



制动控制实践I

# 直流电机的特性与控制方法

哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 解伟男

# 回顾

## 电机概述

- n 电机定义：电磁感应定律为原理，来实现能量转换或信号传递的电气设备或机电元件。
- n 电机应用：电力系统，工厂，交通运输，军事，医疗，家用电器。
- n 电机分类：按原理分，按电流性质分，按运动方式分。

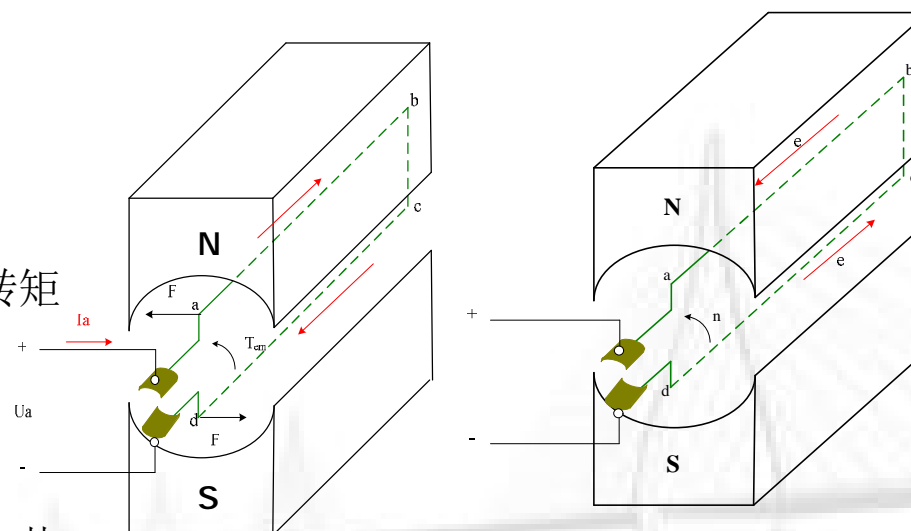
## 直流电机工作原理

- n 直流电动机工作原理：

外接电源  $\rightarrow$  电枢电流  $\rightarrow$  电磁转矩

- n 直流发电机工作原理：

外加力矩  $\rightarrow$  电枢转动  $\rightarrow$  感应电势



# 回顾

## ○ 直流电机结构

定子 { 主磁极: 建立主磁场, 永磁式或电磁式  
机壳: 固定主磁极和端盖, 构成磁路的一部分  
电刷装置: 把直流电压、电流引入或引出的装置

气隙 使定子转子能够相对运动

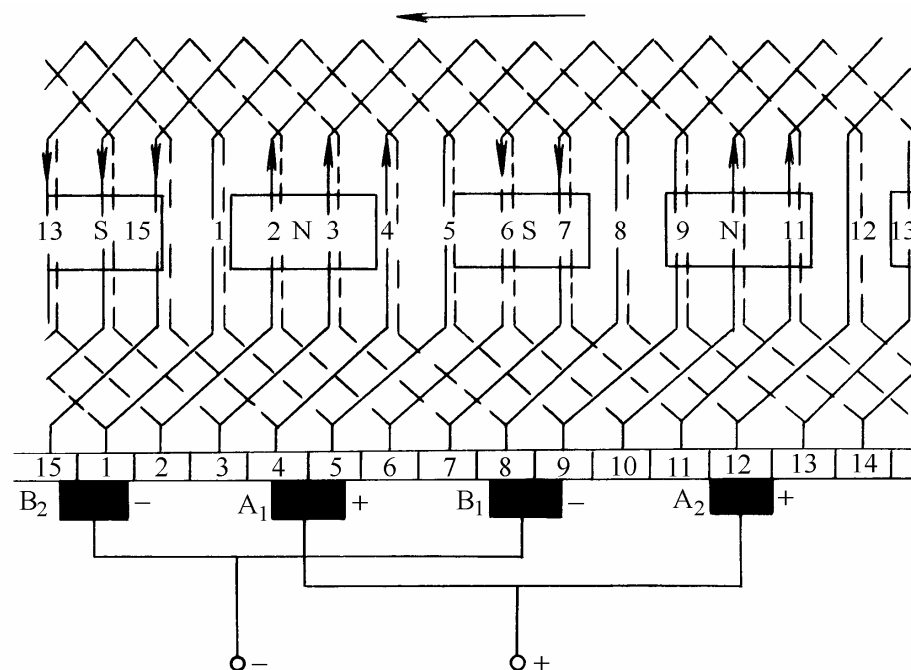
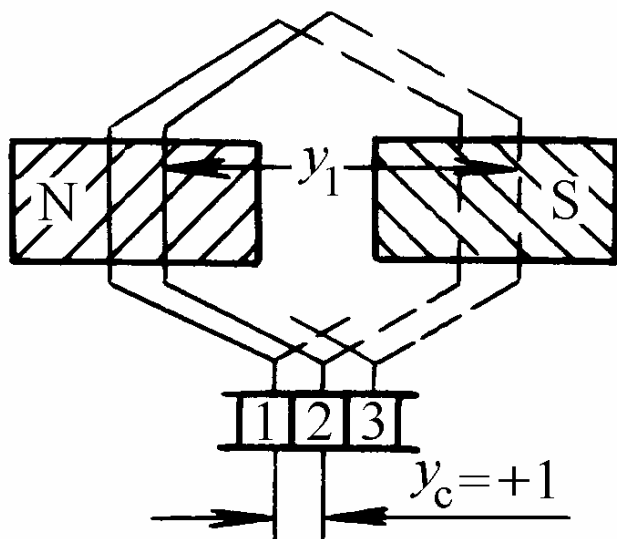
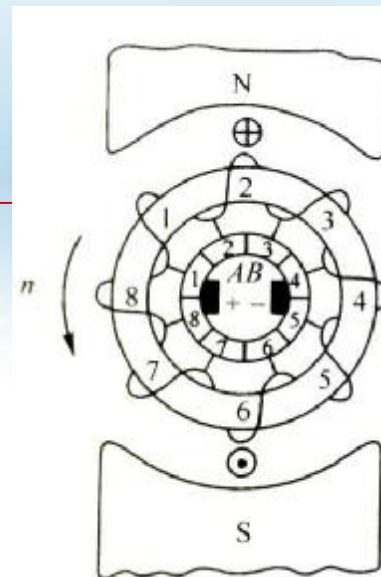
转子 { 电枢铁心: 主磁路的一部分, 嵌放电枢绕组  
电枢绕组: 电路的一部分, 实现能量转换  
换向器: 电刷和绕组之间直流和交流相互转换

# 回顾

## ○ 直流电机的绕组

**n** 环形绕组

**n** 鼓形绕组：单叠绕组，单波绕组。



# 回顾

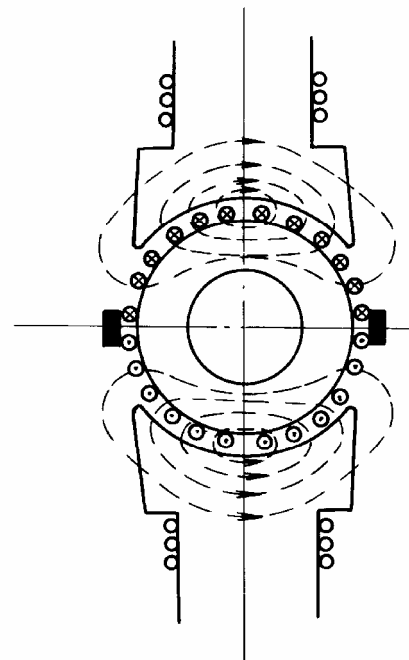
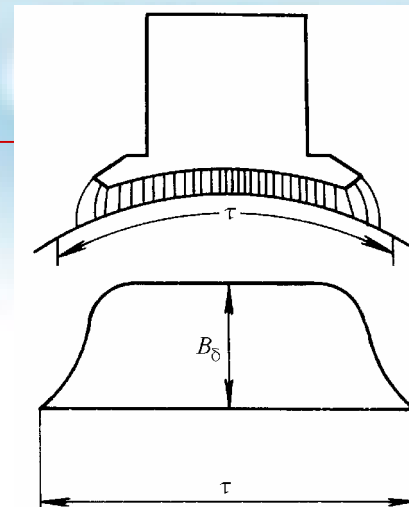
## ○ 直流电机的励磁方式

- n 永磁式
- n 电磁式：他励式、并励式，串励式、复励式

## ○ 直流电机的磁场

- n 空载磁场：电枢电流等于零或者很小，且可以不计其影响的一种运行状态  
主磁场+漏磁场
- n 负载磁场：空载磁场+电枢磁场
- n 电枢磁场：由电枢建立的磁场
- n 电枢反应：电枢磁动势对励磁磁动势所产生的气隙磁场的影响称为电枢反应
- n 电角：

$$\text{电角} = \text{极对数 } p \times \text{机械角}$$



# 回顾

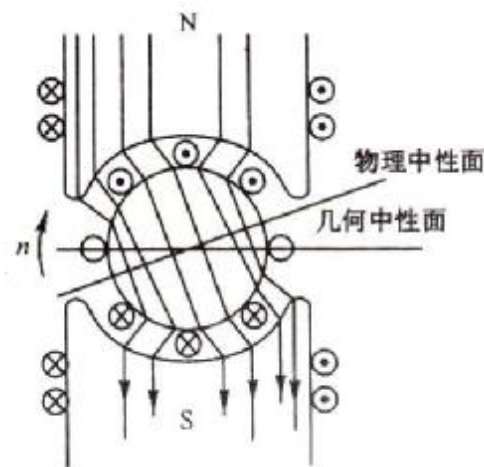
## ○ 电枢反应的影响

- n 使气隙磁场发生畸变：使物理中性面和几何中性面不再重合，几何中性面磁密不为零。

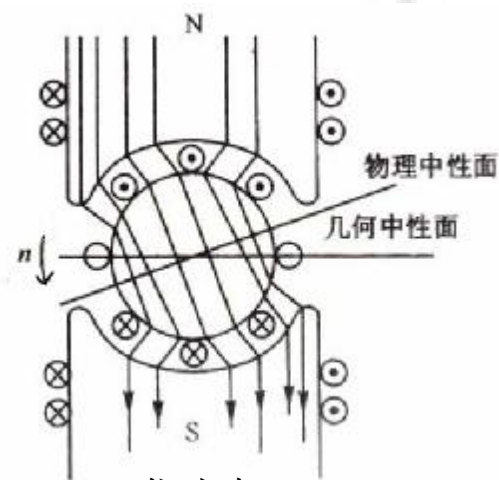
电动机：物理中性面逆着电机旋转方向转过一个角度。

发电机：物理中性面顺着电机旋转方向转过一个角度。

- n 呈去磁作用



电动机



发电机

# 回顾

## ○ 直流电机的换向

- n 换向过程：直流电机中，电枢绕组从一个磁极转向极性相反的另一个磁极，电枢绕组中的电流改变方向，这个过程叫做换向过程。
- n 换向过程中产生的两种电动势：自感电动势+感应电动势
- n 自感电动势和感应电动势总是阻碍换向的。
- n 电枢电流越大，电机转速越高，换向元件中的总电势 $e_s$ 越大，换向火花越强烈。
- n 改善换向的方法：移动电刷、增加换向磁极、选用合适电刷

# 目 录

## 1 直流电机的基本关系式

- 1.1 电枢电磁转矩
- 1.2 电枢感应电动势
- 1.3 电压平衡方程
- 1.4 转矩平衡方程
- 1.5 功率平衡方程

## 2 直流电机的铭牌

## 3 直流电机的静态特性与控制方法

## 4 直流电机的工作状态



# 1 直流电机的基本关系式

## ○ 电枢的电磁转矩

**n** 条件与假设：电枢表面是光滑的，电刷放在几何中性面上，**N**极下的载流导体其电流方向相同大小相等，**S**极下导体的电流为反向。每个极下的气隙磁场除**N**、**S**极性不同，其分布情况也为重复。因此在每个磁极下载流导体上的合成电磁转矩大小方向相同。

**n** 理论基础：安培定律

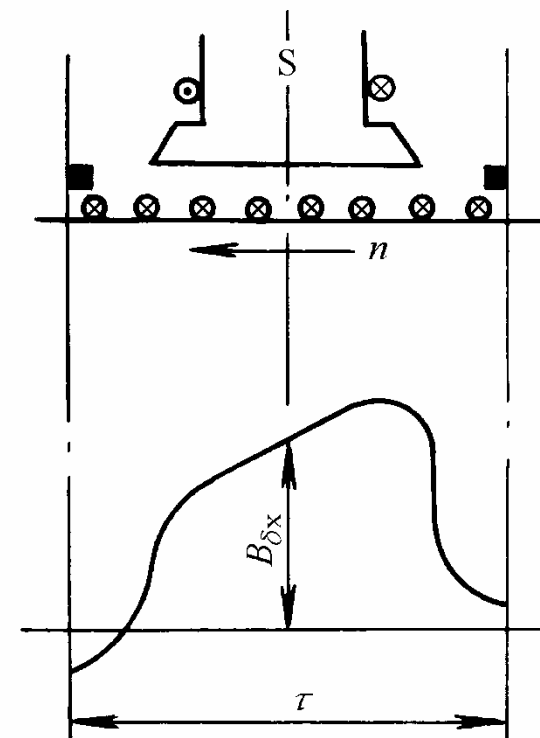
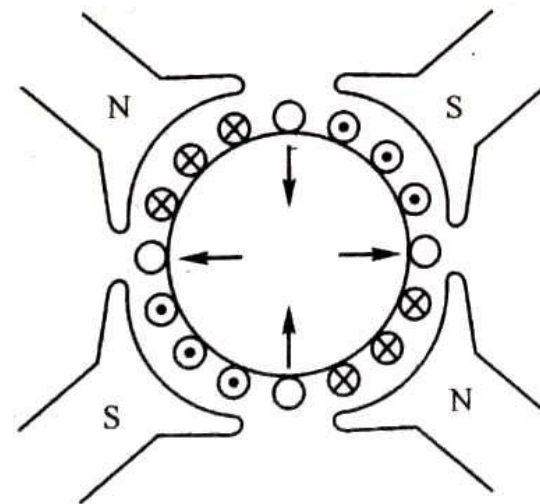
$$F = BIl$$

**n** 元件受力

设气隙某处的径向磁通密度为  $B_{dx}$ ，元件匝数为  $N_y$ ，元件有效边长度为  $l$ ，元件中的电流为  $i_a$ ，则此处元件边所受的切向力为：

$$F_c = N_y B_{dx} l i_a$$

方向由左手定则确定。



# 1 直流电机的基本关系式

## ○ 电枢的电磁转矩

n 元件所受力矩

$$T_c = F_c \frac{D_a}{2} = N_y B_{dx} l_a \frac{D_a}{2}$$

其中  $D_a$  为电枢外径。

n 每一磁极下合成电磁转矩

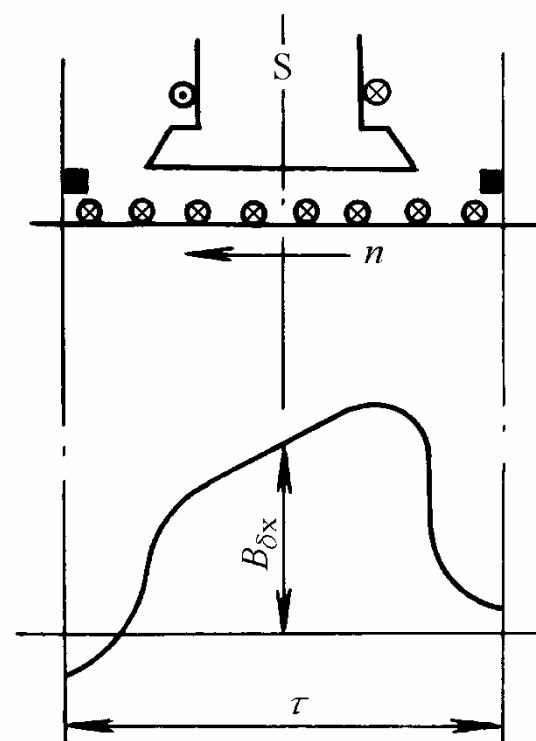
若电机元件总数为  $S$ ，元件边数为  $2S$ ，则每极下元件数为  $S/p$ ，则每磁极下电磁转矩为

$$T_p = \sum_1^{S/p} T_c = N_y l_a \frac{D_a}{2} \sum_1^{S/p} B_{dx}$$



$$T_p = N_y l_a \frac{D_a}{2} \frac{S}{p} B_{av}$$

其中  $B_{av}$  为平均气隙磁密  $B_{av} \approx \frac{1}{S/p} \sum_1^{S/p} B_{dx}$



# 1 直流电机的基本关系式

## ○ 电枢的电磁转矩

n 每一磁极下合成电磁转矩

$$T_p = N_y i_a \frac{D_a}{2} \frac{S}{p} B_{av}$$

令 $t$ 表示电机极距，则有

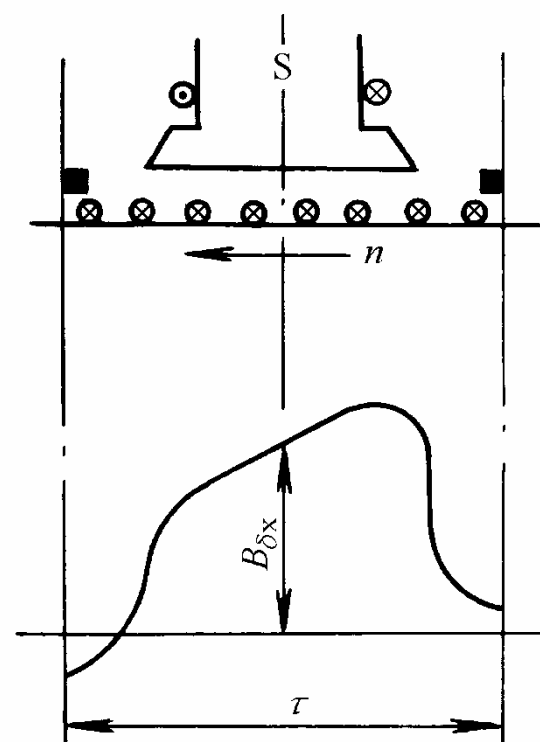
$$pD_a = 2pt \text{ 和 } \Phi = B_{av}lt$$

带入转矩表达式

$$T_p = N_y i_a \frac{S}{p} \Phi$$

n 总电磁转矩

$$T_{em} = 2pT_p = 2pN_y i_a \frac{S}{p} \Phi$$



# 1 直流电机的基本关系式

## ○ 电枢的电磁转矩

### n 总电磁转矩

令绕组的全部有效导体数为

$$Z = 2SN_y$$

令  $a$  为电枢支路对数，则电枢总电流为

$$I_a = 2ai_a$$

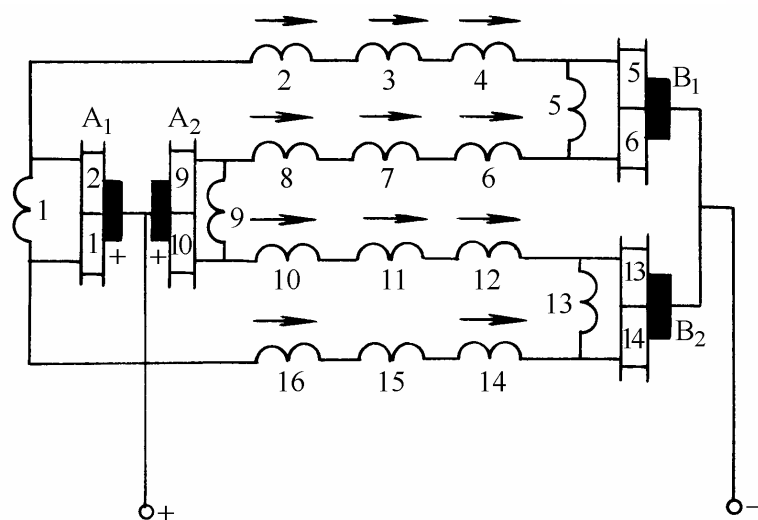
则电机总转矩为

$$T_{em} = \frac{Zp}{2pa} \Phi I_a = C_t \Phi I_a$$

当磁通  $\Phi$  为常值时可写为

$$T_{em} = K_t I_a$$

其中  $T_{em}$  为电机的电磁转矩(Nm);  $\Phi$  为主磁场每极下的气隙总磁通(Wb);  $I_a$  为电枢电流(A);  $C_t$  为电机的一个常数,  $K_t$  为转矩灵敏度或称转矩系数



电磁转矩与电枢电流成正比

# 1 直流电机的基本关系式

## ○ 电枢的感应电动势

n 条件与假设：电枢表面是光滑的，电刷放在几何中性面上。

n 理论基础：导体切割磁力线

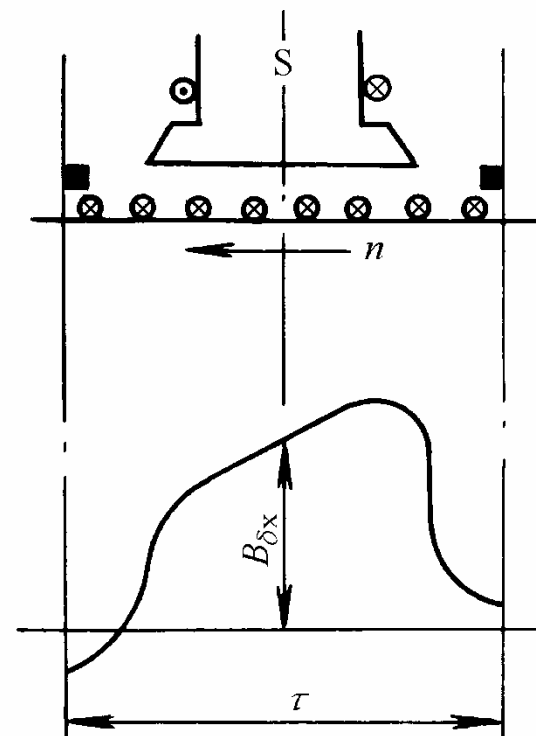
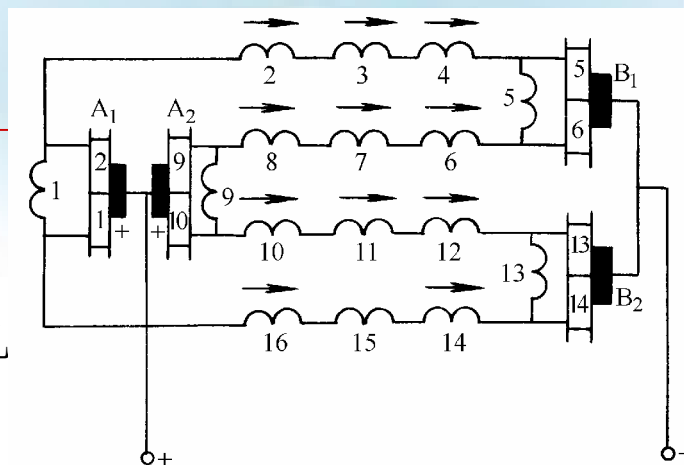
$$e = blv$$

n 元件的感应电动势

设气隙某处的径向磁通密度为  $B_{\delta x}$ ，元件匝数为  $N_y$ ，元件有效边长度为  $l$ ，导体切割气隙磁场的线速度为  $v$ ，则此处元件边的感应电动势为：

$$E_c = N_y B_{\delta x} l v$$

方向由右手定则确定。



# 1 直流电机的基本关系式

## ○ 电枢的感应电动势

n 每一支路的感应电动势

若电机元件总数为  $S$ ，元件有效边数为  $2S$ ，  
每一支路的串联元件有效边为  $S/a$ ，则支路  
感应电动势为

$$E_a = \sum_1^{S/a} E_c = N_y l_v \sum_1^{S/a} B_{dx}$$

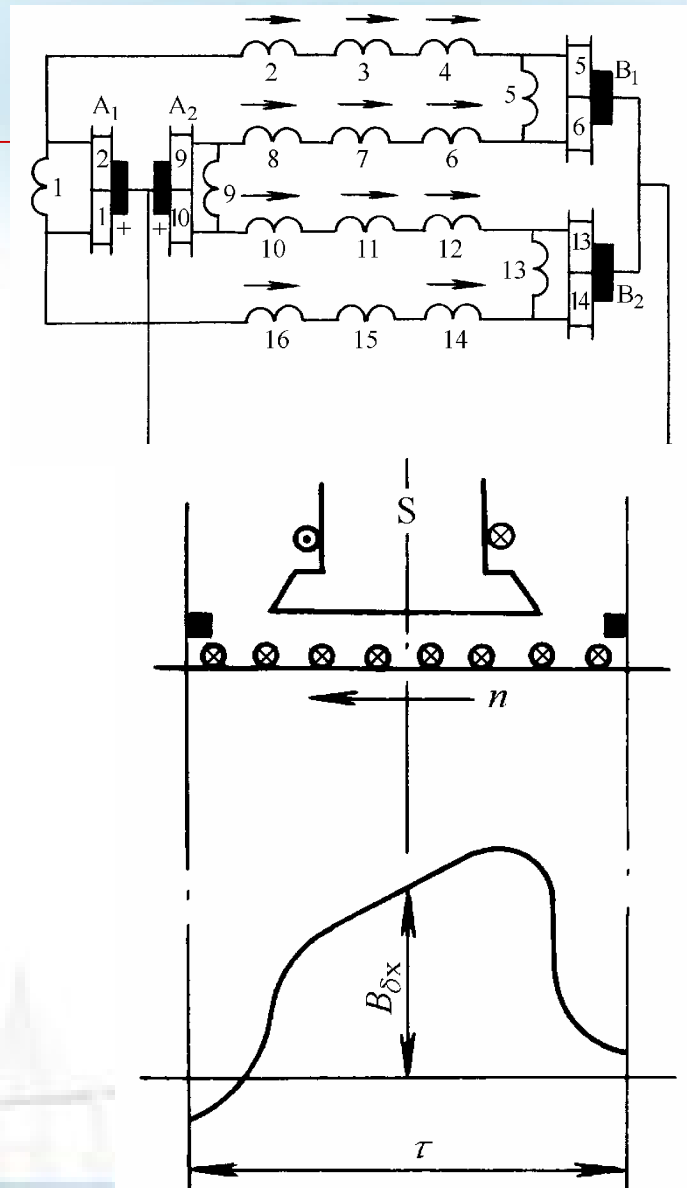


$$E_a = N_y l_v \frac{S}{a} B_{av}$$

其中  $B_{av}$  为平均气隙磁密  $B_{av} \approx \frac{1}{S/a} \sum_1^{S/a} B_{dx}$

令绕组的全部有效导体数为  $Z = 2SN_y$ ，则支  
路感应电动势为

$$E_a = \frac{Z}{2a} l_v B_{av}$$



# 1 直流电机的基本关系式

## ○ 电枢的感应电动势

**n** 总感应电动势(即支路感应电动势)

若电机转速为  $n$  (r/min), 则电枢绕组线速度为:

$$v = \frac{n}{60} 2p \frac{D_a}{2} = 2pt \frac{n}{60}$$

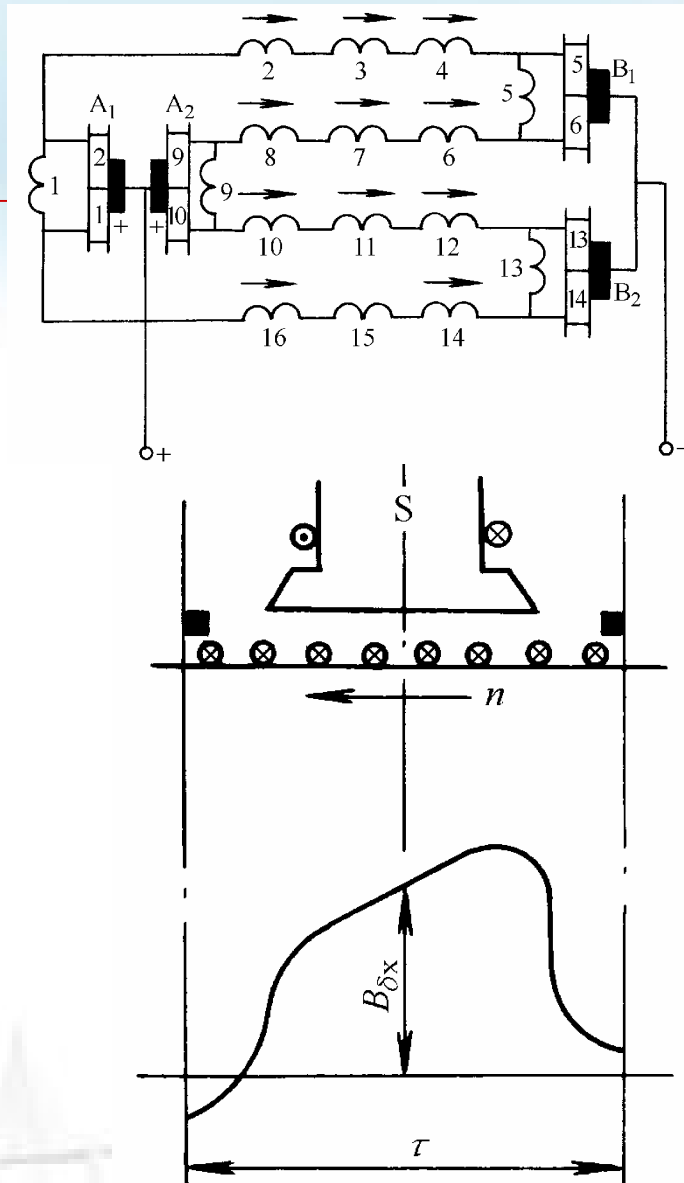
其中  $p$  为极对数,  $t$  为极距, 则总感应电动势为:

$$E_a = 2 \frac{pn}{60} \frac{Z}{2a} (B_{av} tl) = \frac{pZ}{60a} \Phi n = C_e \Phi n$$

当  $\Phi$  为常数时, 该式可写成

$$E_a = K_e \omega$$

其中  $E_a$  为感应电动势(V),  $\Phi$  为主磁场每极下的气隙总磁通(Wb);  $n$  为转速(r/min);  $\omega$  为转速(rad/s);  $C_e$  为电机的一个常数;  $K_e$  为反电势系数。



感应电势与电枢转速成正比

# 1 直流电机的基本关系式

## ○ 电枢电磁转矩与电枢的感应电动势的几点说明

n  $K_t$ 与 $C_t$ 的关系

$$K_t = C_t \Phi$$

n  $K_e$ 与 $C_e$ 的关系

• 当 $\omega$ 与 $n$ 的单位相同时:

$$K_e = C_e \Phi$$

• 当 $\omega$ 的单位是 $\text{rad/s}$ ,  $n$ 的单位是 $\text{r/min}$ 时:

$$n(\text{rpm}) = \frac{2p}{60} n(\text{rad/s})$$

$$U_a = K_e \frac{2p}{60} n = C_e \Phi n$$



$$K_e = \frac{60}{2p} C_e \Phi$$



# 1 直流电机的基本关系式

## ○ 电枢电磁转矩与电枢的感应电动势的几点说明

### n $K_t$ 与 $K_e$ 的关系以及 $C_t$ 与 $C_e$ 的关系(证明见后)

- 当磁通 $\Phi$ 的单位是**Wb**，电流 $I_a$ 的单位是**A**，转矩 $T_{em}$ 的单位是**Nm**，转速的单位是**r/min**时：

$$C_t = \frac{60}{2p} C_e = 9.55 C_e$$

- 当磁通 $\Phi$ 的单位是**Wb**，电流 $I_a$ 的单位是**A**，转矩 $T_{em}$ 的单位是**gfcm**，转速的单位是**r/min**时：

$$C_t = 97400 C_e$$

- 当采用国际单位制时：

$$K_t = K_e$$

$$C_t = C_e$$

# 1 直流电机的基本关系式

## ○ 电枢电磁转矩与电枢的感应电动势的几点说明

### n 电磁转矩与感应电势的波动

电机转子有齿槽，电枢导体集中在有限的槽内而不在电枢表面。

电磁转矩和感应电势的瞬时值随着电枢转动而上下波动，波动的平率为齿频率 ( $z$  为电枢齿数或槽数)：

$$f_s = \frac{zn}{60}$$

电势纹波系数

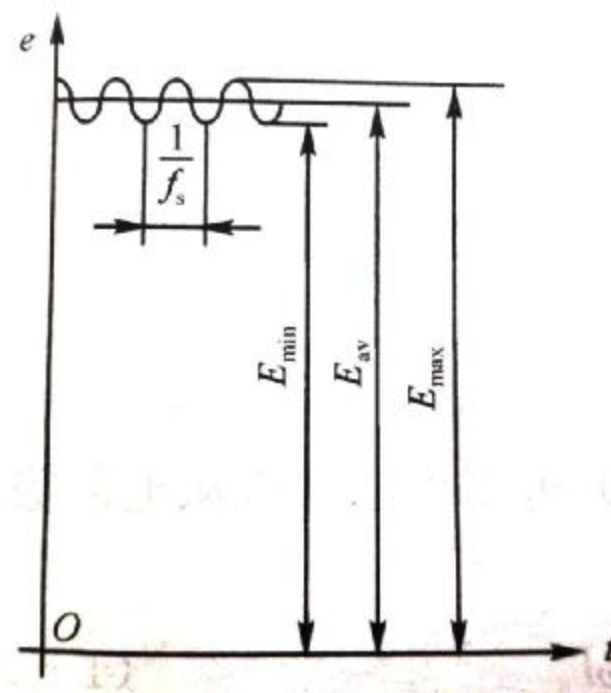
$$e = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%$$

转矩纹波系数

$$e = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} \times 100\%$$

$$T_{em} = C_t \Phi I = K_t I$$

$$E_a = C_e \Phi n = K_e W$$



# 1 直流电机的基本关系式

## ○ 直流电机的电压平衡方程

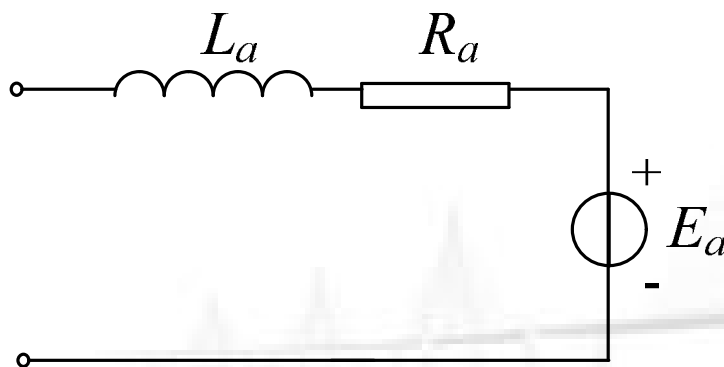
n 电枢是由线圈组成

电枢电感 $L_a$

电枢电阻 $R_a$

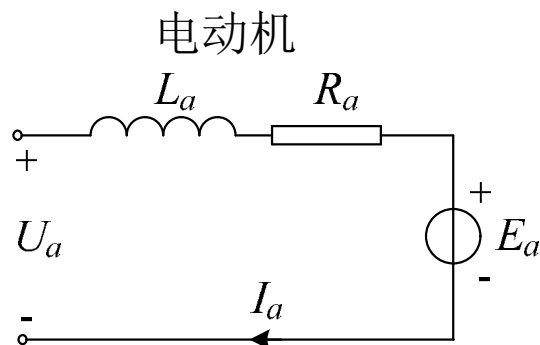
n 电枢转动

感应电势 $E_a$  (电动机中又称电枢反电势)



# 1 直流电机的基本关系式

## ○ 直流电机的电压平衡方程



### n 动态电压平衡方程

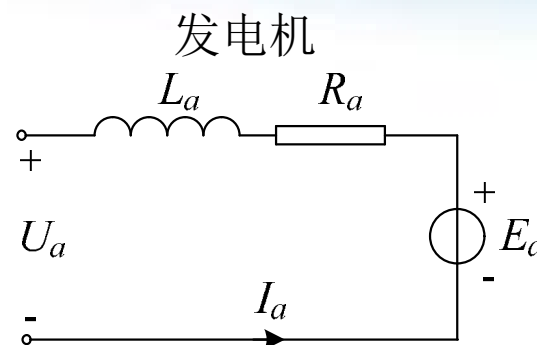
$$U_a = L_a \frac{dI_a}{dt} + R_a I_a + E_a$$

### n 静态电压平衡方程

$$U_a = R_a I_a + E_a$$

### n 电枢电流与感应电势方向关系

电枢电流与感应电势方向相反



$$E_a = L_a \frac{dI_a}{dt} + R_a I_a + U_a$$

$$E_a = R_a I_a + U_a$$

电枢电流与感应电势方向相同

# 1 直流电机的基本关系式

## ○ 直流电机的转矩平衡方程

### 直流电动机

**n** 电磁转矩  $T_{em}$

**n** 阻转矩(空载阻转矩)  $T_0$

机械摩擦(轴承、电刷和换向器)  
电枢铁心的涡流、磁滞损耗

**n** 输出转矩  $T_2 = T_{em} - T_0$

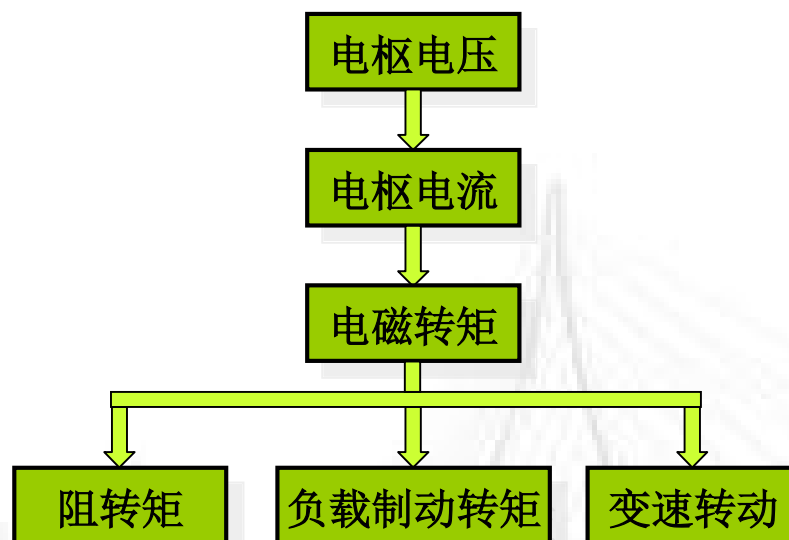
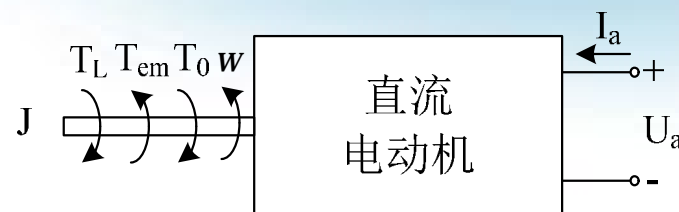
**n** 负载制动转矩  $T_L$

**n** 负载总阻转矩  $T_c = T_L + T_0$

**n** 电机轴总转动惯量  $J = J_m + J_L$

$J_m$  为电机转子转动惯量

$J_L$  为负载(包括传动轴、减速器)  
折算到电机轴上的转动惯量



# 1 直流电机的基本关系式

## ○ 直流电机的转矩平衡方程

直流发电机

n 原动机转矩 $T_1$

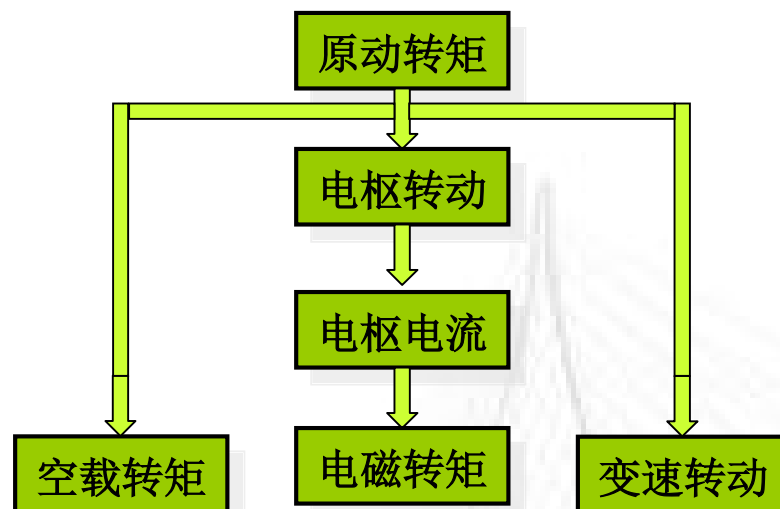
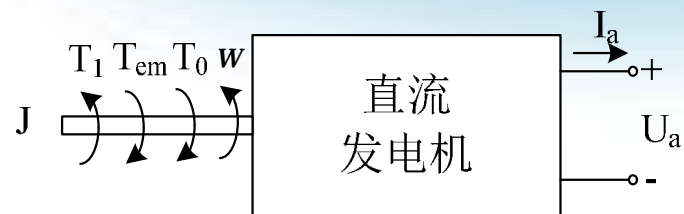
n 空载转矩 $T_0$

机械摩擦(轴承、电刷和换向器)  
电枢铁心的涡流、磁滞损耗

n 发电机组转动惯量 $J$

n 电磁转矩 $T_{em}$

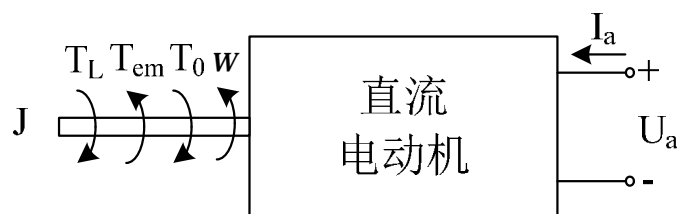
属于制动转矩



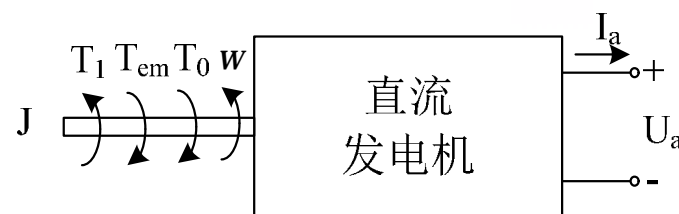
# 1 直流电机的基本关系式

## ○ 直流电机的转矩平衡方程

电动机



发电机



## n 动态转矩平衡方程

$$T_{em} = T_0 + T_L + J \frac{dw}{dt}$$

## n 静态电压平衡方程

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

## n 电磁转矩与转速的方向关系

电磁转矩与转速方向相同

$$T_1 = T_0 + T_{em} + J \frac{dw}{dt}$$

$$T_1 = T_0 + T_{em}$$

电磁转矩与转速方向相反

# 1 直流电机的基本关系式

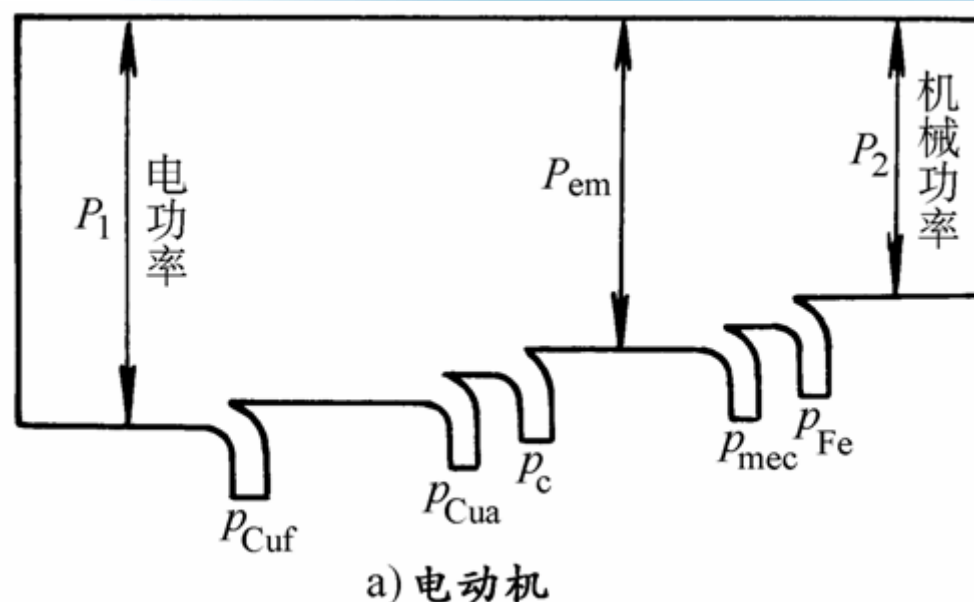
## ○ 直流电机的功率平衡关系

并励直流电动机

### n 输入电功率

$$P_1 = UI = U(I_a + I_f)$$

其中  $UI_f$  输入励磁回路功率，输入小量，其完全消耗于励磁回路电阻  $R_f$  中，称为励磁损耗  $p_{Cuf}$ 。



消耗在电枢绕组  $R_a$  中的功率称为电枢铜耗  $p_{Cua}$ 。

消耗在电刷与换向器接触电阻中的功率称为接触损耗  $p_c$ 。

输入电功率扣除前述损耗以后，就是转换为机械功率的电磁功率  $P_{em} = E_a I_a$ 。

### n 电功率平衡关系

$$P_1 = UI_f + I_a^2 R_a + 2\Delta U_c I_a + E_a I_a = p_{Cuf} + p_{Cua} + p_c + P_{em}$$



# 1 直流电机的基本关系式

## ○ 直流电机的功率平衡关系

并励直流电动机

### n 电磁功率

$$P_{em} = E_a I_a = T_{em} \omega$$

电枢铁心涡流与磁滞损耗的功率称为铁心损耗  $p_{Fe}$ 。

机械摩擦(轴承、电刷和换向器)损耗的功率称为机械损耗  $p_{mech}$ 。

空载损耗  $p_0 = p_{Fe} + p_{mech}$ ，其对应着空载转矩  $T_0$ 。

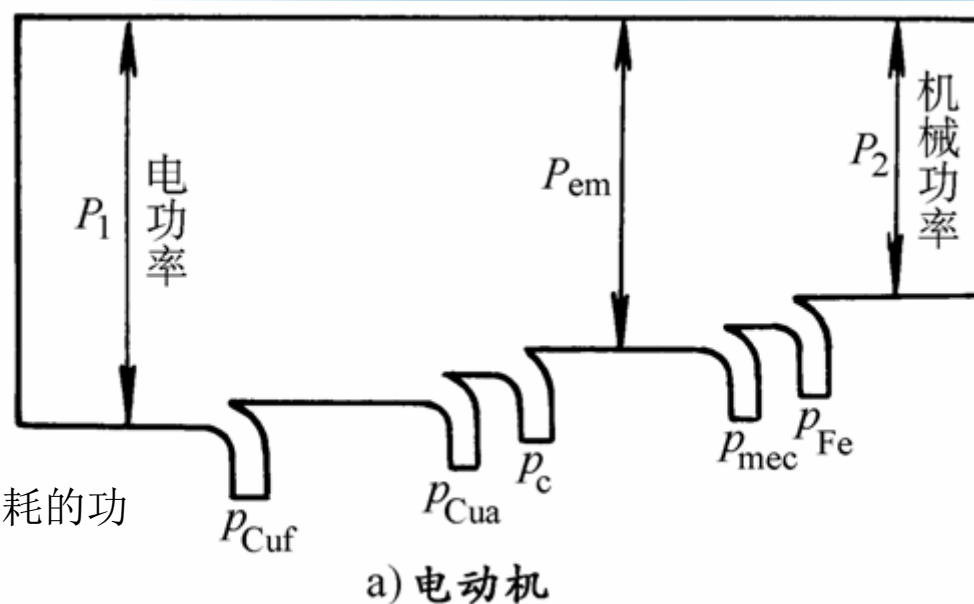
电磁功率扣除空载损耗以后，就是电动机的输出功率  $P_2 = T_2 \omega$ 。

### n 电磁功率平衡关系

$$P_{em} = T_2 \omega + T_0 \omega = P_2 + p_{Fe} + p_{mech}$$

### n 电动机的效率

$$h = P_2 / P_1$$



# 1 直流电机的基本关系式

○  $K_e = K_t$  的证明

n 电磁功率

$$P_{em} = E_a I_a = T_{em} \omega$$

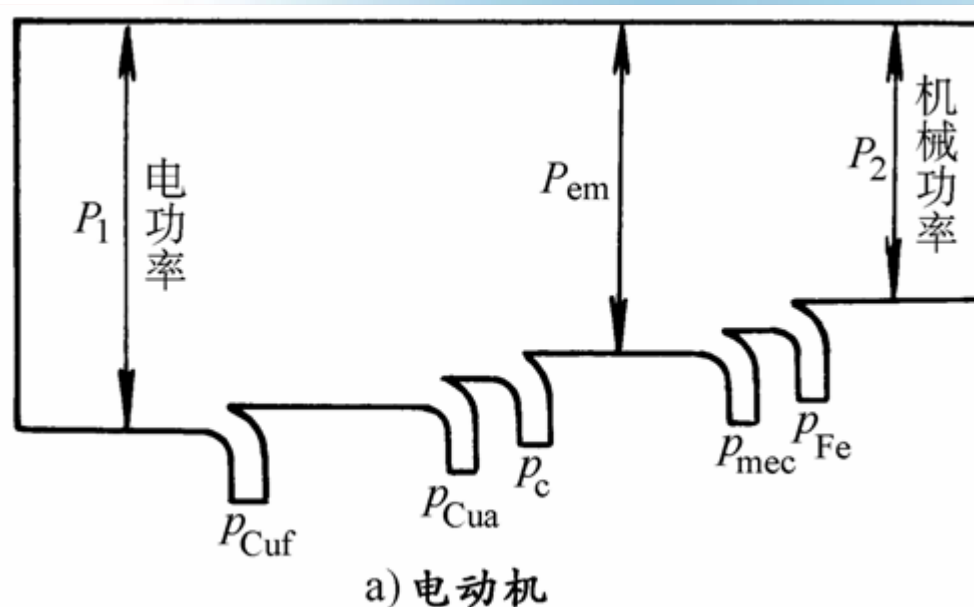
$$E_a = K_e \omega$$

$$T_{em} = K_t I_a$$

$$K_e \omega I_a = K_t I_a \omega$$

$$K_e = K_t$$

$$C_e = C_t$$



注意：在国际单位制下

# 1 直流电机的基本关系式

## ○ 直流电机的功率平衡关系

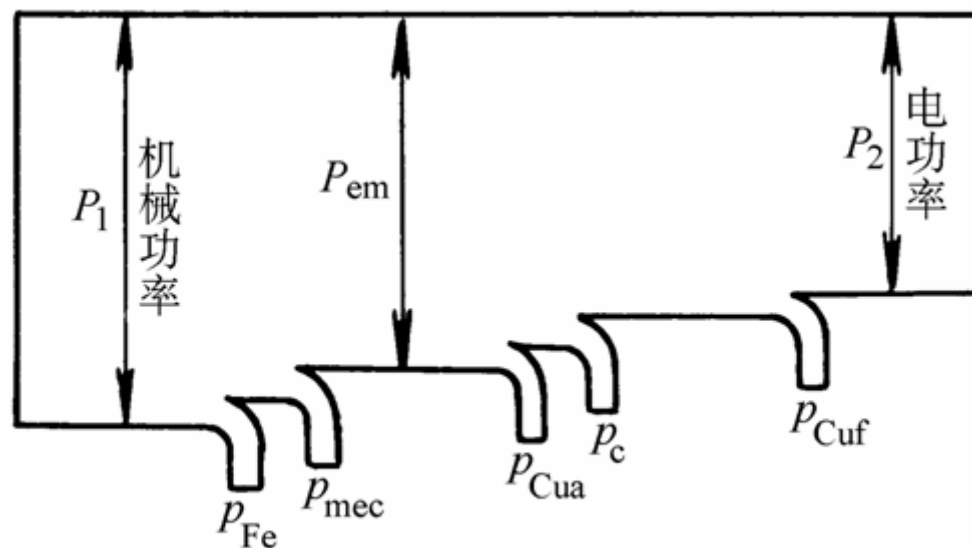
并励直流发电机

### n 机械功率平衡关系

$$\begin{aligned} P_1 &= T_1 \omega = (T_{em} + T_0) \omega = P_{em} + p_0 \\ &= P_{em} + p_{Fe} + p_{mec} \end{aligned}$$

### n 电磁率平衡关系

$$\begin{aligned} P_{em} &= E_a I_a = U I_a + I_a^2 R_a + 2 I_a \Delta U_c \\ &= P_2 + p_{Cuf} + p_{Cua} + p_c \end{aligned}$$



b) 发电机

# 1 直流电机的基本关系式

○ 电枢转矩:

$$T_{em} = C_t \Phi I = K_t I$$

○ 感应电势:

$$E_a = C_e \Phi n = K_e \omega$$

○ 电压平衡关系:

$$U_a = L_a \frac{dI_a}{dt} + I_a R_a + E_a$$

电动机

$$E_a = L_a \frac{dI_a}{dt} + I_a R_a + U_a$$

发电机

○ 转矩平衡关系:

$$T_{em} = T_0 + T_L + J \frac{d\omega}{dt}$$

电动机

$$T_1 = T_0 + T_{em} + J \frac{d\omega}{dt}$$

发电机

## 2 直流电机的铭牌



直流电动机			
型号		励磁方式	
容量	KW	励磁电压	V
电压	V	定额	
电流	A	绝缘等级	
转速	r/min	质量	kg
技术条件		出厂日期	
出厂编号		励磁电流	A
***电机厂			

- n 每台直流电机的基座上都有一块铭牌，上面标注着一些叫做“额定值”的铭牌数据。
- n 额定值是电机制造厂按照国家标准的要求，对电机的一些电量或机械量规定的数值。
- n 若电机运行时，这些电量和机械量都符合额定值，这样的电机运行情况称为额定工况。
- n 在额定工况下运行，可以保证电机可靠地正常工作，并具有优良的性能。

## 2 直流电机的铭牌

### ○ 额定功率 $P_N$ (KW)

- n 直流电动机：额定工况下轴上输出的机械功率
- n 直流发电机：额定工况下电机出线端输出的电功率

### ○ 额定电压 $U_N$ (V)

- n 直流电动机：额定工况下电枢上施加的直流电压
- n 直流发电机：额定工况下电枢上输出的直流电压

### ○ 额定电流 $I_N$ (A)

- n 直流电动机：额定电压下，轴上输出额定功率时的电流(并励应包括励磁电流和电枢电流)

$$P_N = U_N * I_N * \eta$$

$\eta$  为效率

- n 直流发电机：额定输出电压和额定输出功率时，直流电机出线端输出的电流

$$P_N = U_N * I_N$$

## 2 直流电机的铭牌

- 额定转速 $n_N$ (r/min): 额定工况时的转速
- 额定励磁电压 $U_{fN}$ (V)
- 额定励磁电流 $I_{fN}$ (A)
- 励磁方式
- 绝缘等级:

A级(105℃); E级(120℃), B级(130℃), F级(155℃), H级(180℃)

- 定额:

- n 连续工作制(S1): 电机在铭牌规定的额定值条件下, 可以长期运行
- n 短时工作制(S2): 电机在铭牌规定的额定值条件下, 只能在限定的时间内短时运行。短时运行的持续时间标准有四种: 10min、30min、60min及90min。
- n 断续工作制(S3): 电动机在铭牌规定的额定值条件下只能断续周期性使用, 用每周期10min的百分比表示。如:  $FC=25\%$ 。



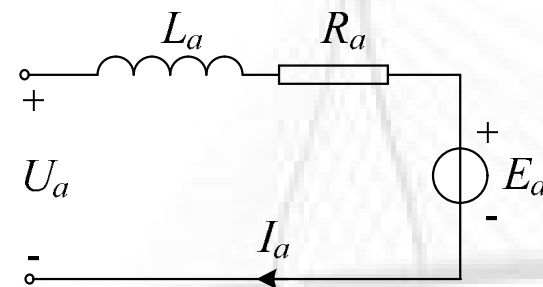
### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

#### ○ 直流电动机的静态特性

- n 当直流电动机的控制电压和负载转矩不变，电机的电流和转速达到恒定值时，就称电机处于静态或稳态。
- n 当直流电动机处于静态或稳态时，直流电动机内各变量间的关系叫静态特性。
  - 机械特性：转速与转矩的关系
  - 调节特性：转速与控制量（如电压）的关系

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

电枢电流和哪些量有关？





### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

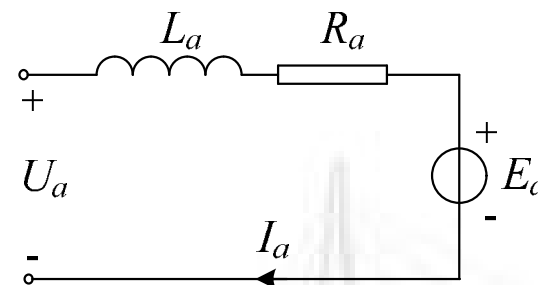
#### ○ 直流电动机的静态特性

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

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

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$

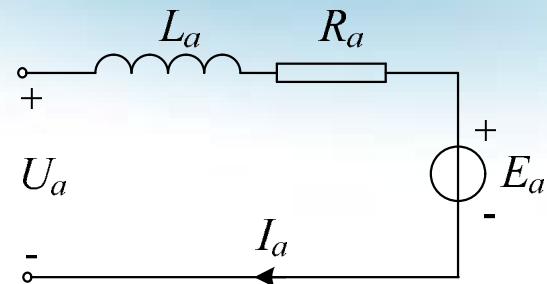
$$W = \frac{U_a}{K_e} - \frac{T_{em} R_a}{K_e K_t}$$



### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

#### ○ 直流电动机的静态特性

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$



n 直流电动机采用开环方式可控制的物理量是转速。所谓**调速**就是改变和控制电动机的转速。

n 调速的基本要求：

(1) 调速范围，通常以最大转速对最小转速的比值来表示，称为调速比。如 2:1，10:1 等

(2) 调速的平滑性，若果在调速范围内，能在任意转速下稳定运行，称为无极调速，否则称为有级调速

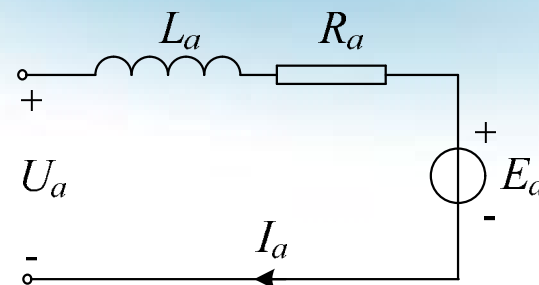
(3) 经济性，包括设备投资和运行费用的高低，调速方法是否简单，运行是否可靠。

转速和哪些量有关，可以调整哪些量来改变转速？

### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

#### ○ 直流电动机的静态特性

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$



- n 电枢控制：磁通不变时，通过改变电枢的电压(或电流)达到控制电机转速、转矩或转角的目的；

电枢控制具有良好的控制性能，在位置控制系统中都采用电枢控制，在小容量，要求快速性高的调速系统中也多用电枢控制

- n 磁场控制：在电枢电压不变时，通过改变激磁电流，控制磁通，从而实现控制电机转速、转矩或转角的目的；

磁场控制动态性能差，一些大容量、快速性要求不高的调速系统采用磁场控制。

- n 改变电枢回路电阻控制转速

功率损耗较大，仅用在某些调速系统中。

### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

#### ○ 电枢控制时的机械特性

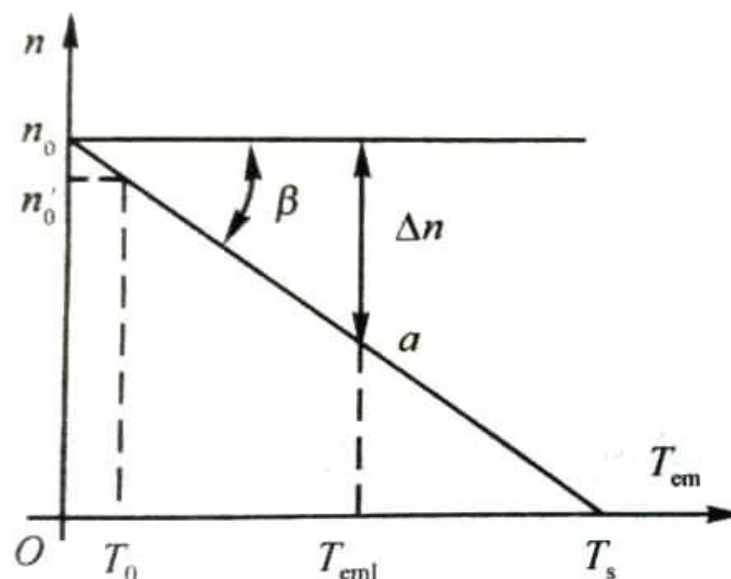
- n 机械特性**是指在一定的输入条件下，静态时电机的转速与电磁转矩(或输出转矩)的关系；
- n 电枢控制时的机械特性**指磁通不变，电枢电压为常数或参变量时转速与电磁转矩(或输出转矩)的关系；

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$

- n 理想空载转速 $n_0$** :  $T_{em} = T_c = 0$

$$n_0 = \frac{U_a}{C_e \Phi}$$

理想空载转速与电枢电压成正比



### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

#### ○ 电枢控制时的机械特性

n 理想空载转速 $n_0$ :

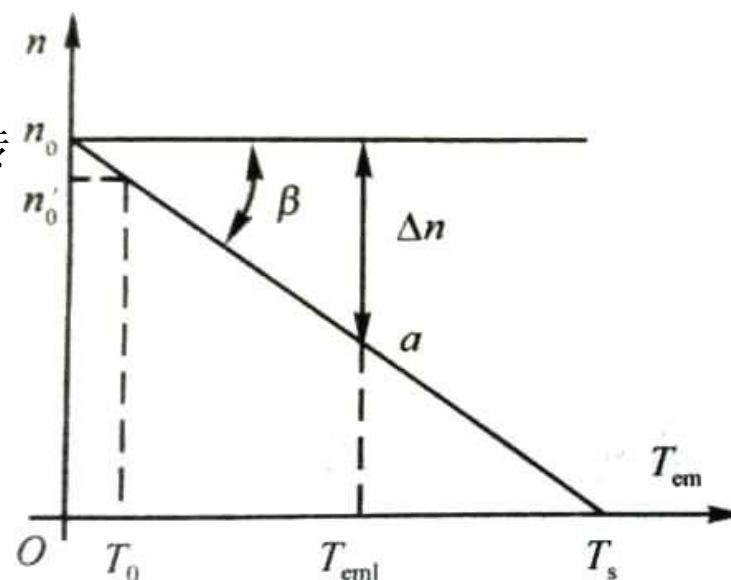
$$n_0 = \frac{U_a}{C_e \Phi}$$

当电机自身空载阻转矩为 $T_0$ 时，空载转速略低于理想空载转速

n 堵转转矩 $T_s$ : 转速为零时电动机的电磁转矩

$$T_{em} = \frac{U_a}{R_a} C_t \Phi$$

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$



### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

#### ○ 电枢控制时的机械特性

**n**  $\tan \beta$  是机械特性斜率的绝对值。

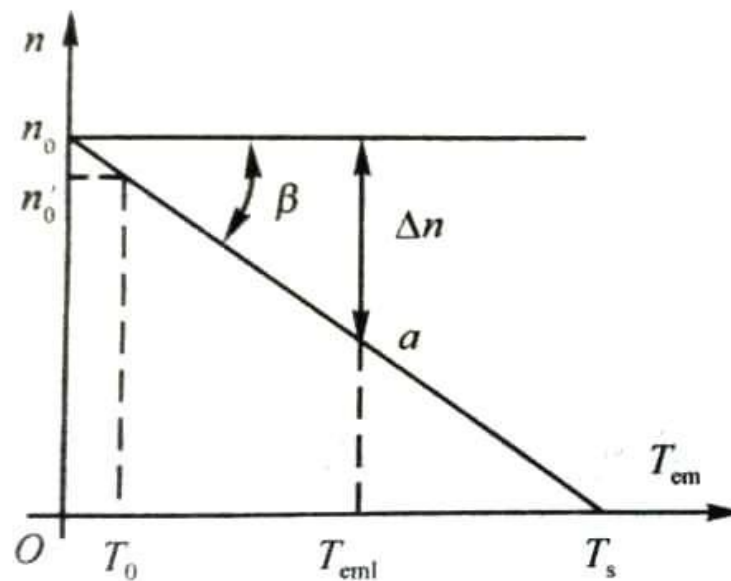
$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$

$$\tan b = \frac{n_0}{T_s} = \frac{R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$

当电磁转矩为 $T_{em1}$ 时，与 $n_0$ 相比，速度下降了

$$\Delta n = T_{em1} \tan b$$

- n**  $\beta$  越小则  $\Delta n$  越小，则称机械特性比较硬。
- n**  $\beta$  越大则  $\Delta n$  越大，则称机械特性比较软。

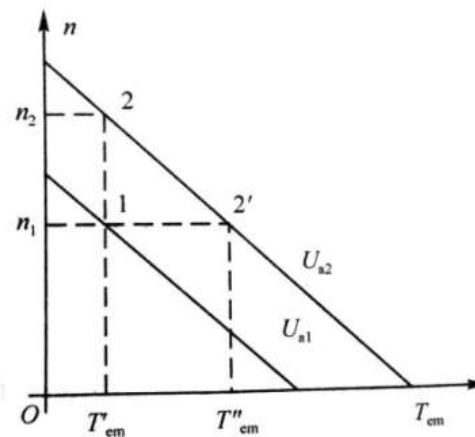
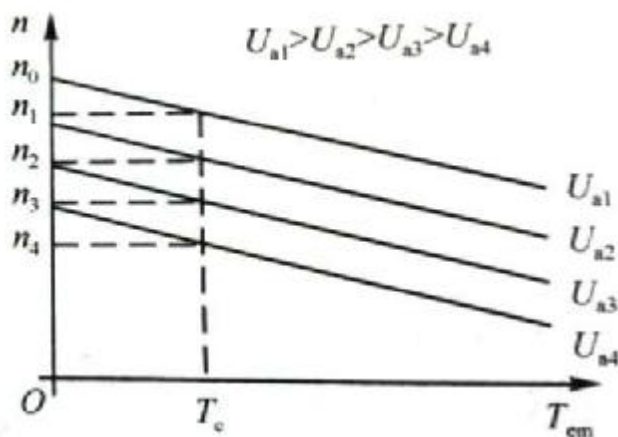


改变电枢电阻调速，会有什么问题？

### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

#### ○ 电枢控制时的机械特性

n 如果改变电枢电压，可得到机械特性族，他们是一组平行线。



在电动机运行稳定的某一点，改变电枢电压，工作状态时怎么变化的呢？

工作点1 → 工作点2' → 工作点2

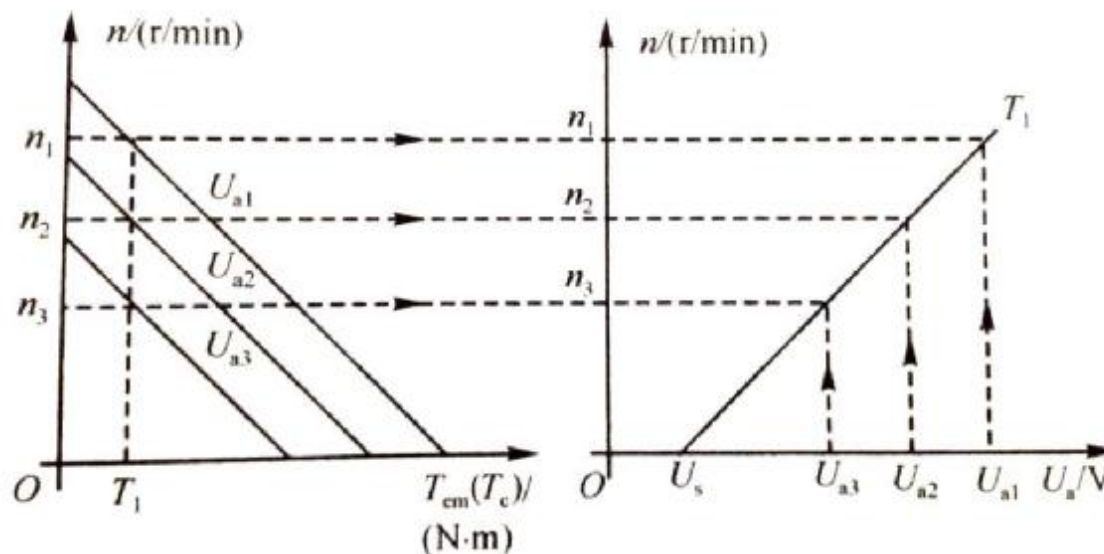
### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

#### ○ 电枢控制时的调节特性(控制特性)

- n 电枢控制时的调节特性指电磁转矩(或负载转矩)为参变量时电机的转速与电枢电压的关系。调节特性表明电枢电压对转速的调节作用。
- n 调节特性可由机械特性得到：

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$

$$\tan g = \frac{1}{C_e \Phi}$$





### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

#### ○ 电枢控制时的调节特性(控制特性)

n 启动电压或死区电压:  $U_s$

电机开始连续旋转所需的最小电枢电压

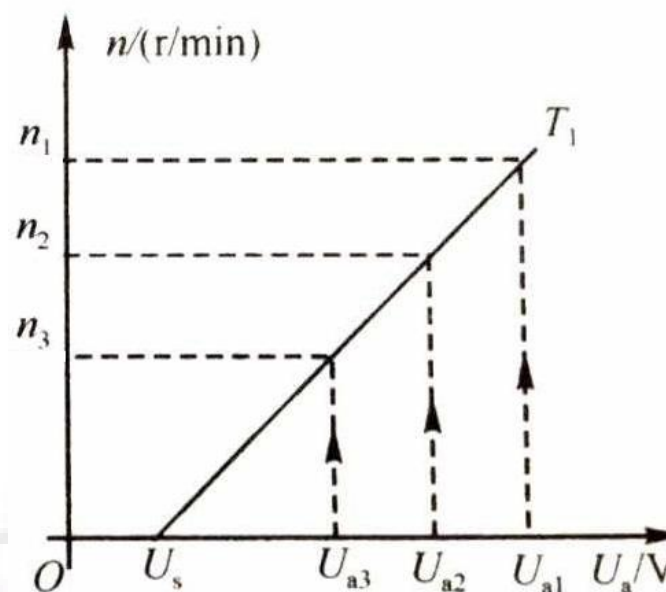
$$U_s = \frac{T_{em} R_a}{C_t \Phi} = \frac{T_c R_a}{C_t \Phi}$$

n 启动电流:  $I_s$

电机刚刚启动时的电流

$$I_s = \frac{T_{em}}{C_t \Phi} = \frac{T_c}{C_t \Phi} = \frac{U_s}{R_a}$$

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$



### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

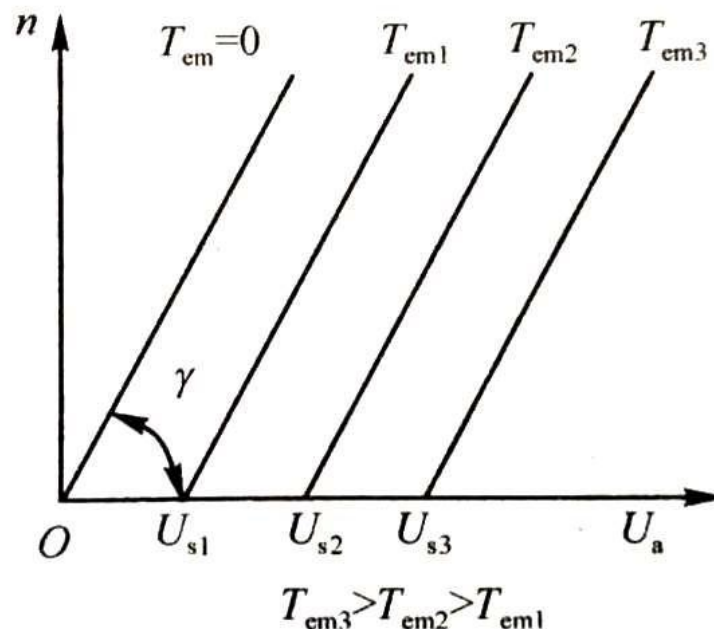
#### ○ 电枢控制时的调节特性(控制特性)

n 以电磁转矩为参变量可以得到不同转矩条件下的调节特性，为一组平行直线。

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$

n 直流电机采用电枢控制时，机械特性和调节特性都是直线，直流电机是线性元件。

n 电枢控制时需要较大的控制功率，要用较大容量的功率放大器。



**最常用的控制方法！**

### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

#### ○ 磁场控制(他励)

n 机械特性

n 随着磁通减小，机械特性斜率增加，特性变软。

$$\tan b = \frac{R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$

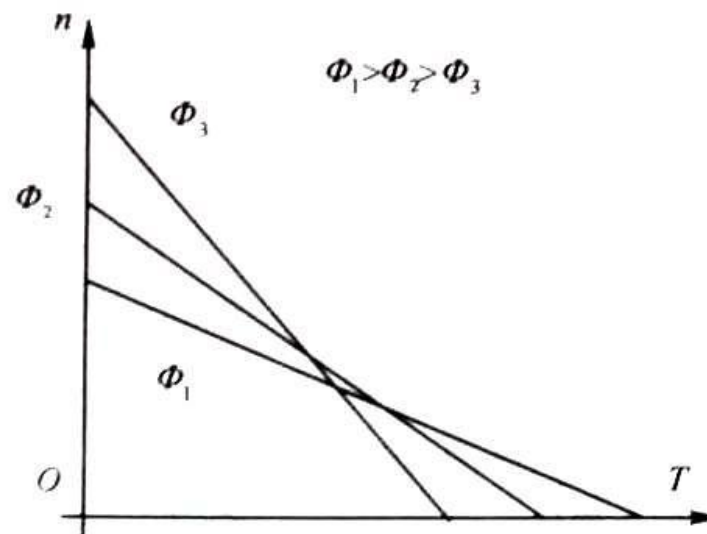
n 随着磁通减小，理想空载转速变大。

$$n_0 = \frac{U_a}{C_e \Phi}$$

n 随着磁通减小，堵转转矩变小。

$$T_s = \frac{U_a}{R_a} C_t \Phi$$

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$



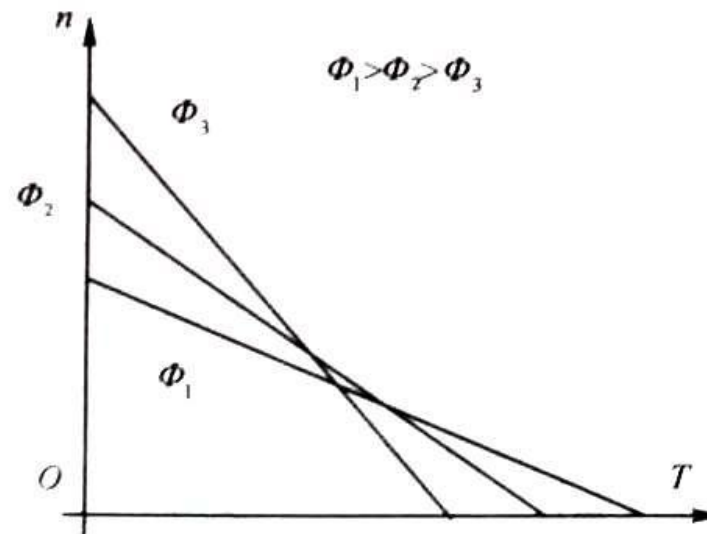
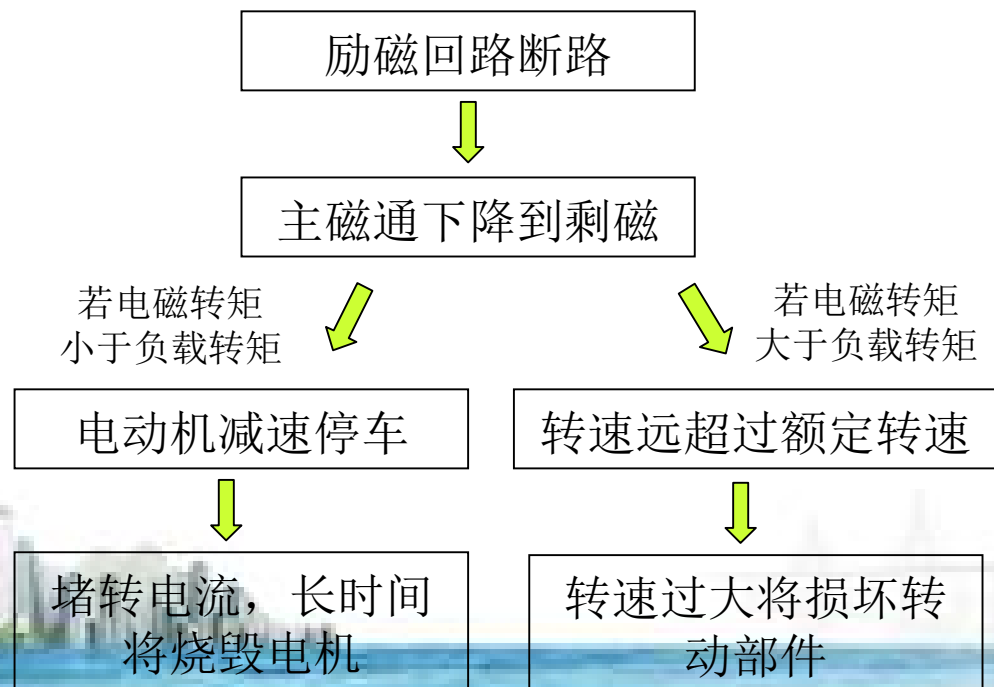
### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

#### ○ 磁场控制(他励)

n 机械特性

n 他励电机在运行过程中励磁回路突然断路，会产生什么问题？

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$



### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

#### ○ 磁场控制(他励)

**n** 调节特性(双曲线)

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$

**n** 对磁通求导并令其为零，可得临界磁通。

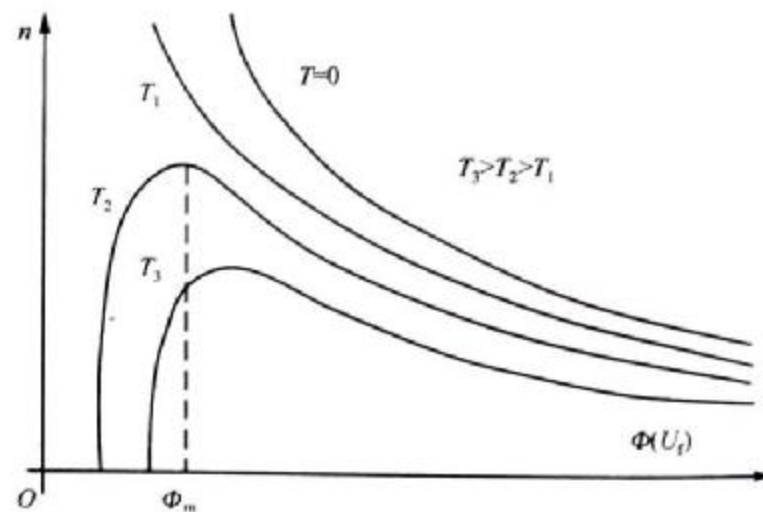
$$\Phi_m = \frac{2R_a T_{em}}{C_t U_a}$$

**n** 可得最大电机转速

$$n_{\max} = \frac{C_t U_a^2}{4R_a C_e T_{em}}$$

当  $\Phi > \Phi_m$  时，转速  $n$  随着磁通  $\Phi$  减小而升高

当  $\Phi < \Phi_m$  时，转速  $n$  随着磁通  $\Phi$  减小而降低



### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

#### ○ 磁场控制(他励)

n 改变磁通 $\Phi$ 的方法:

- 改变激磁回路电阻
- 改变激磁电压

n 调磁: 调节激磁电流 $I_f$ 及磁通 $\Phi$ 的大小, 这种方法称为调磁。

n 调磁调速: 通过调磁调节直流电动机转速。

n 磁路接近饱和, 调磁时一般减小磁通。

n 磁场控制是在励磁电路中进行调节, 控制方便, 能量损耗小, 调速平滑型较高。

### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

#### ○ 改变电枢回路串联电阻

- n** 在电枢回路串联一个电阻 $R_s$ ，这个电阻称为调节电阻。
- n** 改变调节电阻的大小，也就改变了电枢回路的总电阻

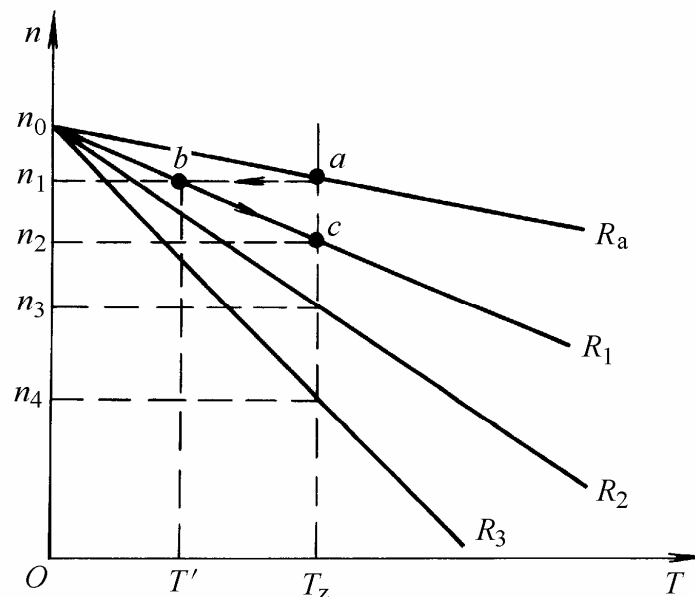
$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_s}{C_e C_t \Phi^2} T_{em}$$

- n** 空载时，几乎没有调速作用。

在电动机运行稳定的某一点，改变调节电阻，工作状态时怎么变化的呢？

工作点 $a \rightarrow$ 工作点 $b \rightarrow$ 工作点 $c$

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$



### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

#### ○ 改变电枢回路串联电阻

- n 调速副范围不大，低速时机械特性变软，调速平滑性不高，并且是有极调速。
- n 经济性：  
由于串入的电阻上有能量损耗，所以直流电机串电阻调速效率低
- n 优点：方法比较简单，控制设备不复杂。一般用于串励或者复励电动机拖动的电车、炼钢车间的浇铸吊车等生产机械上。



### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

例：一台他励直流电动机的数据为： $U_N=220\text{V}$ ,  $I_N=41.4\text{A}$ ,  $n_N=1500\text{r/min}$ ,  $R_a=0.4\ \Omega$ , 当负载为额定负载时(调速前后转矩不变):

- (1)如果在电枢中电路传入 $R_\Omega=1.65\ \Omega$ , 求串电阻后的转速;
- (2)如果电源电压下降为 $110\text{V}$ , 求电枢内无串接电阻时的转速;
- (3)如果减弱励磁使磁通 $\Phi$ 减小 $10\%$ , 求电枢不串电阻时的转速。

### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

解: 
$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 41.4 \times 0.4}{1500} \text{ V / (r / min)} = 0.136 \text{ V / (r / min)}$$

(1) 
$$n = \frac{U_N - I_N (R_a + R_\Omega)}{C_e \Phi} = \frac{220 - 41.4 \times (1.65 + 0.4)}{0.136} \text{ r / min} = 994 \text{ r / min}$$

(2) 
$$n = \frac{U - I_N R_a}{C_e \Phi} = \frac{110 - 41.4 \times 0.4}{0.136} \text{ r / min} = 687 \text{ r / min}$$

(3) 按调速前后转矩不变的条件, 得

$$T = C_t \Phi_N I_N = C_t \Phi I_a$$

$$I_a = \frac{\Phi_N}{\Phi} I_N = \frac{1}{0.9} \times 41.4 = 46 \text{ A}$$

$$n = \frac{U_N - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{220 - 46 \times 0.4}{0.136 \times 0.9} \text{ r / min} = 1647 \text{ r / min}$$

### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

#### ○ 直流电动机的启动

**n** 他励直流电动机启动时，必须保证有磁场(即先通励磁电流)，后加电枢电压。

1 为什么？

2 直流电动机停止时如何操作？

**n** 刚启动时，转速 $n=0$ ，反电势 $E_a=0$ ，电动机电枢绕组 $R_a$ 很小，如果直接加额定电压， $I_a$ 可能会突增到额定电流的十多倍。

1 换向会产生严重火花。

2 急剧发热。

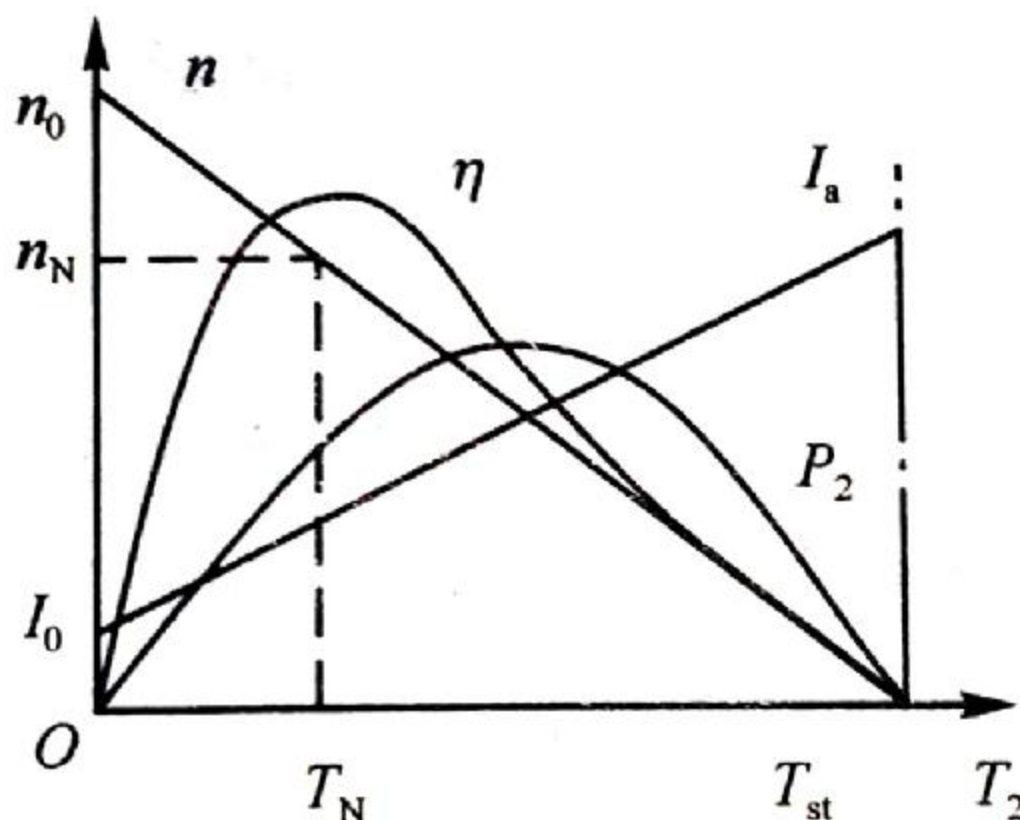
**n** 一般直流电动机要求启动电流小于额定电流的2~2.5倍

1 电枢电压逐渐增加。

2 电枢回路串电阻启动，并逐渐减小所串电阻。

### 3 直流电动机的静态特性和控制方法

#### ○ 永磁式直流电动机的工作特性曲线



$n_N$ 为额定转速

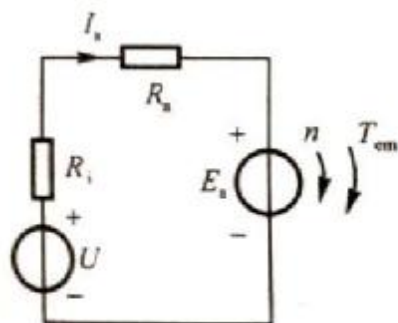
$T_N$ 为额定转矩

一般电机在额定转矩附近为最大效率区间

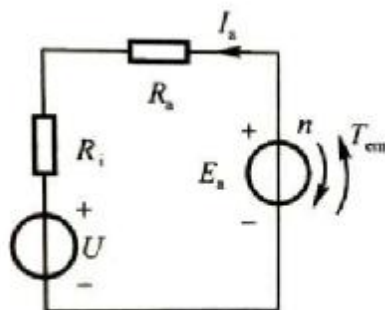
## 4 直流电机的工作状态

### 电动机工作状态

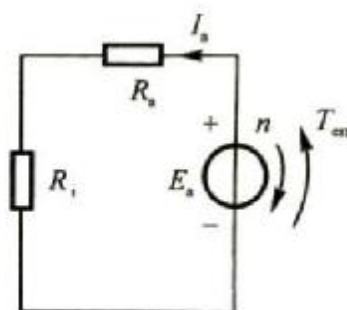
- 直流电机本身有发电机和电动机两种工作状态，但是在控制系统中，把电机和外加电压结合起来，可以把电机工作状态分成4种。



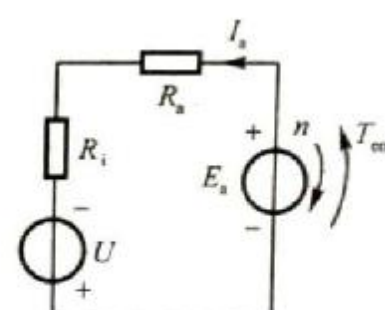
(a)电动机工作状态



(b)发电机工作状态



(c)能耗制动状态

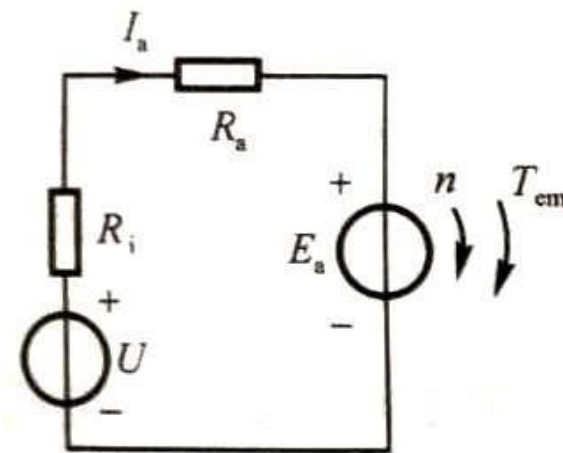


(d)反接制动状态

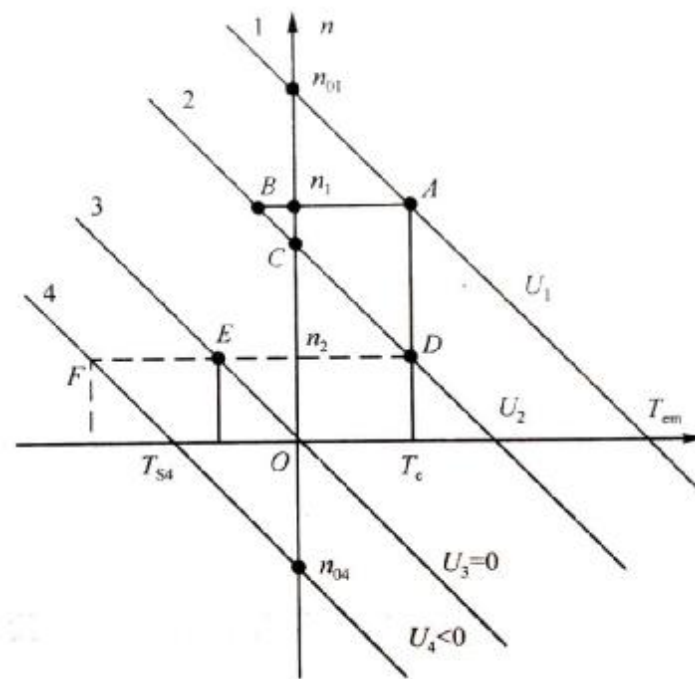
## 4 直流电机的工作状态

### ○ 电动机的工作状态

- n** 外加电压: 大于电枢的感应电势, 即  $U > E_a$ ;  $U$  的方向与  $E_a$  方向相反,  $U$  的极性与转向是对应的。
- n** 电枢电流:  $I_a$  方向与电枢感应电动势  $E_a$  方向相反, 数值小于堵转电流。
- n** 电磁转矩:  $T_{em}$  方向与转速  $n$  方向相同。
- n** 电能转化为机械能。
- n** 转速低于理想空载转速。
- n** 位于机械特性曲线的第一或第三象限。



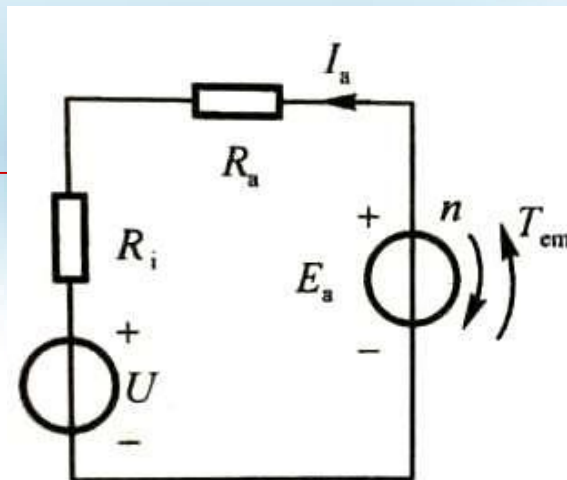
(a)电动机工作状态



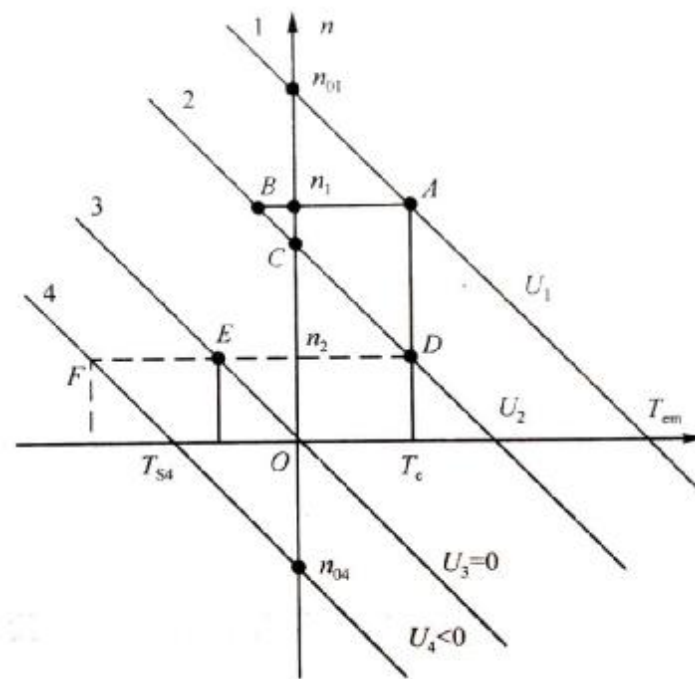
## 4 直流电机的工作状态

### ○ 发电机的工作状态

- n** 外加电压: 小于电枢的感应电势, 即  $U < E_a$ ;  $U$  的方向与  $E_a$  方向相反,  $U$  的极性与转向是对应的。
- n** 电枢电流:  $I_a$  方向与电枢感应电动势  $E_a$  方向相同。
- n** 电磁转矩:  $T_{em}$  方向与转速  $n$  方向相反, 电磁转矩起制动作用。
- n** 机械能转化为电能。
- n** 转速高于理想空载转速。
- n** 当  $U > 0$  时第二象限是发电机状态, 当  $U < 0$  时第四象限是发电机状态。



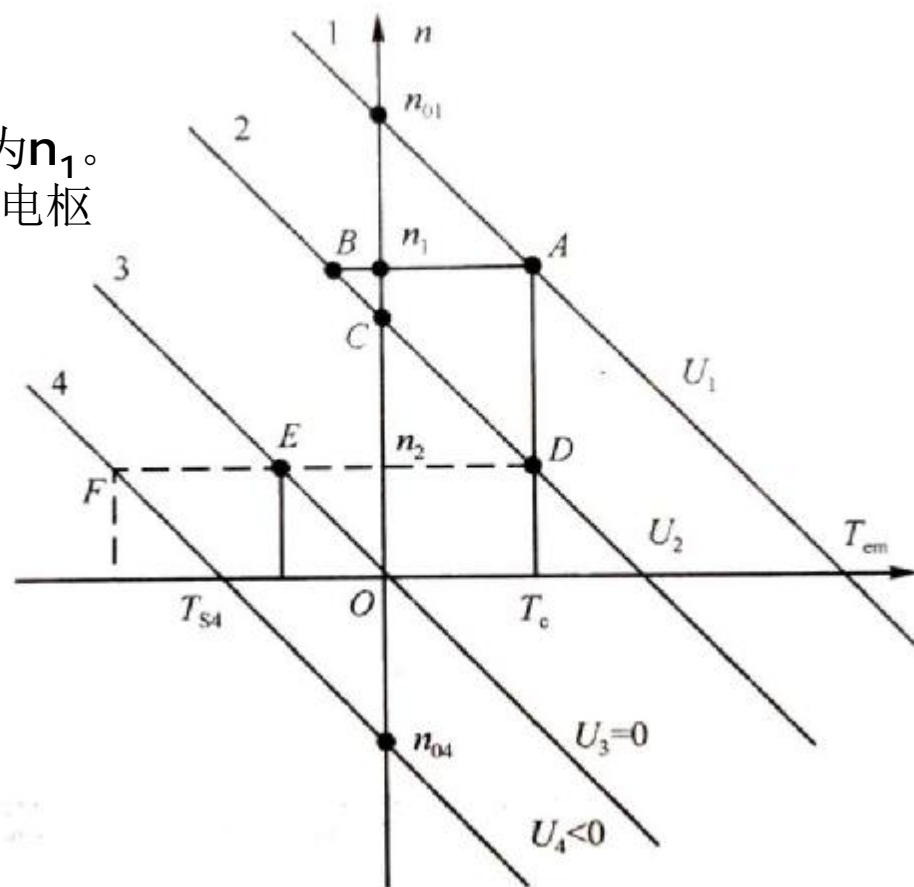
(b) 发电机工作状态



## 4 直流电机的工作状态

### ○ 发电机的工作状态

- n** 电机稳定运行于**A**点，转速为 $n_1$ 。若电机需要减速到 $n_2$ ，可将电枢电压将为 $U_2$ 。
- n** 当电枢电压将为 $U_2$ 时，电机转速不能立即改变，所以电机状态由**A**变为**B**。
- n** 由于此时电磁转矩反向，转速下降，工作点沿着直线**2**运行，由**B**变为**C**的过程属于发电机状态。
- n** 电机最终运行到**D**点，系统重新达到平衡。

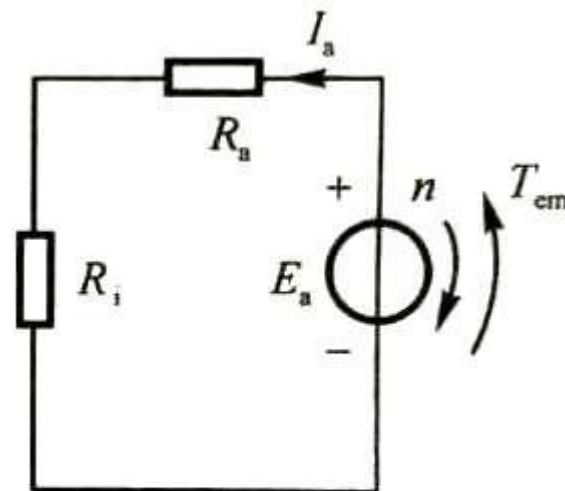




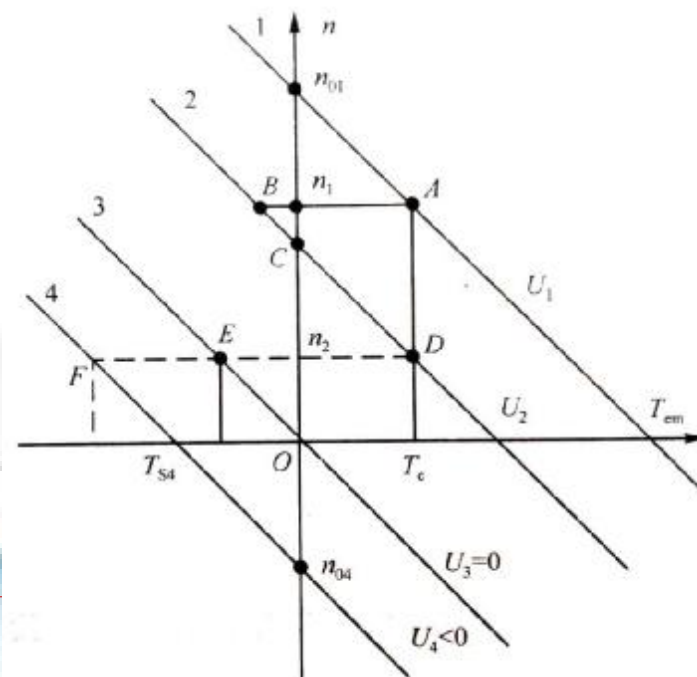
## 4 直流电机的工作状态

### ○ 能耗制动(动能制动)的工作状态

- n** 外加电压: 外加电压为零, 即发电机输出端短路。
- n** 电枢电流:  $I_a$  方向与电枢感应电动势  $E_a$  方向相同。
- n** 电磁转矩:  $T_{em}$  方向与转速  $n$  方向相反。  
电磁转矩起制动作用
- n** 机械能转化为热能。
- n** 能耗制动时的机械特性是一条通过坐标原点的直线。



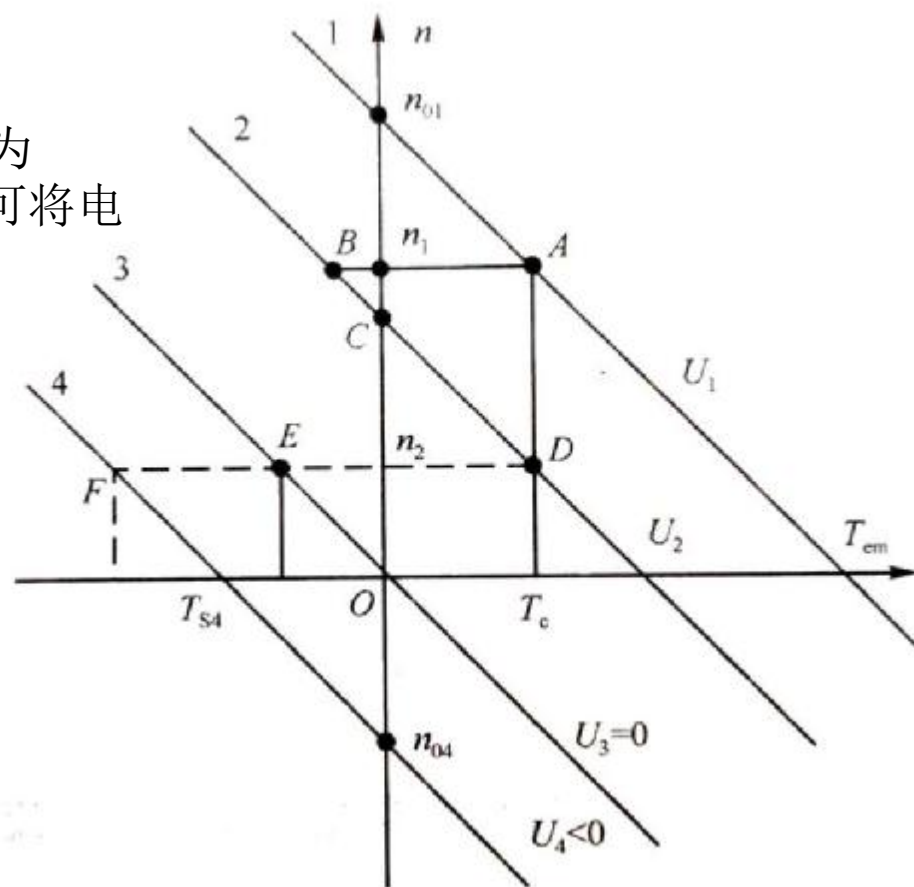
(c) 能耗制动状态



## 4 直流电机的工作状态

### ○ 能耗制动的工作状态

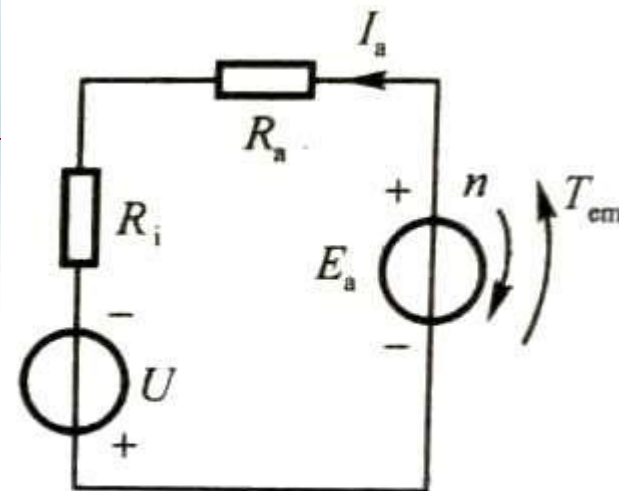
- n** 电机稳定运行于D点，转速为 $n_2$ 。若电机需要减速到0，可将电枢电压将为0。
- n** 当电枢电压将为0时，电机转速不能立即改变，所以电机状态由D变为E。
- n** 由于此时电磁转矩反向，转速下降，工作点沿着直线3运行，由E变为O的过程属于能耗制动状态。
- n** 若无外力矩，系统将停止于O点。



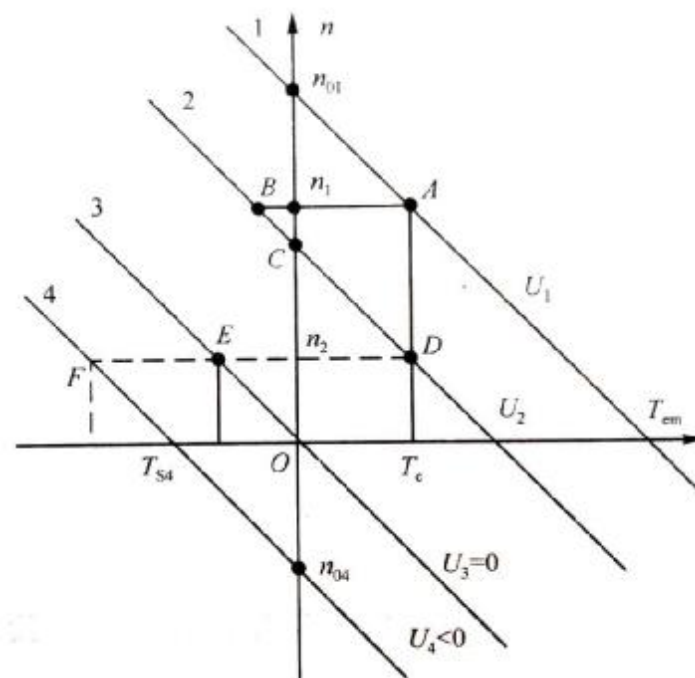
## 4 直流电机的工作状态

### ○ 反接制动的工作状态

- n** 外加电压： $U$ 的方向与 $E_a$ 方向相同。
- n** 电枢电流： $I_a$ 方向与电枢感应电动势 $E_a$ 方向相同，电枢电流大于堵转电流。
- n** 电磁转矩： $T_{em}$ 方向与转速 $n$ 方向相反，起制动作用。转矩数值大于堵转转矩，所以制动效果比发电机状态或能耗制动状态更好。
- n** 机械能和电能转化为热能。
- n** 当 $U > 0$ 时第四象限是反接制动状态，当 $U < 0$ 时第二象限是反接制动状态。



(d)反接制动状态



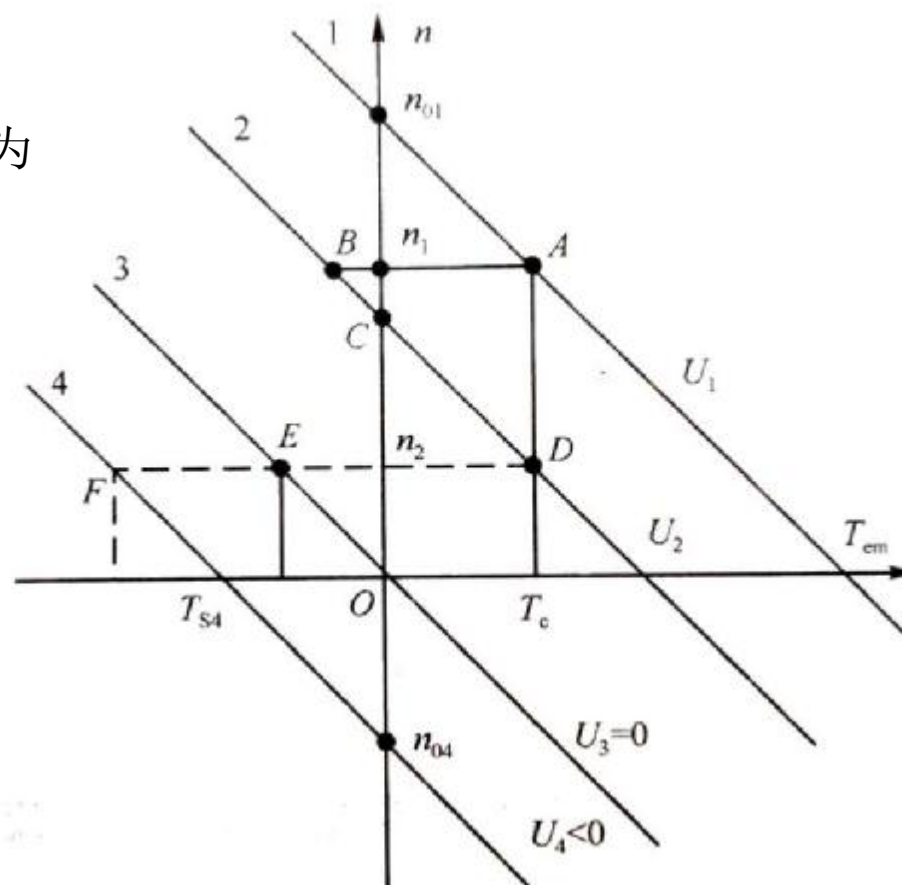
## 4 直流电机的工作状态

### ○ 反接制动的工作状态

**n** 电机稳定运行于D点，转速为 $n_2$ 。若电机需要快速减速到0，可将电枢电压将为 $U_4 < 0$ 。

**n** 当电枢电压将为 $U_4$ 时，电机转速不能立即改变，所以电机状态由D变为F。

**n** 由于此时电磁转矩反向，而且较大，转速快速下降，工作点沿着直线4运行。



# 总结

## ○ 直流电机的基本关系式

n 电枢电磁转矩:

$$T_{em} = C_t \Phi I = K_t I$$

n 电枢感应电动势:

$$E_a = C_e \Phi n = K_e \omega$$

n 电压平衡关系:

$$U_a = L_a \frac{dI_a}{dt} + I_a R_a + E_a$$

电动机

$$E_a = L_a \frac{dI_a}{dt} + I_a R_a + U_a$$

发电机

n 转矩平衡关系:

$$T_{em} = T_0 + T_L + J \frac{d\omega}{dt}$$

电动机

$$T_1 = T_0 + T_{em} + J \frac{d\omega}{dt}$$

发电机

# 总结

## ○ 直流电机的基本关系式

n 功率平衡关系:

$$P_1 = p_{Cuf} + p_{Cua} + p_c + P_{em}$$

$$P_{em} = p_{mech} + p_{Fe} + P_2$$

电动机

$$P_1 = p_{mech} + p_{Fe} + P_{em}$$

$$P_{em} = p_{Cuf} + p_{Cua} + p_c + P_2$$

发电机

## ○ 直流电机的铭牌

n 额定功率  $P_N$ (KW)

直流电动机: 额定工况下轴上输出的机械功率

直流发电机: 额定工况下电机出线端输出的电功率

n 额定电压  $U_N$ (V)

直流电动机: 额定工况下电枢上施加的直流电压

直流发电机: 额定工况下电枢上输出的直流电压

# 总结

## ○ 直流电机的铭牌

### n 额定电流 $P_N(A)$

直流电动机：额定电压下，轴上输出额定功率时的电流

$$P_N = U_N * I_N * h$$

直流发电机：额定输出电压和额定输出功率时，直流电机出线段输出的电流

$$P_N = U_N * I_N$$

## ○ 直流电机的静特性与控制方法

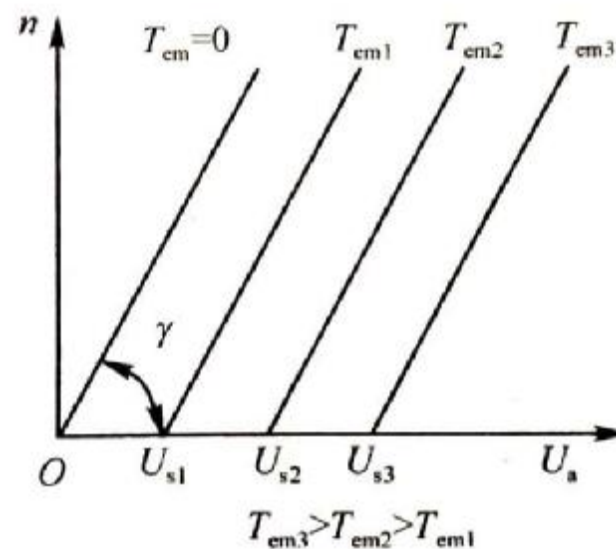
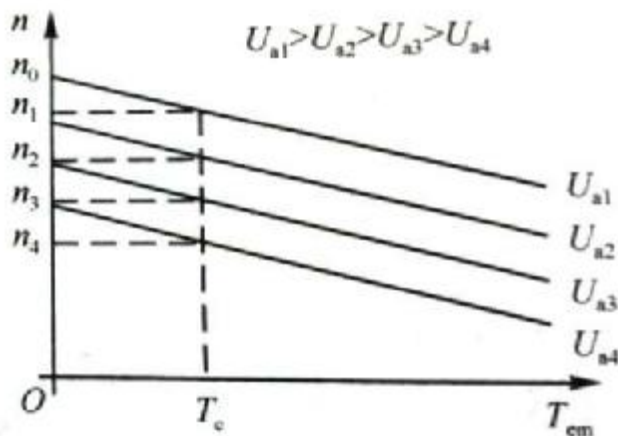
$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$

# 总结

## ○ 直流电机的静特性与控制方法

n 电枢控制

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$



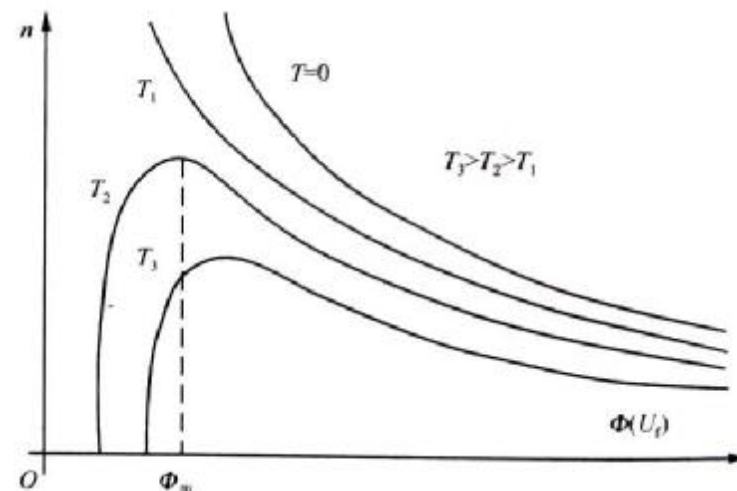
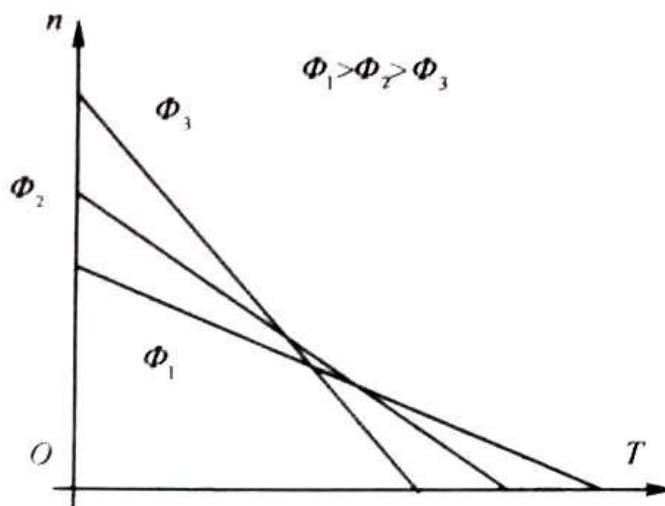


# 总结

## ○ 直流电机的静特性与控制方法

n 磁场控制

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$

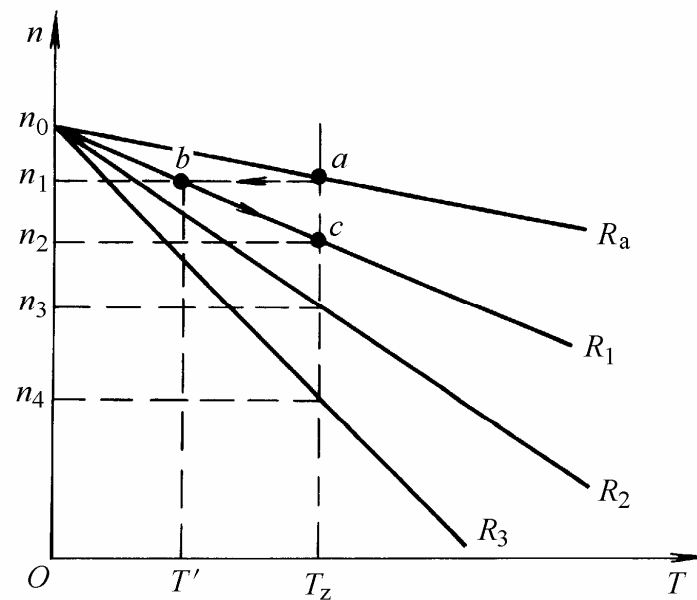


# 总结

## ○ 直流电机的静特性与控制方法

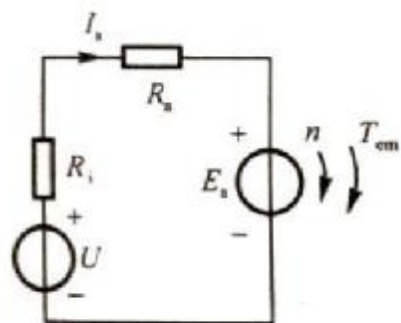
n 改变电枢回路串联电阻

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$

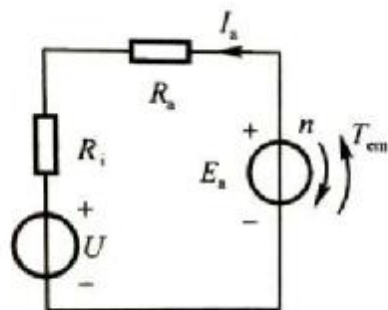


# 总结

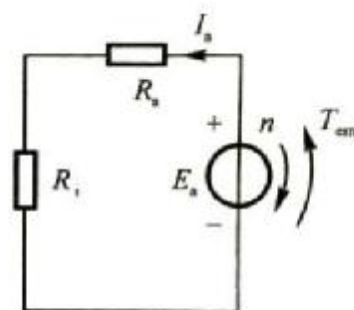
## ○ 直流电机的工作状态



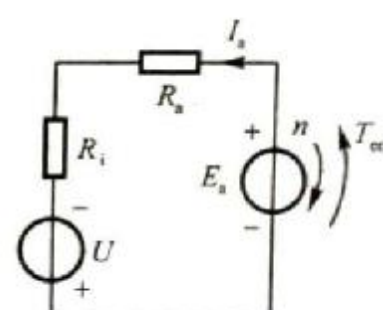
(a)电动机工作状态



(b)发电机工作状态



(c)能耗制动状态



(d)反接制动状态