形图及相量图。



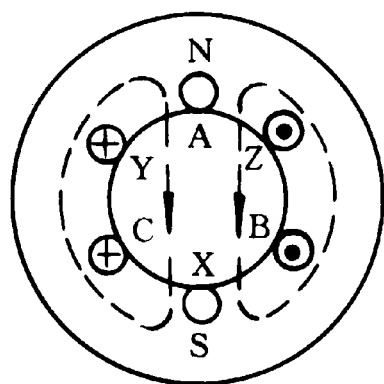
在 $0-T/2$ 这个区间，分析有一相电流为零的几个点。
规定：当电流为正时，从首端进尾端出；电流为负时，从尾端进首端出。

$t=0$ 时， $i_A=0$ ； i_B 为负， i_C 为正

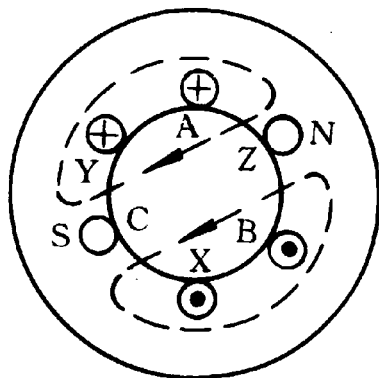


■ $t=0$ 时， $i_A=0$ ； i_B 为负，电流实际方向与正方向相反，即电流从 Y 端流到 B 端； i_C 为正，电流实际方向与正方向一致，即电流从 C 端流到 Z 端。按右手螺旋法则确定三相电流产生的合成磁场，如图 (a) 中箭头所示。

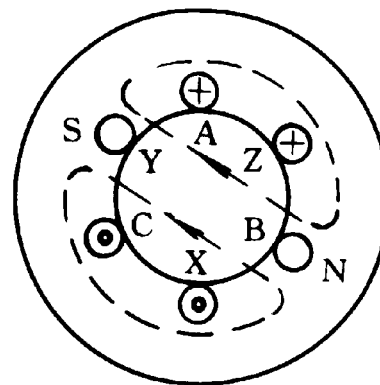
$t=T/6$ 时， $\omega t=\omega T/6=\pi/3$, i_A 为正； i_B 为负； $i_C=0$



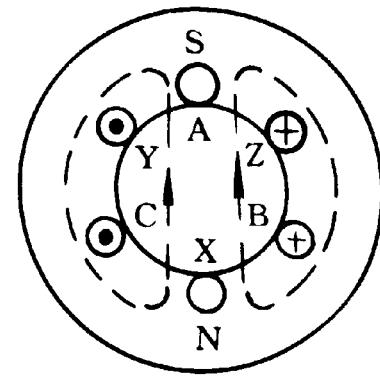
(a)



(b)



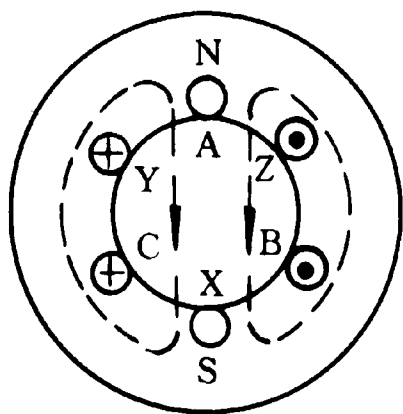
(c)



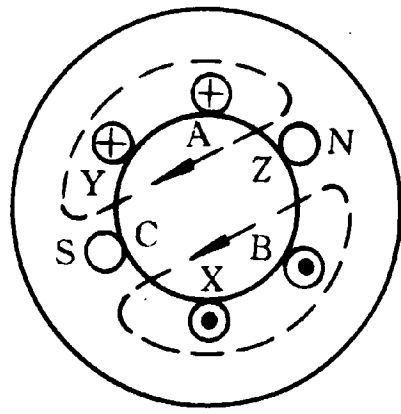
(d)

■ $t=T/6$ 时， $\omega t=\omega T/6=\pi/3$, i_A 为正（电流从 A 端流到 X 端）； i_B 为负（电流从 Y 端流到 B 端）； $i_C=0$ 。此时的合成磁场如图 (b) 所示，合成磁场已从 $t=0$ 瞬间所在位置顺时针方向旋转了 $\pi/3$ 。

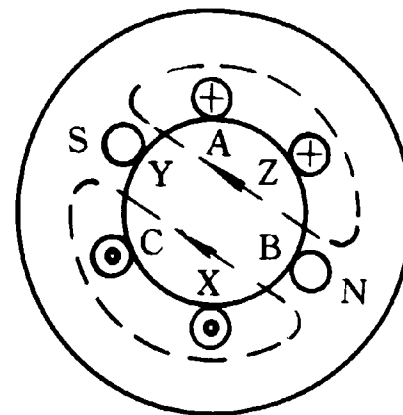
■ $t=T/3$ 时， $\omega t=\omega T/3=2\pi/3$, i_A 为正； $i_B=0$ ； i_C 为负



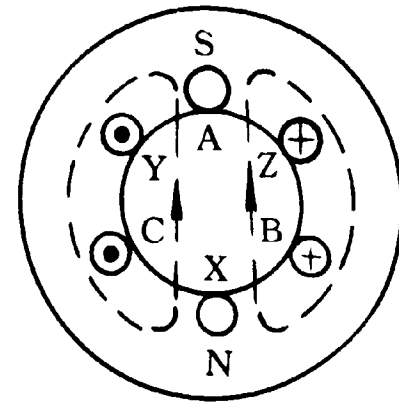
(a)



(b)



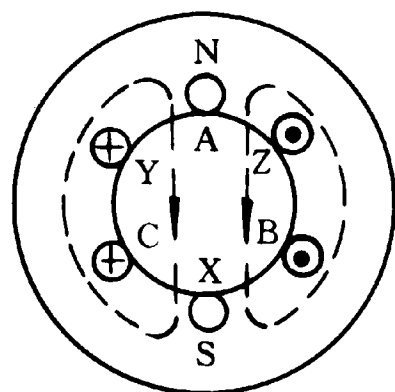
(c)



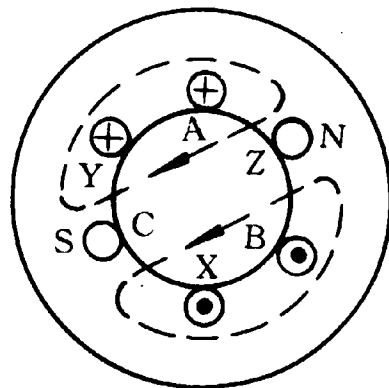
(d)

- 此时的合成磁场如图 (c) 所示，合成磁场已从 $t=0$ 瞬间
- 所在位置顺时针方向旋转了 $2\pi/3$ 。

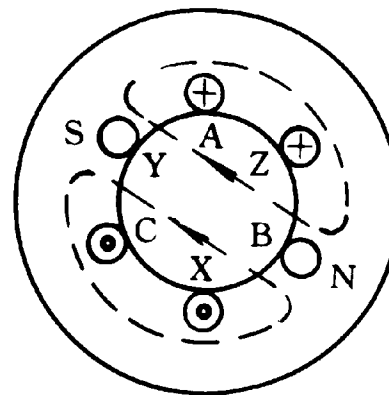
$t=T/2$ 时， $\omega t=\omega T/2=\pi, i_A=0$ ； i_B 为正； i_C 为负。



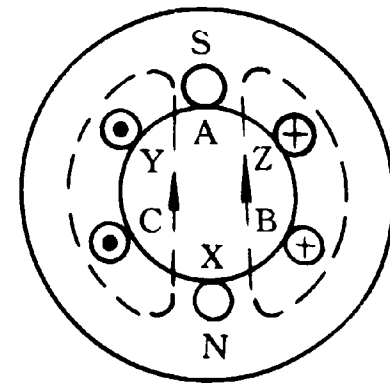
(a)



(b)



(c)



(d)

此时的合成磁场如图 (d) 所示。合成磁场从 $t=0$ 瞬间所在位置顺时针方向旋转了 π 。按以上分析可以证明：当三相电流随时间不断变化时，合成磁场的方向在空间也不断旋转，这样就产生了旋转磁场。

(2) 旋转磁场的产生

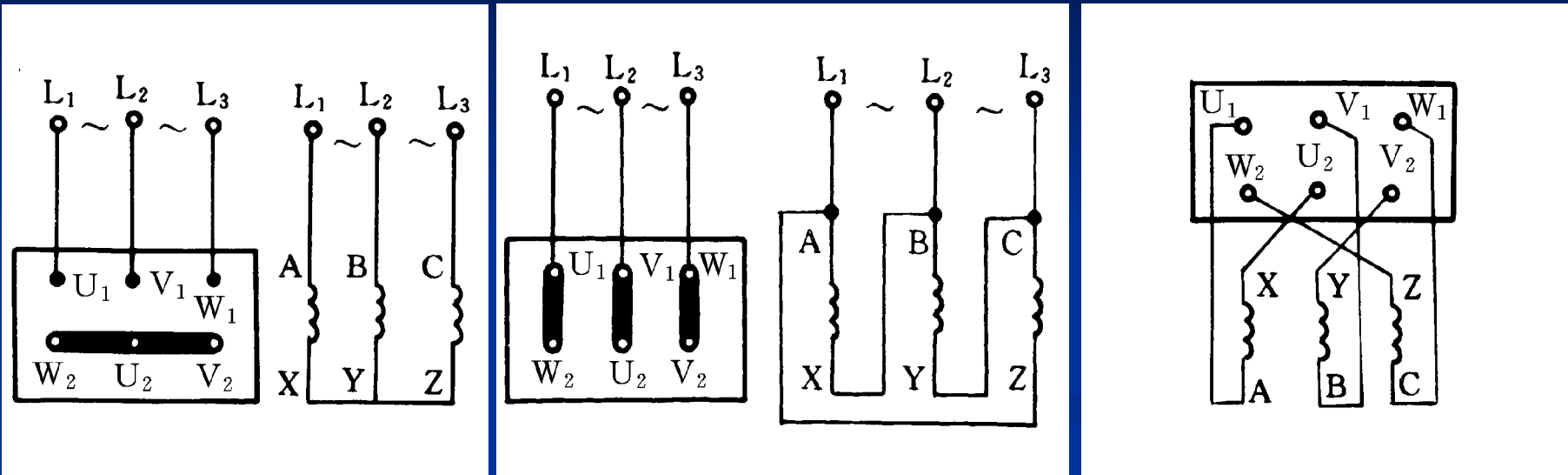
- 三相交流电的相序为 A-B-C ；
- 三相交流电的相序为 A-B-C 或 C-B-A, 均可；
- 三相交流电的相序为 A-B-C 或 C-B-A, 均可。

(3) 旋转磁场的旋转速度 ---- 同步转速 n_0

$$n_0 = \frac{60 f}{p}$$

式中, f 为电源频率 50Hz; p 为电动机的磁极对数。
电动机的磁极对数为 1 时, 同步转速为 3000r/min;
电动机的磁极对数为 2 时, 同步转速为 1500r/min;
电动机的磁极对数为 3 时, 同步转速为 1000r/min.

(4) 三相绕组连接



- 注意：三相绕组连接成星形，每相绕组承受相电压 220V；三相绕组连接成三角形，每相绕组承受线电压 380V。

3. 磁通量的产生

1). 磁通量

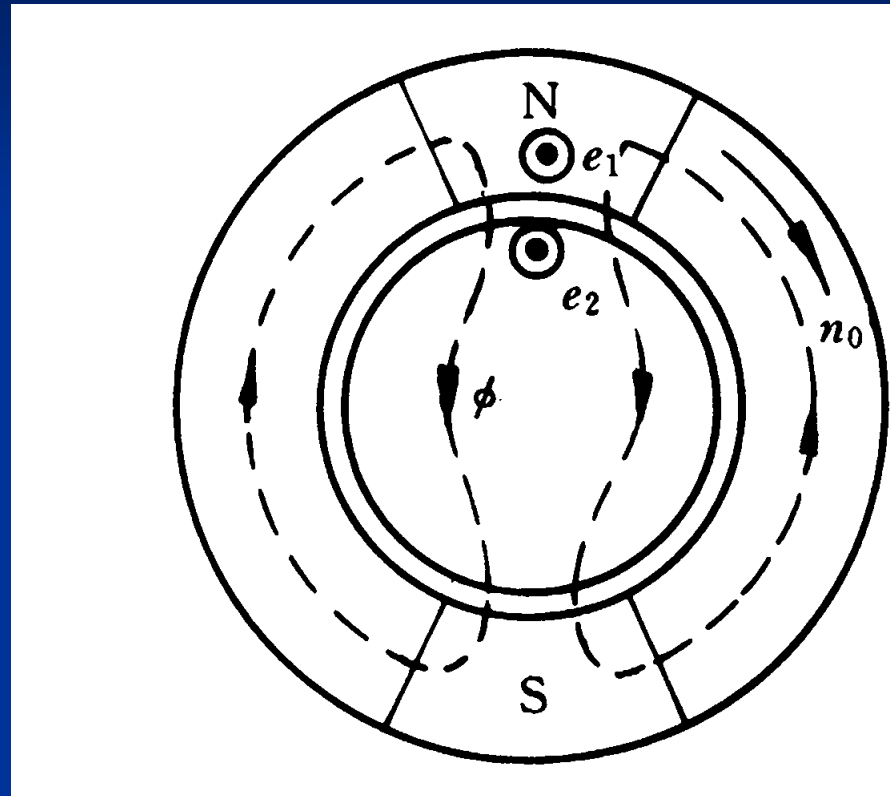
定子绕组匝数为 N_1

转子绕组匝数为 N_2 :

$$e_1 = - N \frac{d\phi}{dt}$$

其有效值为 :

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 \phi$$



定子和转子电路的感应电势



考虑定子电流产生的漏磁通，用复数表示为：

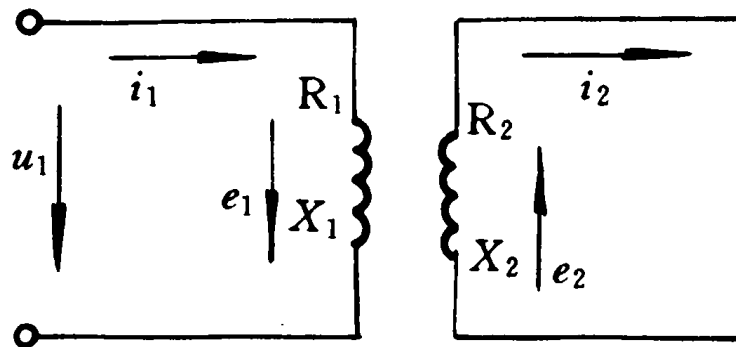
$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 R_1 + j \dot{I}_1 x_1 + (-\dot{E}_1)$$

忽略 R_1 和 X_1 上的电压降，有：

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$$

其大小为

$$U_1 \approx -E_1$$



一相电路图

2). 启动瞬间

启动瞬间的电磁转矩和功率因数：

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

启动瞬间

$$E_2 = 4.44 f_2 N_2 \phi$$

$$E_{20} = 4.44 f_1 N_2 \phi$$

$$X_{20} = 2\pi f_1 L_{L2}$$

其中

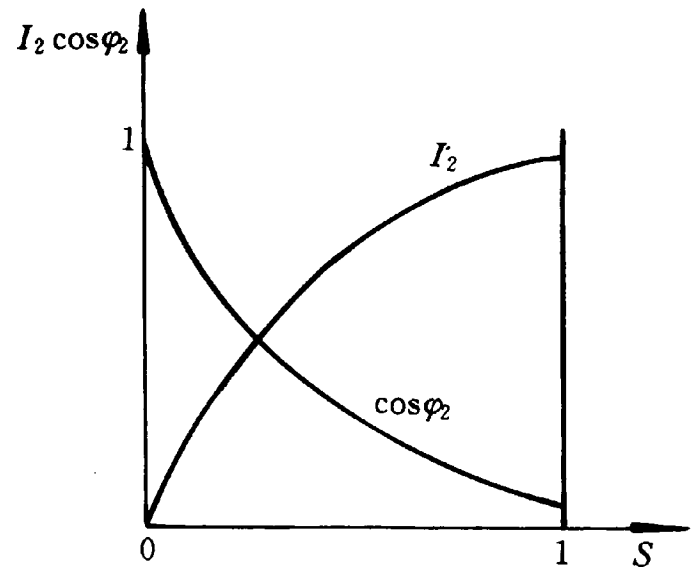
$$f_2 = s f_1$$

$$E_2 = s E_{20}$$

$$X_2 = s X_{20}$$

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{s E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (s X_{20})^2}}$$

$$\cos \phi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (s X_{20})^2}}$$



3. 电动机的主要参数

- 额定功率： P_N ;
- 额定电压： U_N ;
- 额定频率： $f=50\text{Hz}$;
- 额定电流： I_N ;
- 额定转速： n_N ;
- 额定效率： η_N ;
- 额定功率因数： $\cos\phi_N$;
- 额定转矩： T_N ;
- 额定转差率： s_N ;

- 效率

$$\eta_N = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N I_N \cos\phi_N}$$

- 额定负载转矩

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N}$$

4. 电动机功率损耗

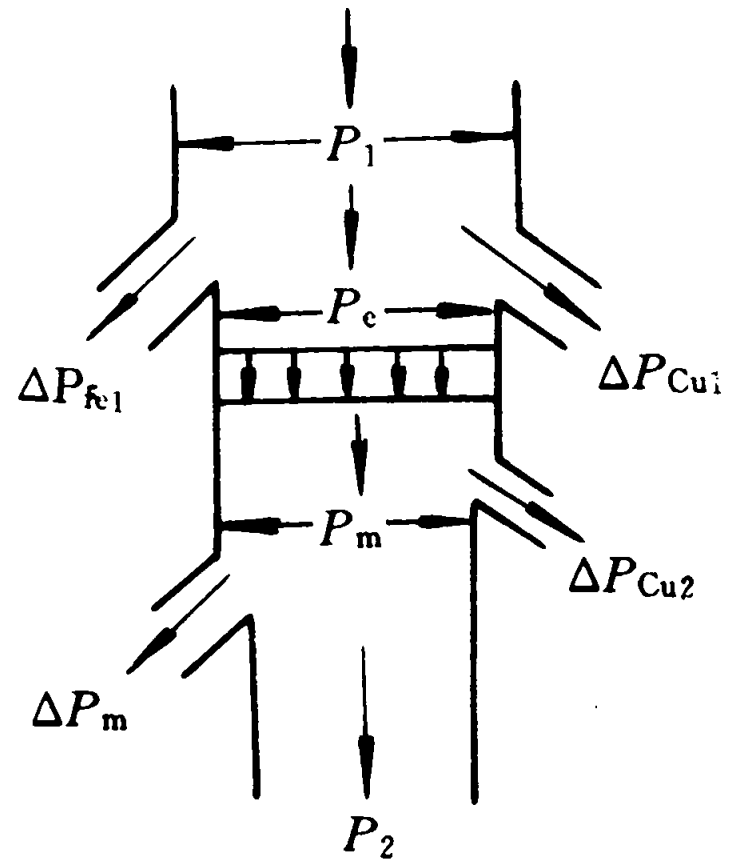
电源输入的功率 P_1 :

$$P_1 = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos \phi_1$$

电动机的输出功率 P_2 (铭牌功率)

P_2 等于 P_1 减去电动机的总损耗

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}$$





例 1: 有一台 Y 型接线的三相异步电动机, 其额定参数为: 功率 90KW, $U_N=3000V$, $I_N=22.9A$, 电源频率 $f=50Hz$, 额定转差率 $s_N=28.5\%$, 定子每相绕组匝数 $N_1=320$, 转子每相绕组匝数 $N_2=20$, 旋转磁场每极磁通 $0.023WB$, 求:
1) 定子每相绕组感应电动势 E_1 ; 2) 转子每相开路电压 E_{20} ; 3) 额定转速时转子每相绕组感应电动势 E_{2N} .

解: 1) 由电势计算公式得:

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 \phi = 4.44 \times 50 \times 320 \times 0.023 = 1634V$$

2) 转子绕组开路时, $f_2=f_1$, 得

$$E_{20} = 4.44 f_1 N_2 \phi = 4.44 \times 50 \times 20 \times 0.023 = 102V$$

3) 额定转速时, 转子电动势的频率

$$f_2 = s_N f_1 = 0.0285 \times 50 = 1.43Hz$$

$$E_{20} = 4.44 f_1 N_2 \phi = 4.44 \times 50 \times 20 \times 0.023 = 102V$$



例 2: 一台 4 极三相异步电动机, 电源频率 50Hz, 额定转速 1440r/min, 转子电阻 0.02 欧, 转子电抗 0.08 欧, 转子电动势 $E_{20}=20\text{V}$, 求: 1) 电动机的同步转速; 2) 电动机启动时的转子电流。

解; 1) 电动机为 4 极, 磁极对数 $p=2$, 有 $n_0=60f/P=3000/2=1500\text{r/min}$

2) 电动机启动时的转子电流

$$I_{2st} = \frac{E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + X_{20}^2}} = \frac{20}{\sqrt{0.02^2 + 0.08^2}} = 242.5\text{A}$$

4. 转矩与电压平方成正比

1). 转矩与电压平方成正比

转矩与电压平方成正比 :

$$T = K_t \phi I_2 \cos \phi_2$$

$$E_{20} = 4.44 S f_1 N_2 \phi$$

代入

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{sE_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}}$$

用 $\cos \phi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}}$

代入，合并上面几个式子得转矩又一公式：

$$T = K \frac{SR_2 U^2}{R_2^2 + (SX_{20})^2}$$

注意，转矩与电压平方成正比

2). 自然特性 $n=f(T)$

自然特性 (**自然特性**) : 自然特性 , 自然特性 , 自然特性 .

自然特性上有 4 个特殊点 :

(1) 理想空载转速点 n_0

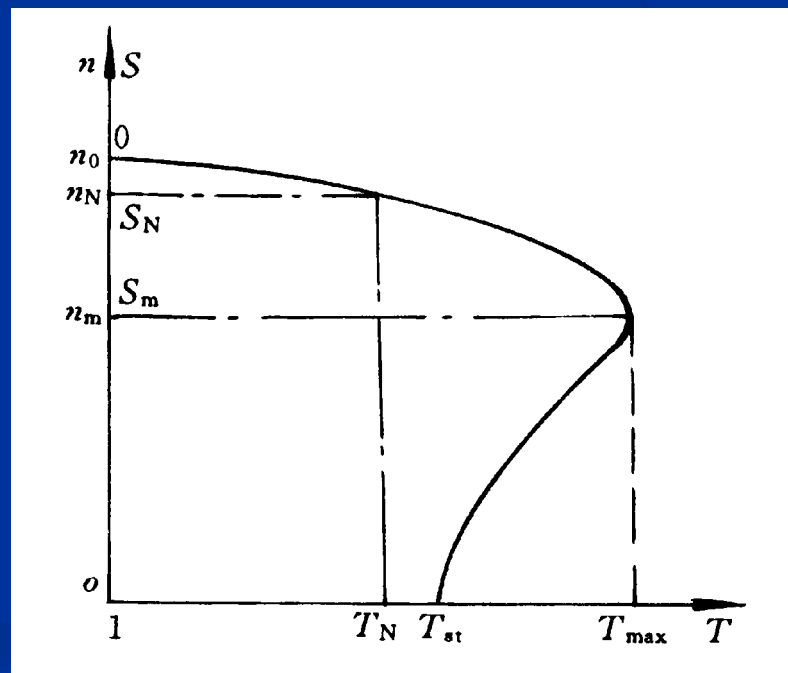
$$T=0, n=n_0, S=0;$$

(2) 额定工作点

$$T=T_N, n=n_N, S=S_N; \text{ 此时有}$$

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N}$$

$$S_N = \frac{n_0 - n_N}{n_0}$$



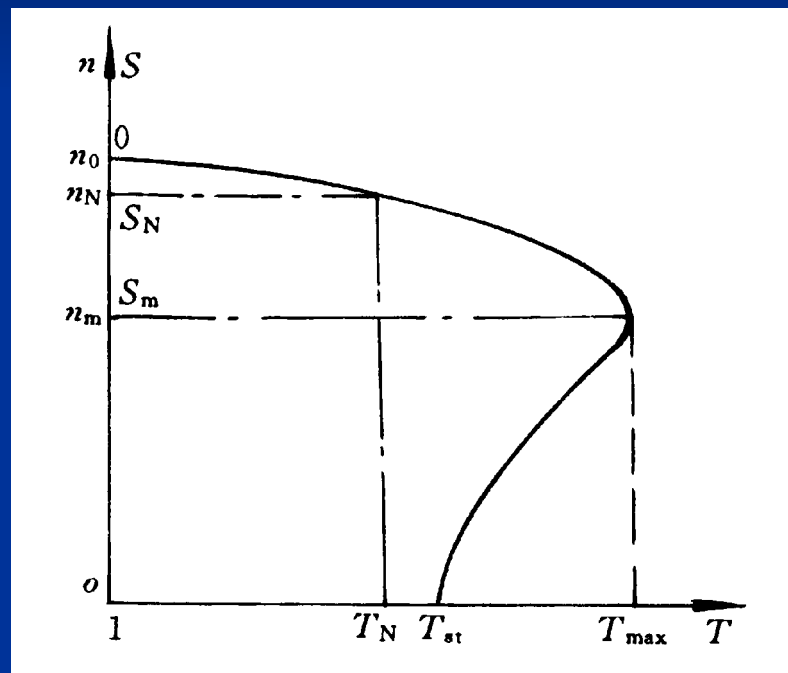
自然机械特性

(3) 起动工作点

$T=T_{st}$, $n=0$, $S=1$; 此时有

$$T_{st} = K \frac{R_2 U^2}{R_2^2 + X_{20}^2}$$

$$\lambda_{st} = \frac{T_{st}}{T_N}$$



(4) 临界工作点

$T=T_{anm}$, $n=n_m$, $s=S_m$; 有:

$$S_m = \frac{R_2}{X_{20}}$$

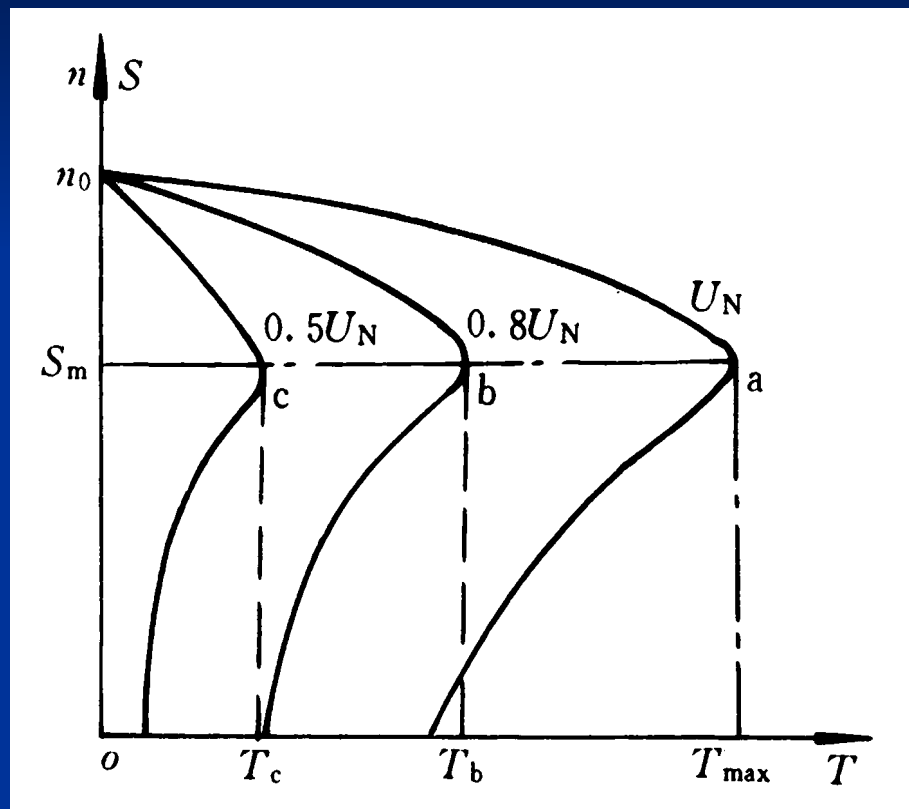
$$T_{man} = K \frac{U^2}{2X_{20}}$$

$$\lambda_m = \frac{T_{man}}{T_N}$$

电动机 4 种运行状态， σ ：电动机运行，电动机运行，电动机，电动机。

(1) 电动机运行

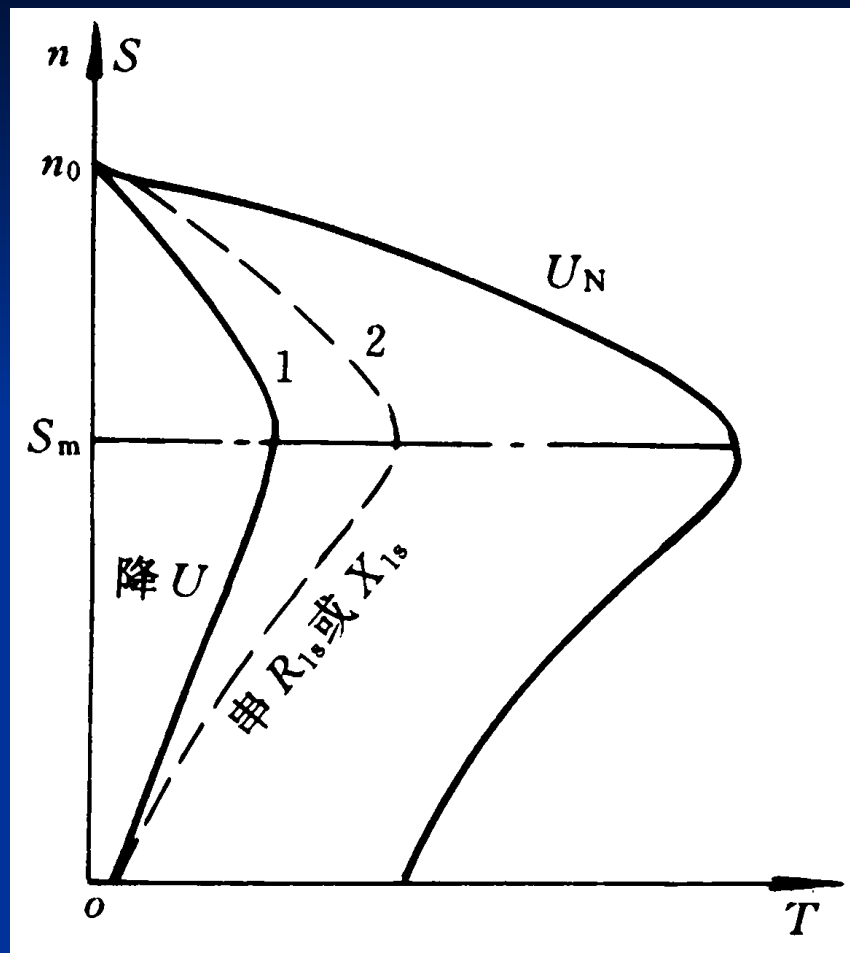
- 电压越低，人工特性曲线越往左移；
- 电动机的过载能力和起动转矩会大大降低；
- 电压降低，负载转矩不变时，电动机过热；
- 电压降低太多，电动机将带不动负载（不能起动）。



(2) 串电阻或电抗时的人工机械特性

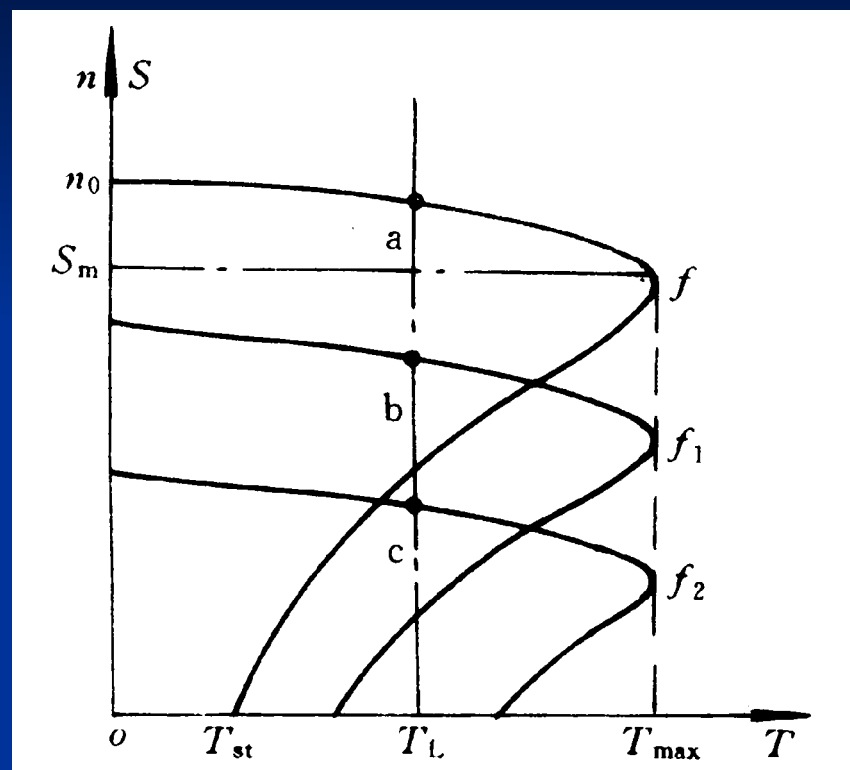
■ 定子电路串电阻或电抗时的人工机械特性如右图中虚线 2 所示, 1 为电压降低时的人工机械特性;

■ 曲线 2 与曲线 1 相比较, 最大转矩要大一些.



(3) 变频调速

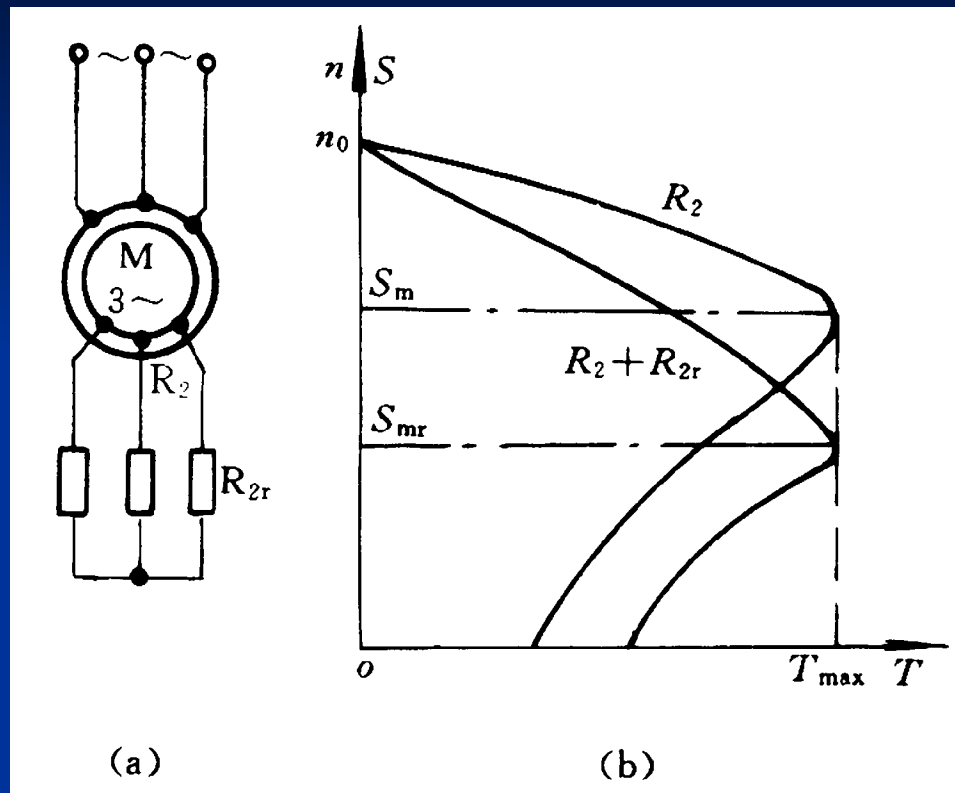
- 随着频率的降低，理想空载转速只能在电源额定频率以下调节；
- 转速 n_0 减小，临界转差率 S_m 减小，起动转矩 T_{st} 增大，最大转矩 T_{max} 不变



(4) 绕线式异步电动机转子串电阻调速

■ 电路图如右图中 (a) 所示，三相转子绕组通过滑环电刷机构与外接电阻相联接；

■ 起动转矩增加（有利），理想空载转速和最大转矩不变。



5. 直接启动

直接启动：电动机，电动机。

1) 直接启动

直接启动 (5-7) 时，电动机，电动机。

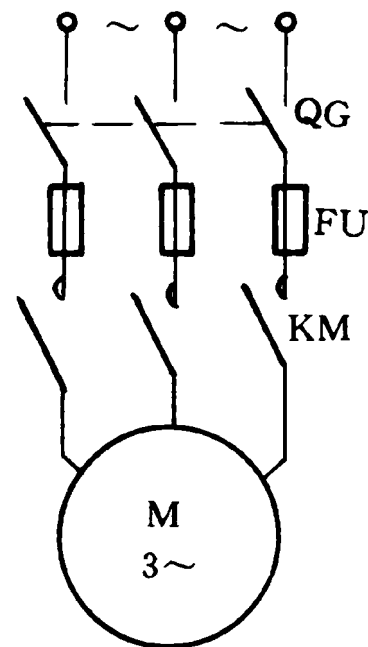
(1) 直接启动 (全电压启动) 适用范围

;

电动机功率 $< 20\%$ 变压器容量。

一般中小型鼠笼式异步电动机都采用

全电压直接启动。



(2) 直接启动：直接启动，直接启动，直接启动。直接启动 4 种：直接启动，Y- Δ 启动，直接启动，直接启动。

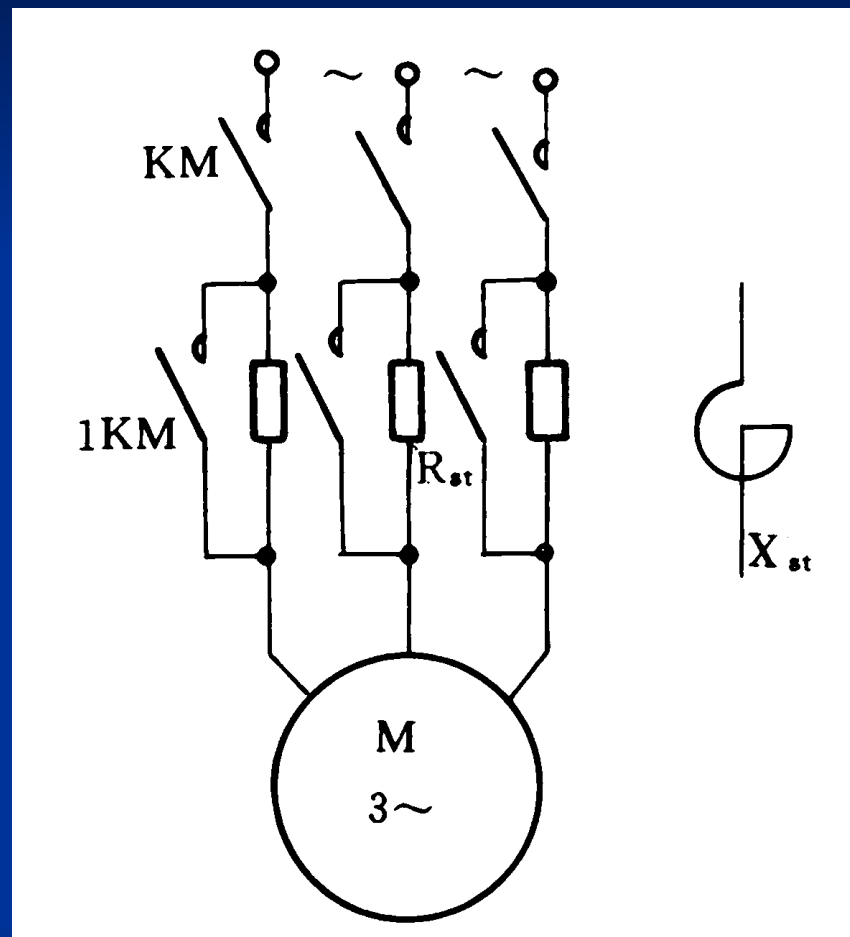
(1) 直接启动

直接启动；

不足之处：启动转矩随定子电压的平方下降；

不经济。

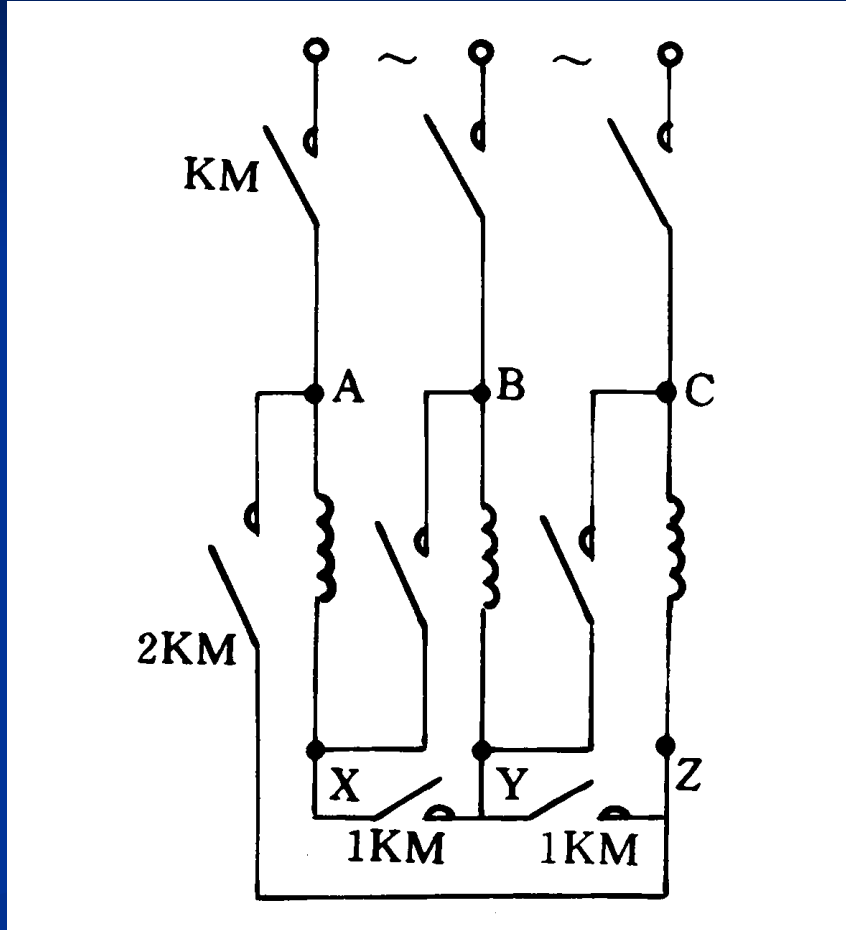
应用场合：电动机空载或轻载启动。



(2) **Y-Δ 启动** : 适用于功率在 5kW 以下的三相异步电动机。启动时接成 Y 形，运行时接成 Δ 形。启动电流为额定电流的 1/3，启动转矩为额定转矩的 1/3。

Y-Δ 启动的特点是：启动电流小，启动转矩小，设备简单，经济。

- 特点：**
- 电动机 Y 形启动过程中，可提高电动机的效率和功率因数；
 - 启动转矩小，只适用于空载或轻载启动的场合；
 - 设备简单，经济；
 - 在机床工业上应用较普遍。



(3) 自耦变压器启动

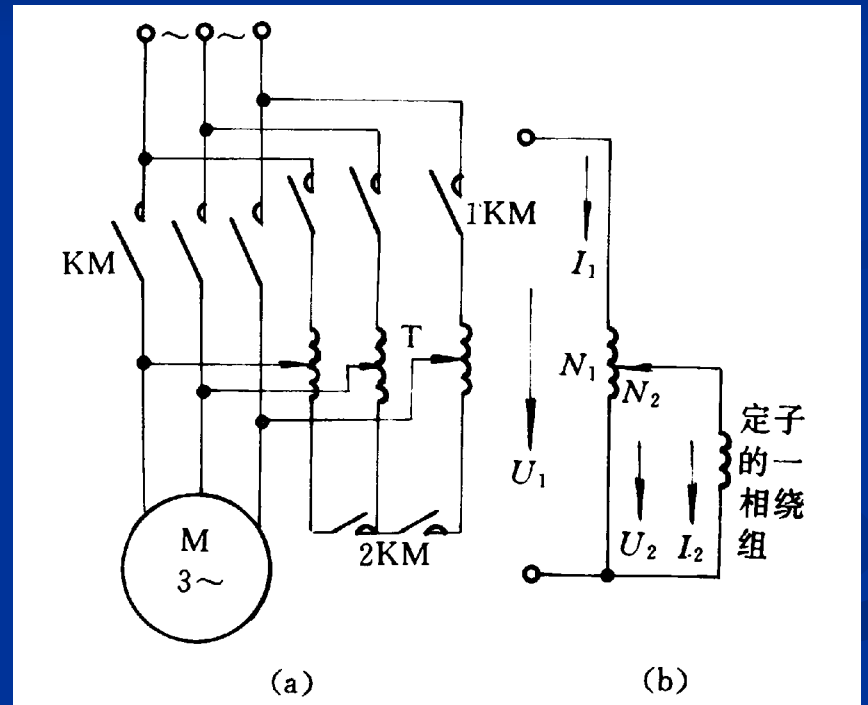
特点：

启动电流小，启动转矩大；

启动时间短；

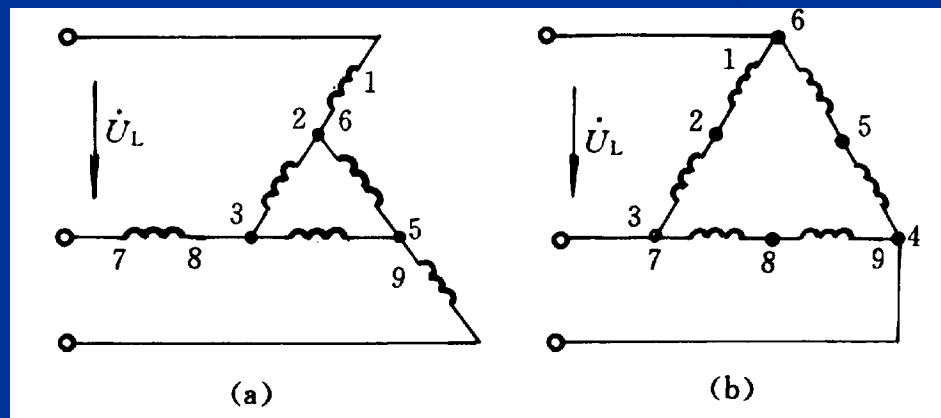
结构简单，体积小，重量轻。

与定子串电阻或电抗器启动相比较，在相同的启动转矩情况下，启动电流要小。



(4) 三相电路

三相电路的功率计算 ;
三相电路的 Y 接 , 三相 Δ 接 ; 三相
电路的 Δ 接 .
三相电路 , 三相 .



2). 电动机启动控制 .

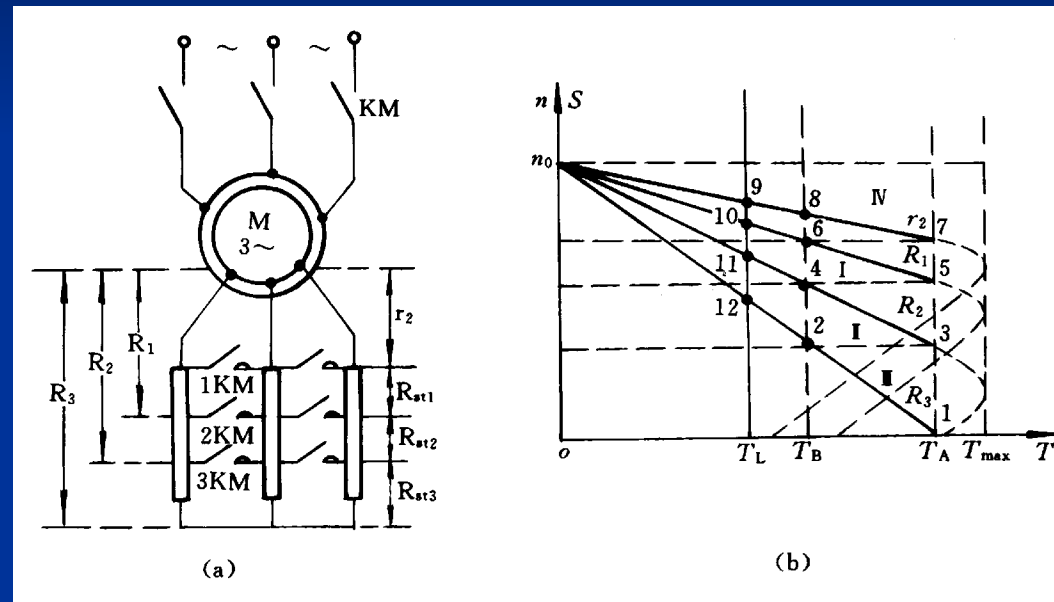
直接启动 , 降压启动 , 变频启动 .

(1). 直接启动

(1) 特点 : 简单 . 启动电流大 ; 启动转矩小 , 启动冲击大 .

(2) 适用 : 小容量 , 启动转矩 ; 启动转矩 , 启动冲击小 , 启动电流小 , 启动冲击小 , 启动转矩小 , 启动冲击小 .

(3) 优点 : 简单 , 启动电流小 .

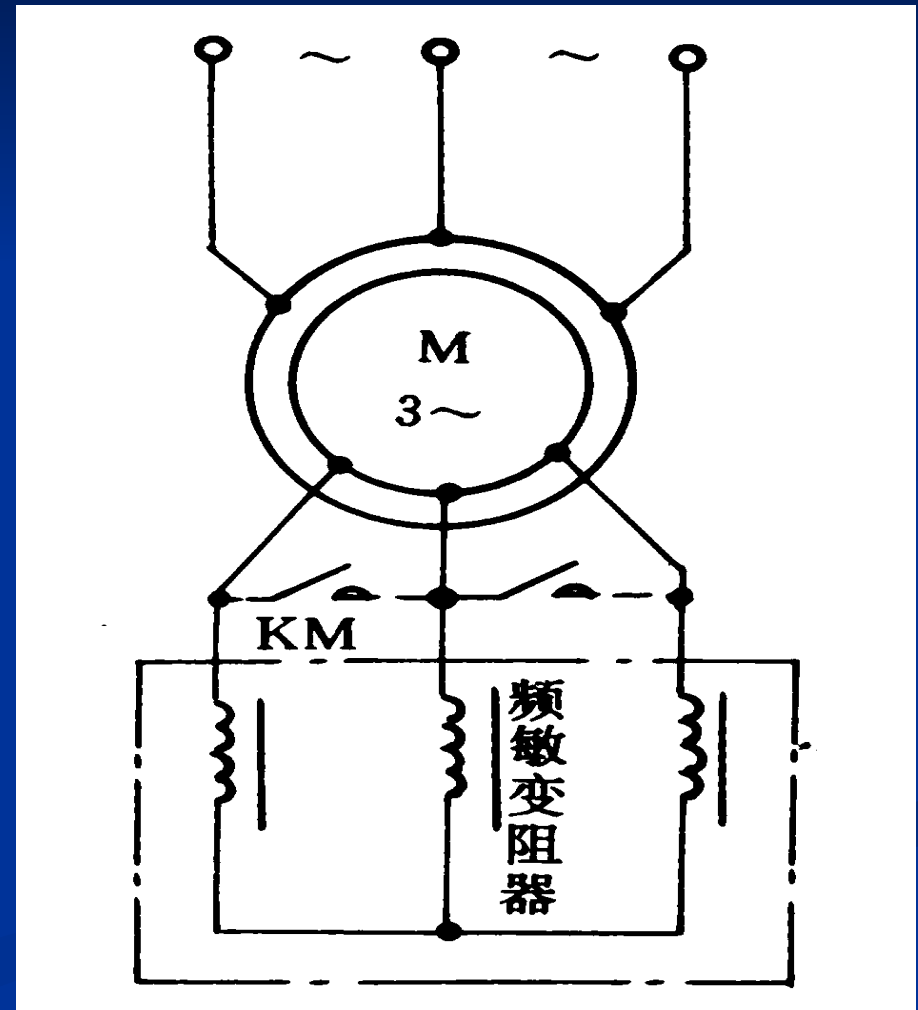


(2) 变频调速

(1) 变频 : 变频调速器 变频 , 电压 A3 变频 , 变频 Y 。

(2) 变频 : 变频 , 变频频率 50Hz, 变频 , 变频 变频 , 变频变频 , 变频变频 。变频变频 , 变频变频 ; 变频变频 , 变频变频 , 变频变频 。

(3) 变频 : 变频变频 , 变频变频 ;
变频变频 ;
变频变频 , 变频变频 , 变频变频 。



3. 00

0 1: 00 Y280S-4 00000000000 , $P_N=75\text{kW}$, $n_N=1480\text{r/min}$, $T_{st}/T_N=1.9$, 0000 320kVA 0000000000 , 0000000000 $T_L=200\text{Nm}$, 0
(1) 0000000000 ? (2) 0000000 Y- Δ 0000 ?

解 (1) 电动机额定功率与供电变压器容量之比为

$$75/320=0.234>0.2$$

电动机不宜直接起动 .

(2) 电动机的额定转矩和起动转矩分别为

$$T_N=9550(P_N/n_N)=9550(75/1480)=484\text{Nm}$$

$$T_{st}=1.9T_N=1.9\times 484=920\text{Nm}$$

如果采用 Y- Δ 降压起动, 则起动转矩仅为起动转矩的三分之一, 即

$$T_{stY}=1/3\times 920=307>200=T_L$$

因此, 可以采用 Y- Δ 降压起动 .



例 2: 一台 JZR-63-10 三相线绕式异步电动机的额定数为 : $P_N=60\text{kW}$, $n_N=577\text{r/min}$, 转子滑环间的开路线电压 $E_{20l}=253\text{V}$, 转子每相绕组的电阻 $R_2=0.0344$ 欧, 转子不动时每相绕组的漏抗 $X_{20}=0.163$ 欧, 求:

(1) 电动机直接起动时的 $E_2, I_2, \cos \phi_2$

(2) 电动机运行在额定转速时的 $E_2, I_2, \cos \phi_2$

(3) 电动机运行在 $n=528\text{r/min}$ 时的 E_2 , 转子电路每相应串电阻 R 及 $\cos \phi_2$

$s=0$, $n=0, S=1$, $s=1$

$$(1) E_{20} = E_{20l} / \sqrt{3} = 146\text{V}$$

$$I_{2st} = \frac{E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + X_{20}^2}} = \frac{146}{\sqrt{0.0344^2 + 0.163^2}} = 876.04\text{A}$$

$$\cos \phi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{20}^2}} = 0.206$$

(2)

$$S_N = \frac{n_o - n_N}{n_o} = \frac{600 - 577}{600} = 0.0383$$

$$E_{2N} = S_N E_{20} = 5.6$$

$$X_{2N} = S_N X_{20} = 0.006243$$

$$I_{2N} = \frac{E_{2N}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2N}^2}} = 160A$$

$$\cos \phi_{2N} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2N}^2}} = 0.984$$

(3)

$$S = \frac{n_o - n}{n_o} = \frac{600 - 528}{600} = 0.12$$

$$E_2 = S E_{20} = 17.5$$

$$X_2 = S X_{20} = 0.0196$$

由下式

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2 + R)^2 + X_2^2}}$$

得 $R=0.0732$ 欧 ;
由

$$\cos \phi_2 = \frac{R + R_2}{\sqrt{(R + R_2)^2 + X_2^2}}$$

得

$$\cos \phi_2 = 0.984$$

6. 反馈制动

反馈制动分为 3 种：回馈制动，再生制动，能耗制动。

1). 回馈制动

(1) 特点：

回馈制动时，转差率 $s < 0$ ，电动机
运行，机械能转换为电能。

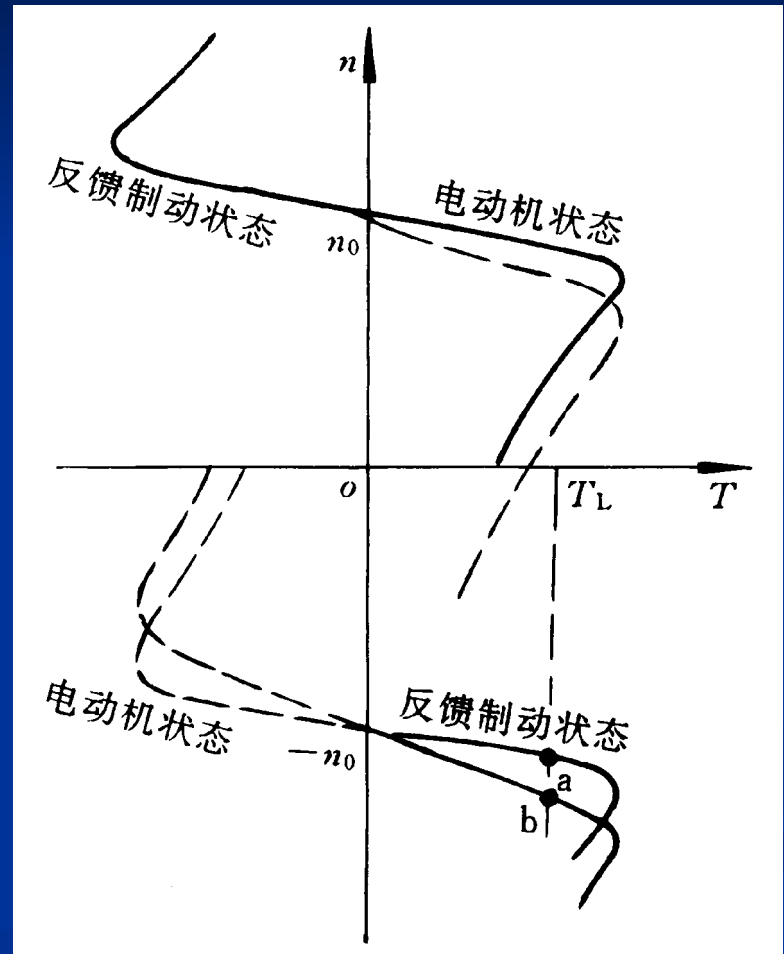
(2) 特点：

电动机运行。

(1) 特点：电动机运行。

电动机运行 a 、 b 电动机运行。

(2) 多速电动机和变频调速电机的同步速突然降低时的反馈制动状态。

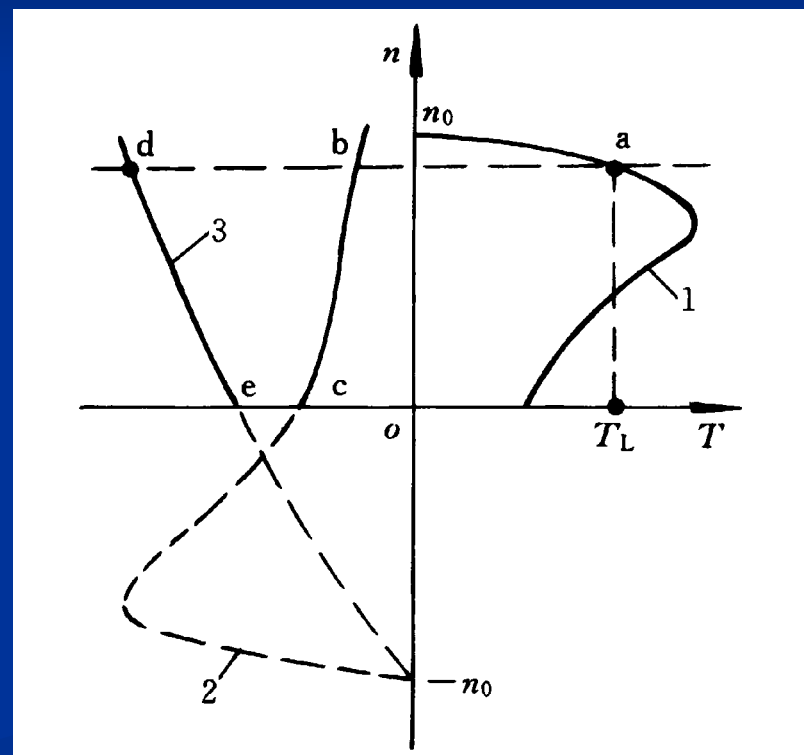


2). 调速 : 调速性能指标 .

调速性能指标 , 调速范围 ; 调速平滑性 ; 调速精度

(1) 调速范围 :

调速范围是指电动机在额定负载下, 所能达到的最高转速与最低转速之比。



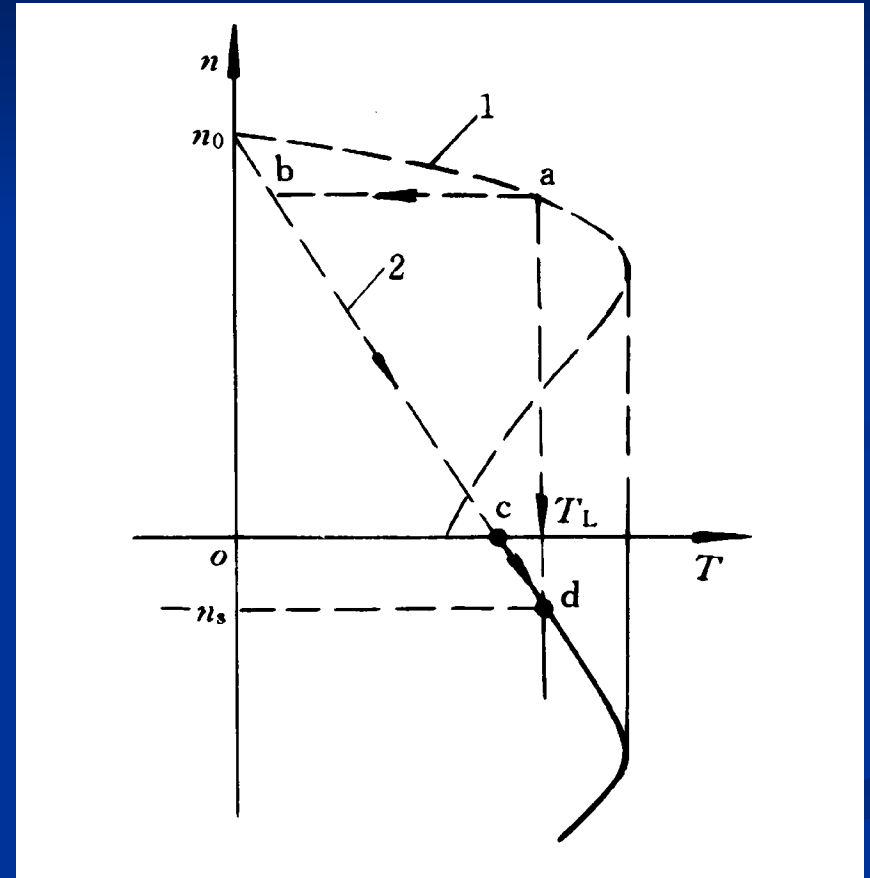
在右图 c 点要切断电源 ($n=0$),

电动机将作反方向启动

轉速 : 轉速與轉矩的關係 .

(2) 轉速 :

轉速與轉矩的關係 C 圖 , 轉速與轉矩
的關係 , 轉速與轉矩的關係 , 轉速與轉矩
的關係 .



7. 异步电动机的转差率

转差率

$$S = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

和基本公式

$$n_0 = \frac{60f}{p}$$

可得异步电动机的转速方程式为：

$$n = \frac{60f}{p}(1 - S)$$

异步电动机的调速方法主要有三种：变磁极对数 p ；
变转差率 S ；变频率 f 。

$$n = \frac{60 f}{p} (1 - S)$$

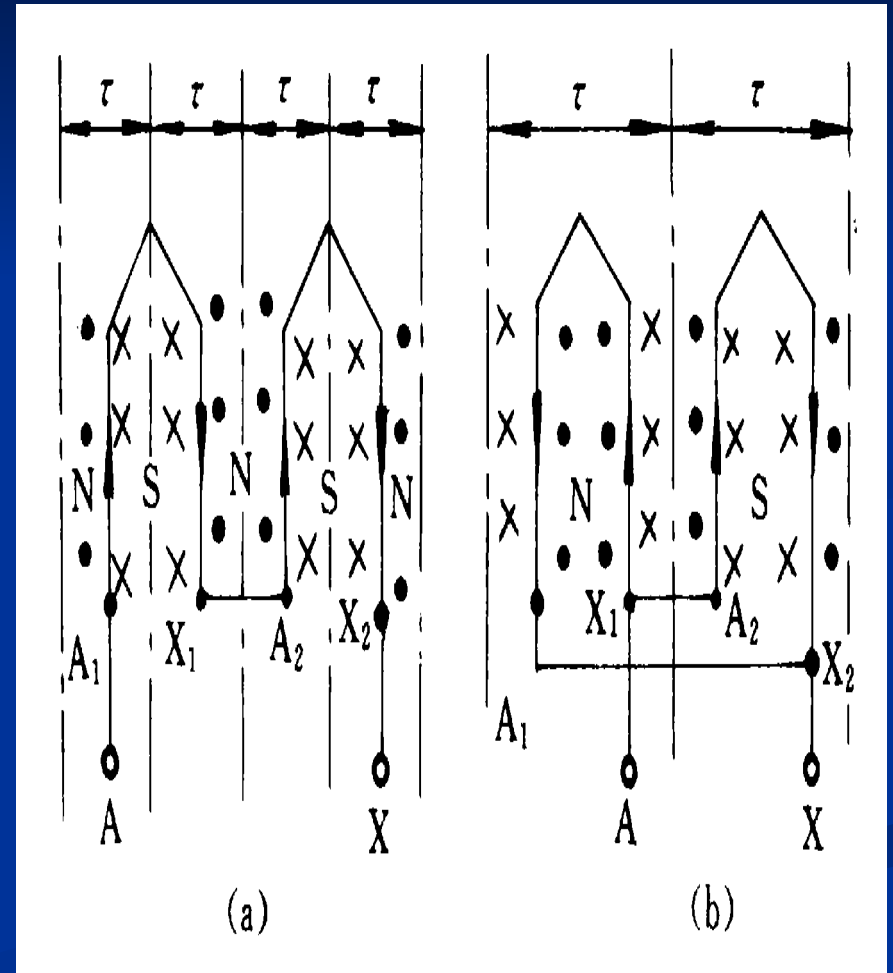
1). 电动机

(1) 同步 :

电动机, 同步电动机 .

(2) 异步 :

电动机, 异步电动机, 电动机, 电动机, 电动机 .



4 极

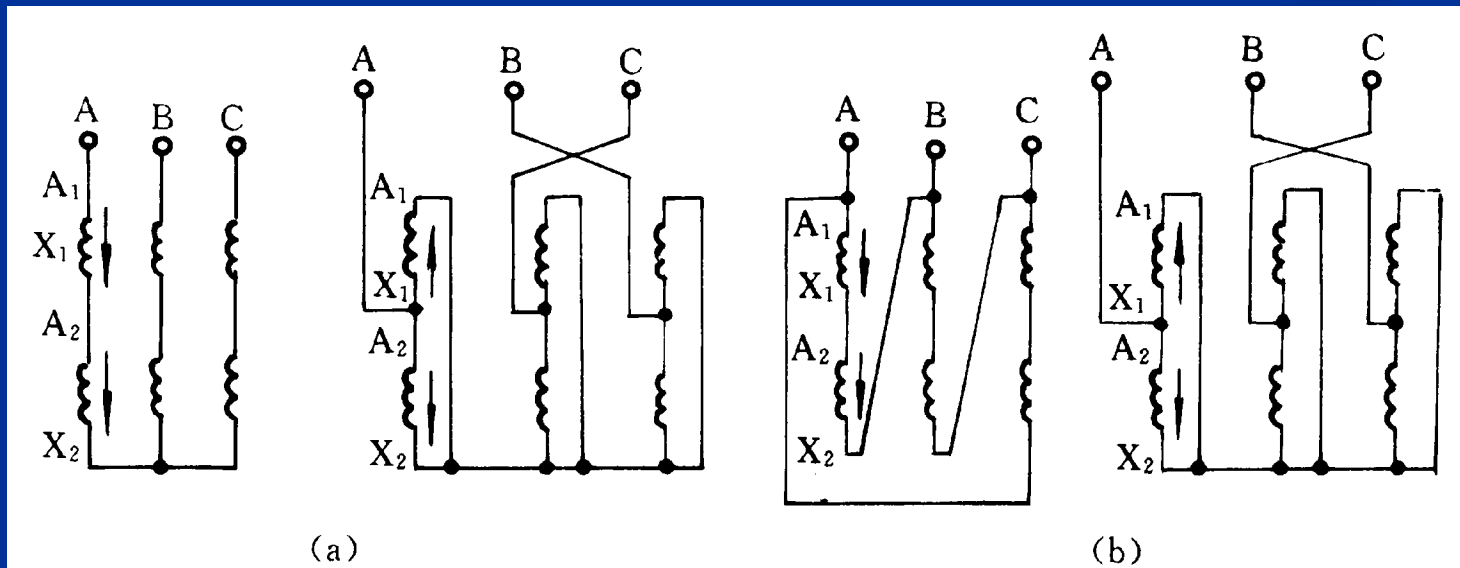
2 极



3) 连接:

星形、双星形、三角形; 星形、双星形、三角形。

星形、双星形、三角形。



双速电动机 Y/YY

Δ / YY

$$n = \frac{60f}{p} (1 - S)$$

2). 三相异步电动机 (电动机) 调速

(1) 调速 :

变频调速。

(2) 调速 :

变频调速, 变极调速, 变转差率调速。

(3) 调速 :

变频调速, 变极调速; 变转差率调速。

(4) 调速 :

变频调速, 变转差率调速。

三相电磁调速异步电动机也属于变转差率调速

$$n = \frac{60 f}{p} (1 - S)$$

3). 0000

(1) 00 :

0000 , 00000000 , 000000000000 .

(2) 000000000000000000 .

(3) 0000 :

0000000000 . 00 SCR-M 0000 .

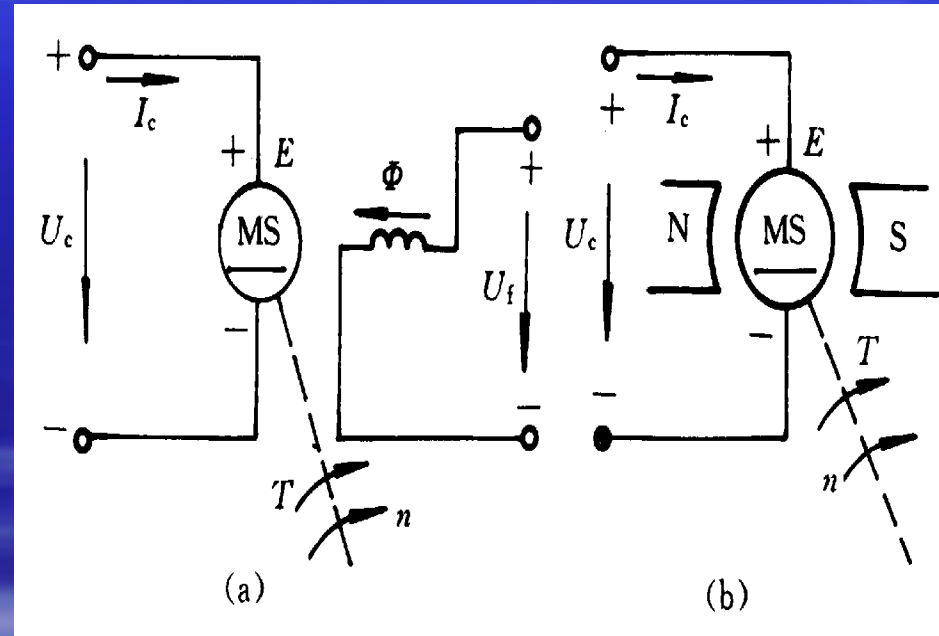
0000000000000000 . 0000000000000000 .

1.3 控制电机简介

- 控制电机的主要作用是用来完成信息的传递与交换，而不是进行能量转换。

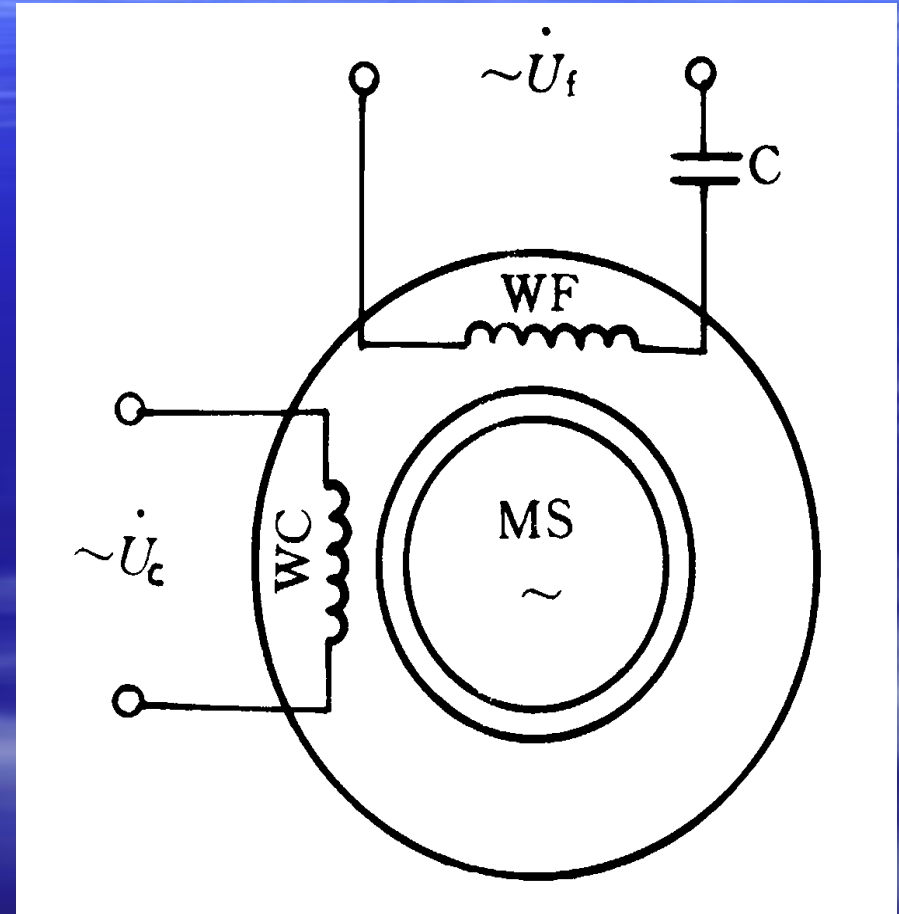
1) 直流伺服电动机

- 1. 基本结构：与普通他激直流电动机相同。(有换向器)
- 2. 分类：电磁式(他激式)；
 永磁式，
- 3. 电气原理图：如右图。其中(a)为电磁式(b)为永磁式。
- 4. 参数：输出功率 1-600 W。



2). 交流伺服电动机 (1) 结构

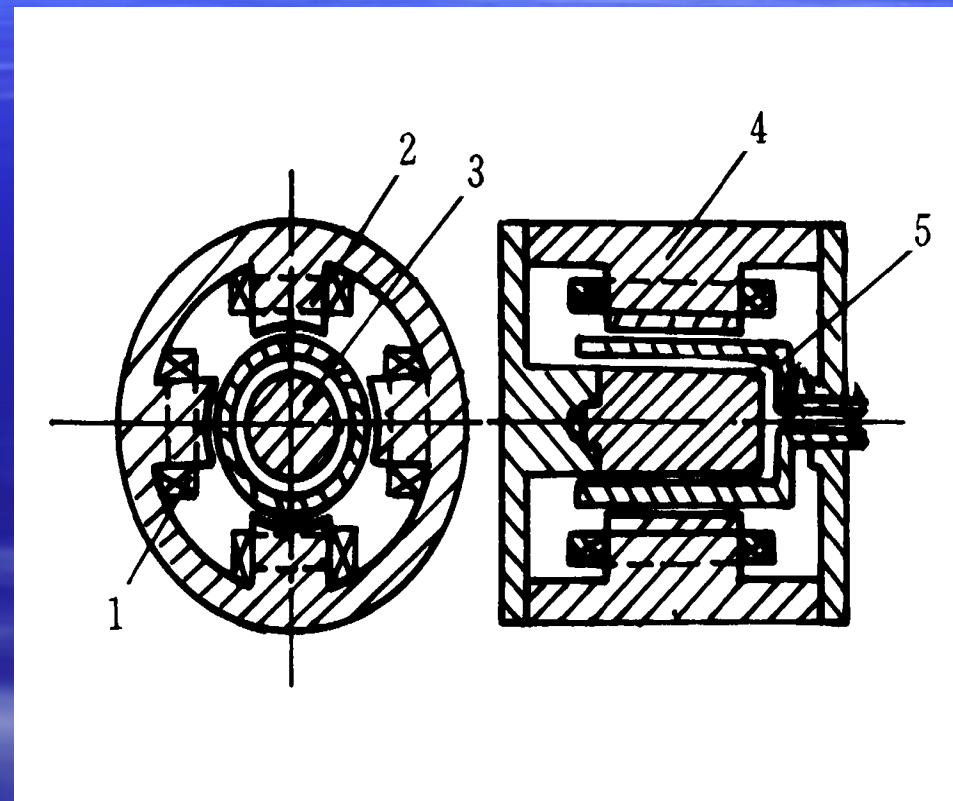
- (1) 定子：
- 定子由硅钢片叠成；
- 在定子铁心的内圆表面嵌
- 有两套相差 90 度电角度的绕组：激磁绕组 WF, 控制绕组 WC;
- 这两套绕组分别由两个电源供电。



接线图

两相交流伺服电动机的结构

- (2) 转子：
- 分为鼠笼型和杯型两种。
- (1) 鼠笼型转子作得细而长，转子导体采用高电阻率的材料，用于小功率的自动控制系统，产品型号 SL 系列。
- (2) 空心杯型转子作成薄壁圆筒形，放在内外定子之间，用于要求运行平滑的系统，产品型号 SK 系列。



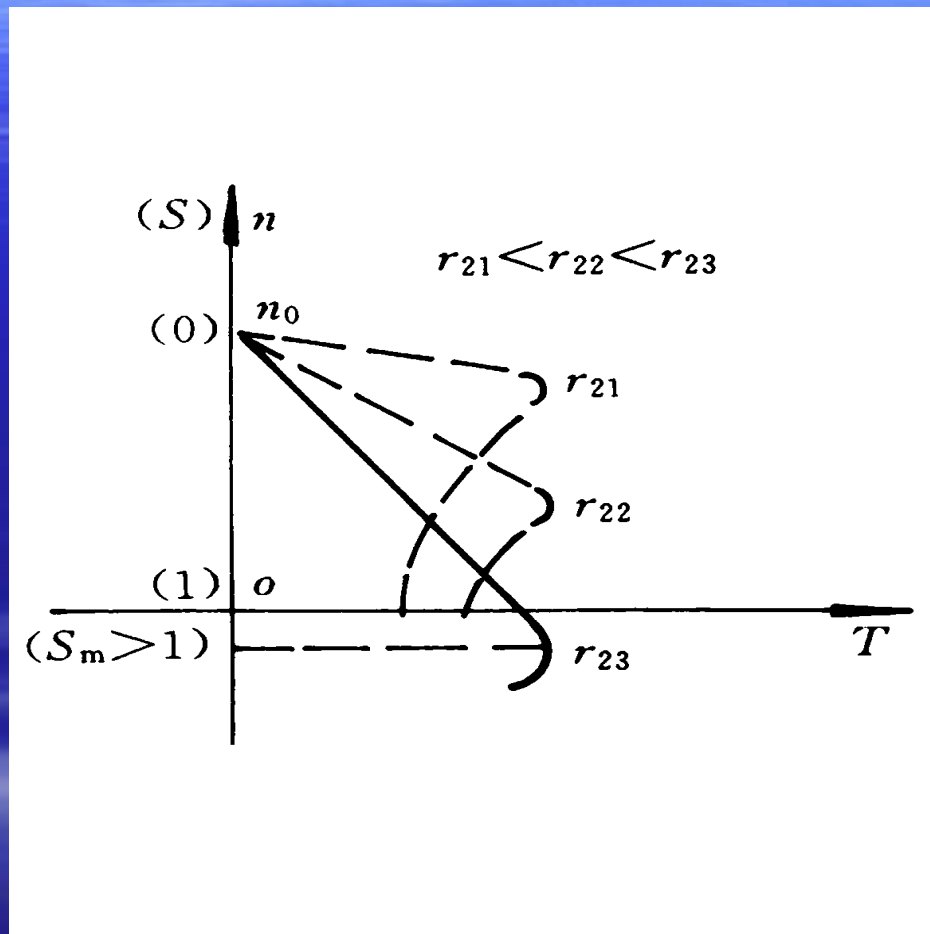
杯型转子伺服电动机结构图

激磁绕组 1; 控制绕组 2; 内定子 3;

外定子 4; 转子 5

(2). 基本工作原理

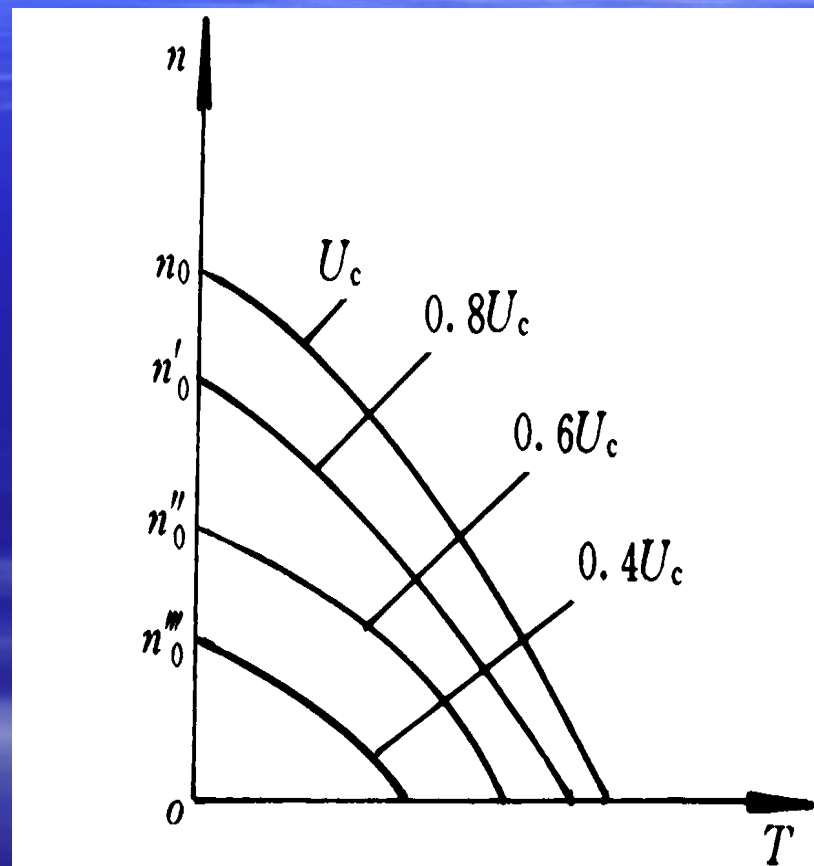
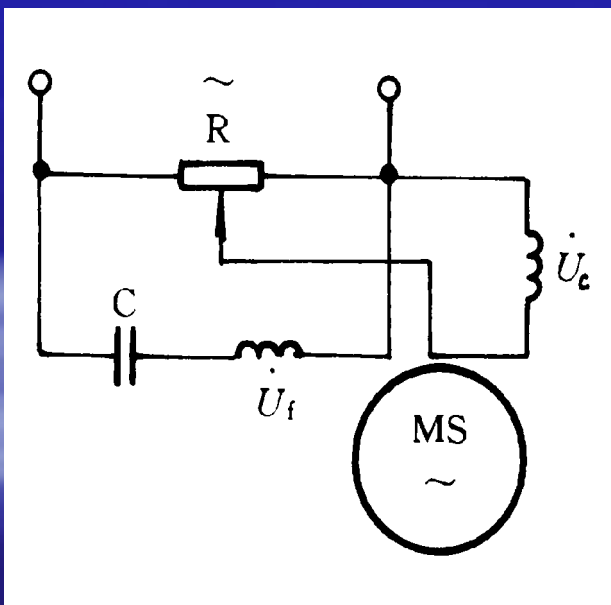
- 两相绕组 WF 和 WC 分别通入频率相同的交流电，产生旋转磁场，使伺服电动机起动。
- 取消 WC 后，要防止自转。
- (3). 消除自转现象的措施
- 加大转子电阻。如：
- 采用薄壁杯形转子。
- 鼠笼条用高阻材料黄铜



转子电阻不同时的机械特性

(4). 交流伺服电动机的特性和应用

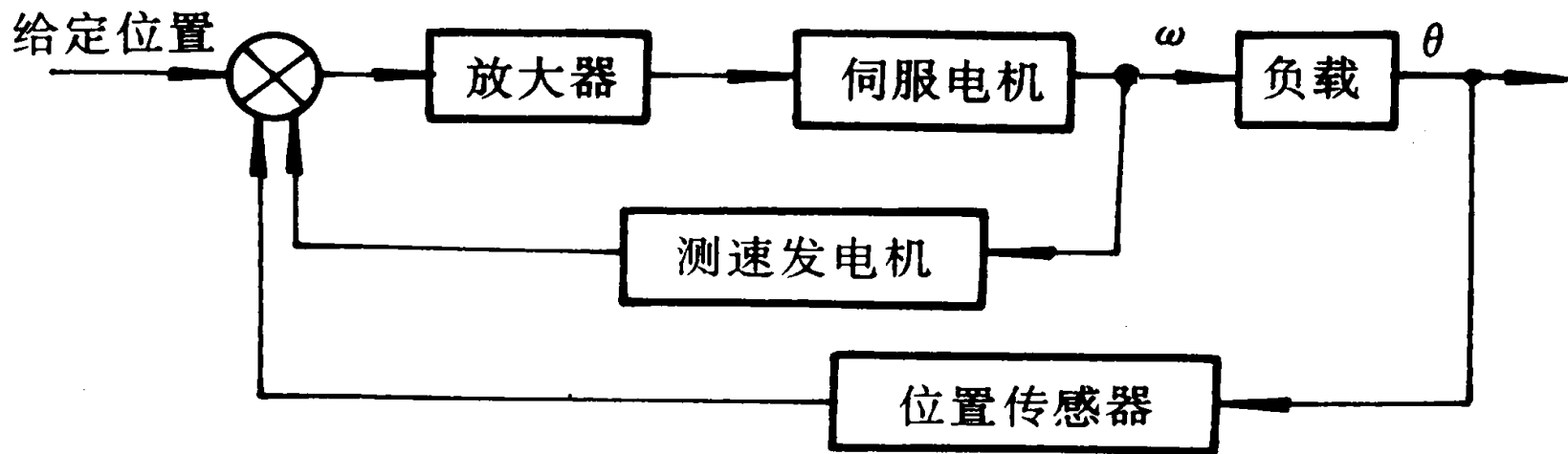
- 控制方法；有三种。
- 幅值控制，相位控制，幅 - 相控制
- 幅值控制原理图：控制电压 U_c 越高，电动机转速越高。



不同控制电压下的机械特性

应用举例

- (1) 参数：交流伺服电动机输出功率为 0.1-100W(再大则用直流伺服电动机); 电源频率 50-400Hz.
- (2) 应用：雷达天线的旋转控制；飞机驾驶盘的控制；流体阀门开关控制，

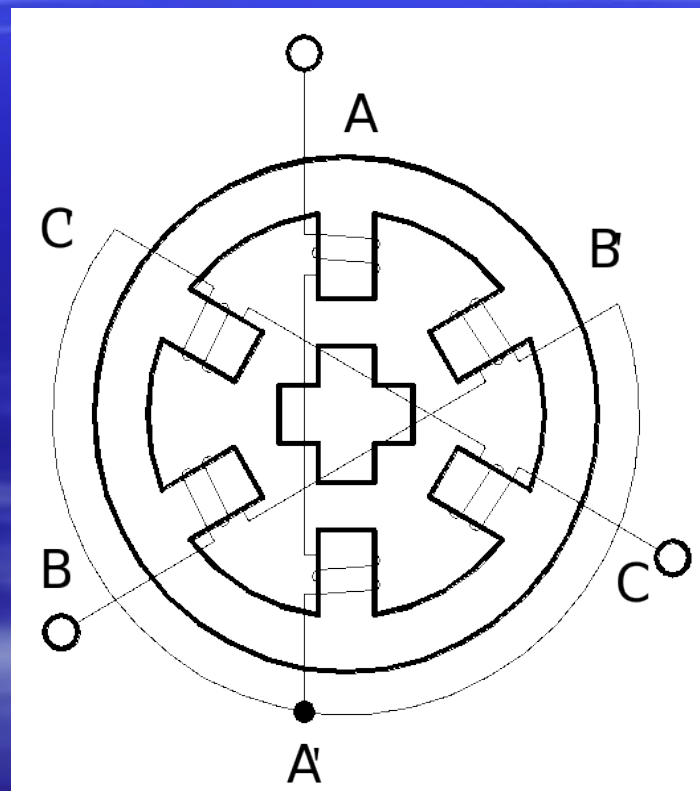


应用方框图

2) 步进电动机

是将电脉冲信号转换成角位移或直线位移的一种执行元件

- (1) 分类与结构
- 步进电动机分为反应式，永磁式，和混合式三种。
- 三相反应式步进电动机由定子和转子两个部分构成。
- 右图中，定子有 6 个磁极，两个相对的磁极组成一相；转子上有均匀分布的 4 个齿。



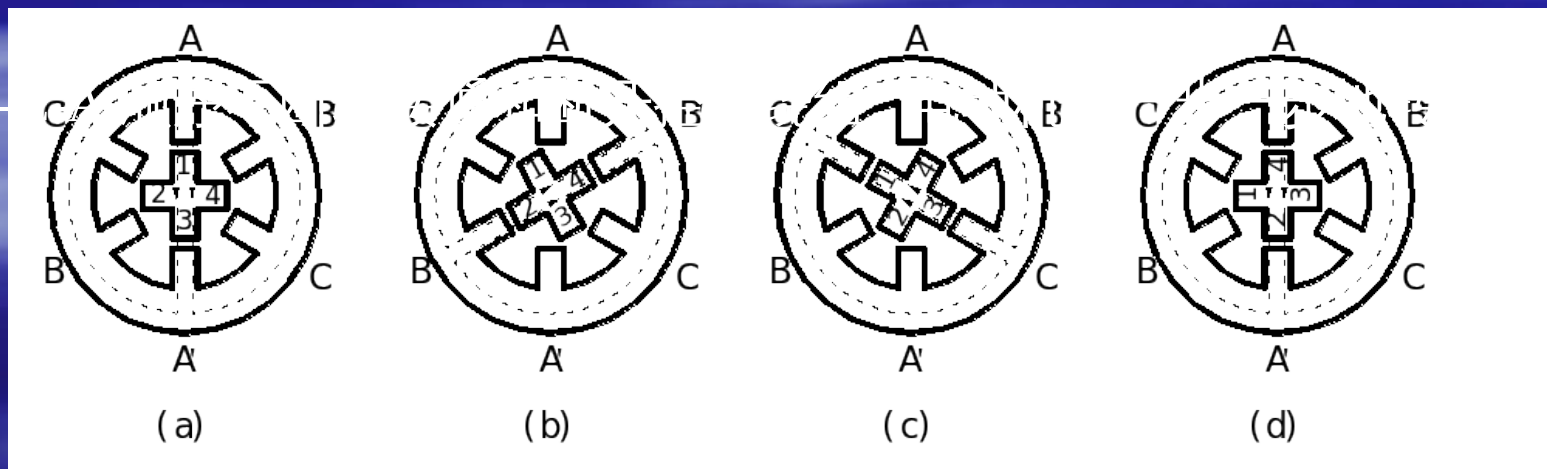
(2) 步进电动机的工作原理

由环形分配器送来的脉冲信号，对定子绕组轮流通电。设相序为 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 。当 A 相控制绕组通电，而 B、C 相不通电时，步进电动机的气隙磁场与 A 相绕组轴线重合，而磁力线总是力图从磁阻最小的路径通过，故电动机转子受到一个反应转矩（静转矩）的作用，在此转矩的作用下，使转子的齿 1 和齿 3 旋转到与 A 相绕组轴线相同的位置上，如图 (a) 所示，

然后 B 相通电如图 (b) 所示，转子在空间沿逆时针方向转过 30 度，转子前进一步。

同理，C 相通电时，转子转到图 (c) 所示位置；D 相通电时，转子转到图 (d) 所示位置。

按 A-B-



(3) 通电方式

- 控制绕组每改变一次通电方式，称为一拍，每一拍转子所转过的角度称为一个步距角 β 。步进电动机的通电方式有三种。对于三相反应式步进电动机来说，每次只有一相绕组单独通电，如 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ ，控制绕组每换接三次构成一个循环，这种方式称为三相单三拍；若每次有两相绕组同时通电，如 $AB \rightarrow BC \rightarrow CA \rightarrow AB$ ，每次循环换接三次，这种方式称为三相双三拍；若单相通电和两相通电轮流进行，如 $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CA \rightarrow A$ ，这种方式被称为三相六拍。

(4) 小步距角步进电动机

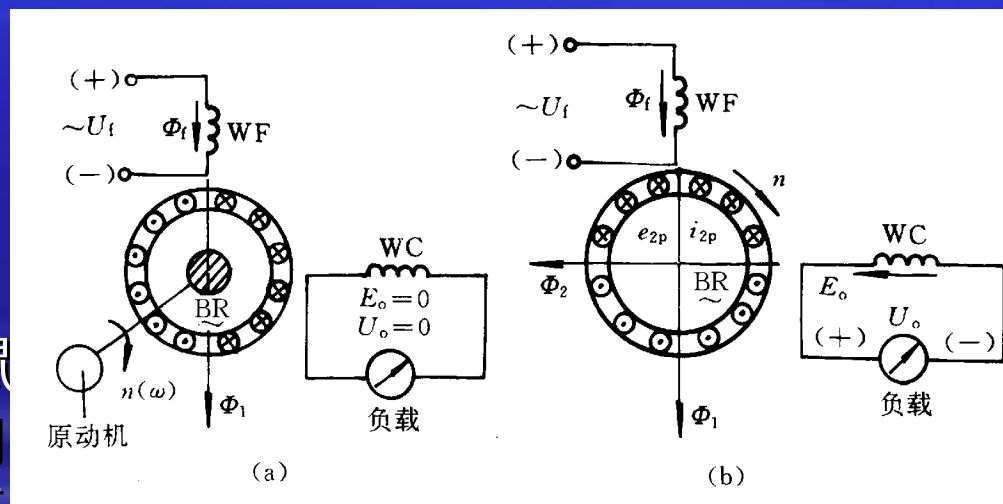
- 步进电动机无论采用哪种通电方式，步距角都太大，无法满足生产中对精度的要求，在实际应用中一般采用小步距角的步进电动机。设转子齿数为 z ，定子相数为 m ，则齿距角 τ 和步距角 β 为：
- $T=360/z$ $\beta=360/K m z$
- 其中 K 为状态系数，对于单相轮流通电方式和双相轮流通电方式来说， $K=1$ ，而对于单双相轮流通电方式来说， $K=2$ 。
- 从上式可知，步距角与相数及齿数有关，要想获得小的步距角的话，必须增大相数或齿数。但是，相数越多的话，它的驱动电源就越复杂，并且成本也越高，一般的步进电动机做成二相、三相、四相、五相或六相。因此，减小步距角的根本方法是增加转子齿数 z 。

3) 测速发电机

测速发电机将转速转变为电压信号，广泛用于速度和位置控制系统中。

- 1. 异步 (交流) 测速发电机
- 1) 结构特点：定子上有两套互差 90 度电角度的激磁绕组 WF 和输出绕组 WC；转子为空心杯形。
- 2) 工作原理：杯形转子可以看成是一个导条非常多的鼠笼转子。在激磁电压一定的情况下，当输出绕组的负载很小时，测速发电机的输出电压 U_0 与转速 n 成正比：

$$U_0 = Kn$$



转子静止时

转子转动时

3) 交流测速发电机使用中的几个问题

:

■ (1) 主要技术指标

- 剩余电压：测速发电机转速为零时的输出电压。它会使控制系统误动作。

■ 线性误差 ρ :

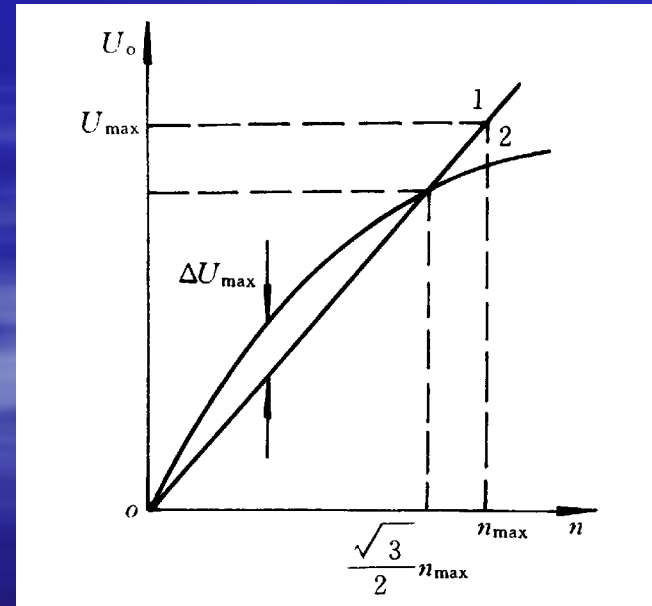
由非线性引起的误差。一般系统要求 1% -2%; 精密系统要求 0.1%-0.25%。

- 相位误差：一般要求不超过 1 度 -2 度。

- 灵敏度：交流测速发电机的灵敏度比较低。

■ (2) 使用中应注意的问题：

- 输出特性的线性度，
- 温度变化的影响，可加温度补偿装置。



输出特性的线性度

2. 直流测速发电机

- 1) 基本原理
- 电气原理如右图所示,它是一种测量转速用小型他激直流发电机.空载时,电枢两端电压为:

$$U_{a0} = E = C_e n$$

$$U_a = C_e n / (1 + U_a / U_L)$$

- 2) 输出特性:负载越小,转速越高,输出特性曲线弯曲越厉害.
- 3) 性能:
没有剩余电压,特性斜率比异步机大;
有换向器和电刷,换向火花产生无线电干扰,输出特性不稳定.

