

# 电机与拖动基础

南开大学

人工智能学院

自动化与智能科学系

段 峰

教授 博导

闭卷考试

千万别作弊！！！！



# 第一章 绪论

---

# 电 磁 力

# 基本概念-磁场的描述

- 磁场强度 $H$ : 描述导磁物质中磁场强弱和方向的基本物理量。

磁场强度是一个向量, 单位 A/m 安(培)/米

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

$\mu$ 为导磁材料的磁导率

真空中的磁导率用  $\mu_0$  表示

说明什么问题?

铁磁材料的磁导率  $\mu \gg \mu_0$

# 铁磁材料及其磁化特性

- 铁磁材料：铁、钴、镍及其合金的磁导率比真空磁导率大得多，一般称为铁磁材料

- 相对磁导率： $\mu_r = \mu / \mu_0$

$\mu$  为铁磁材料磁导率， $\mu_0$  为真空中的磁导率

铸铁	200	铸钢	1000
电工钢片	6000-7000	坡莫合金	100000

电机和变压器的磁通路通常用铁磁材料制成



# 磁化特性与磁化曲线

- 对于公式  $B = \mu H$  中的  $\mu$  在计算中一般看成常数
- 实际上  $\mu$  不是常数，它与磁场强度、物质磁化状态的历史有关。
- **磁化曲线：**通过实验，测出铁磁材料在不同磁场强度  $B$  下对应的磁密  $H$ ，而画出的  $B-H$  曲线。

横坐标为磁场强度，纵坐标为磁感应强度或磁密。

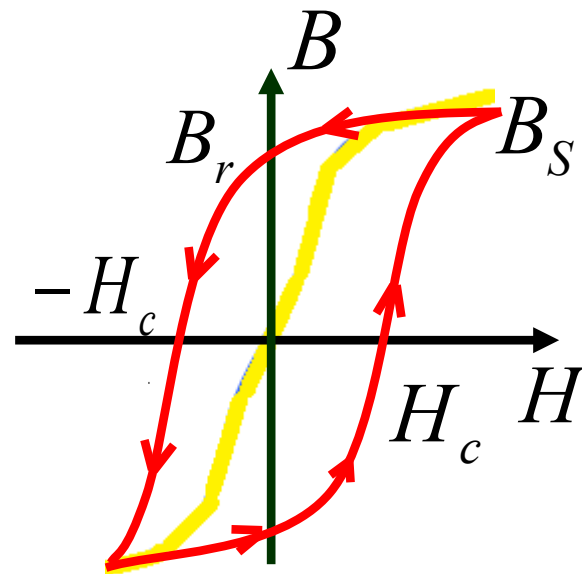
# 磁化特性与磁化曲线

起始磁化曲线

剩磁  $B_r$

矫顽力  $H_c$

饱和磁感应强度  $B_S$



$B$ 的变化落后于 $H$ ，从而具有剩磁，即磁滞效应

每个 $H$ 对应不同的 $B$ 与磁化的历史有关。

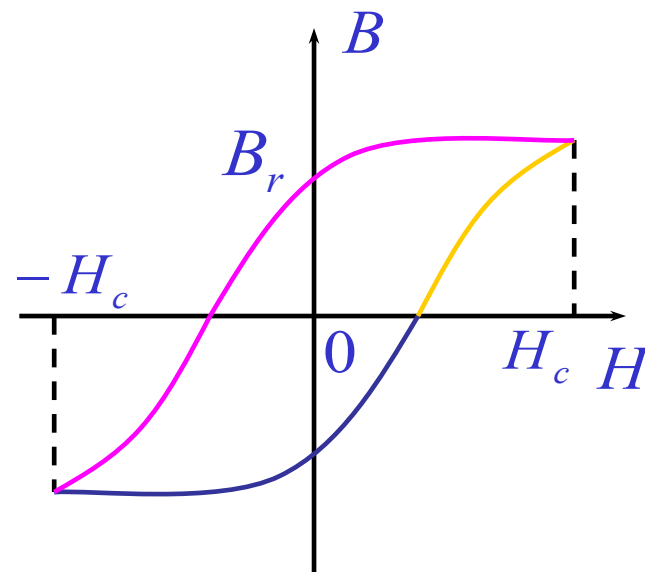
磁滞回线--不可逆过程

基本磁化曲线（黄色）

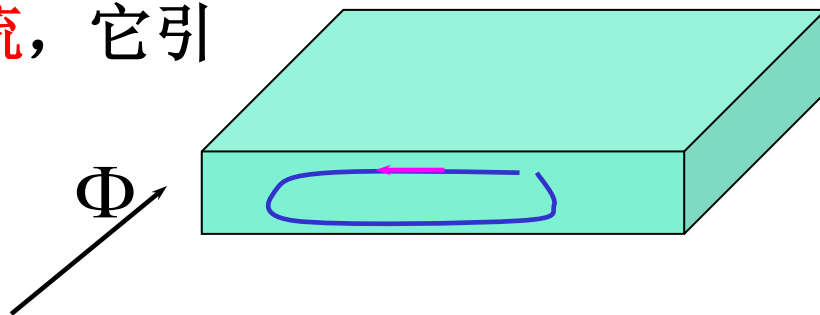
在交变电流的励磁下反复磁化使其温度升高的  
磁滞损耗与磁滞回线所包围的面积成正比。

# 磁滞损耗和涡流损耗

- **磁滞损耗**：磁场强度从  $H_c \rightarrow -H_c \rightarrow H_c$  变化一个周期，铁磁材料的储能不变；但它从磁场中吸收的能量大于释放的能量。这一部分**差值**叫磁滞损耗。



- **涡流损耗**：由于电磁感应的作用，变化的磁场在铁心内产生感生电流，叫**涡流**，它引起的损耗叫涡流损耗。

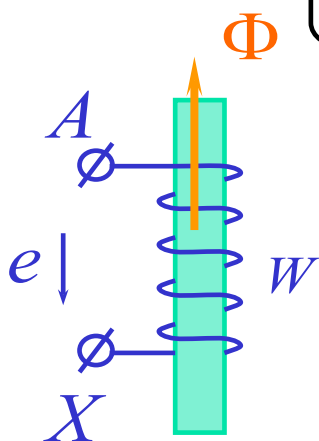


磁滞损耗和涡流损耗合称**铁耗**



# 励磁电流和磁化功率

励磁电流  $\dot{I}_m$  { 磁化电流:  $\dot{I}_\mu$  流过励磁线圈而不向磁路提供有功功率, 只起铁心磁化作用的电流。  
铁耗电流:  $\dot{I}_{Fe}$  流过励磁线圈而向磁路提供有功功率损耗的电流。

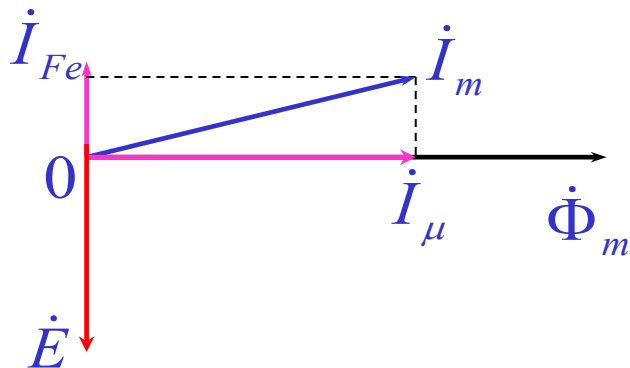


$$\dot{I}_m = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe}$$

励磁电流为正弦电流时:

$$E = 4.44fN\Phi_m$$

磁化功率:  $Q = EI_\mu$



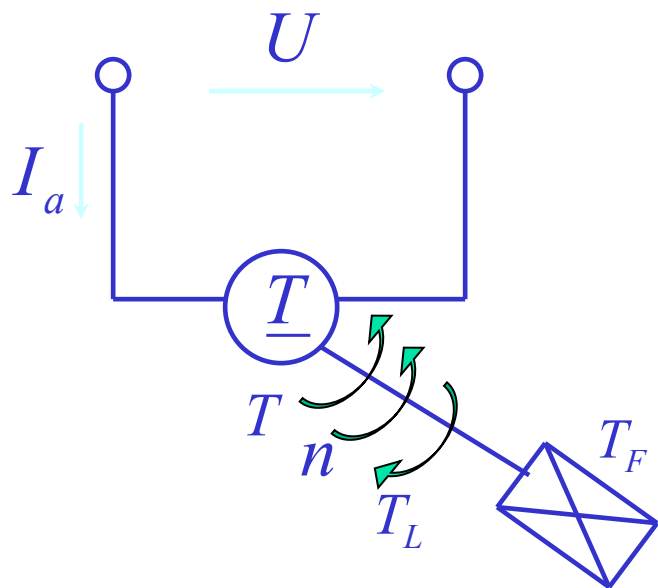
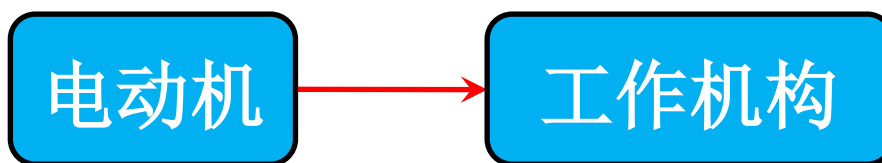


## 第二章 电力拖动系统动力学

- **电机：** 能量转化的装置
  - 发电机： 机械能转化为电能
  - 电动机： 电能转化为机械能
- **变压器：** 电能传递的装置（广义下的电机）
  - 作用是变电压、变电流、变相位等
- **拖动：** 电机与生产机械结合的运动特性

# 第一节 单轴旋转系统的运动方程

## ■ 单轴电力拖动系统的组成



$$T_L = T_0 + T_F$$

$T$	——电磁转矩
$T_L$	——负载转矩
$T_0$	——空载转矩
$T_F$	——负载本身的转矩

# 第一节 单轴旋转系统的运动方程

## ■ 单轴电力拖动系统转动方程式

$$T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt}$$

$J$  ——转动惯量

$\Omega$  ——角速度

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

$$J = mr^2 = m \frac{D^2}{4} = \frac{G}{g} \frac{D^2}{4}$$

$m$  ——转动部分质量

$r$  ——转动惯量半径

$$\boxed{T - T_L} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

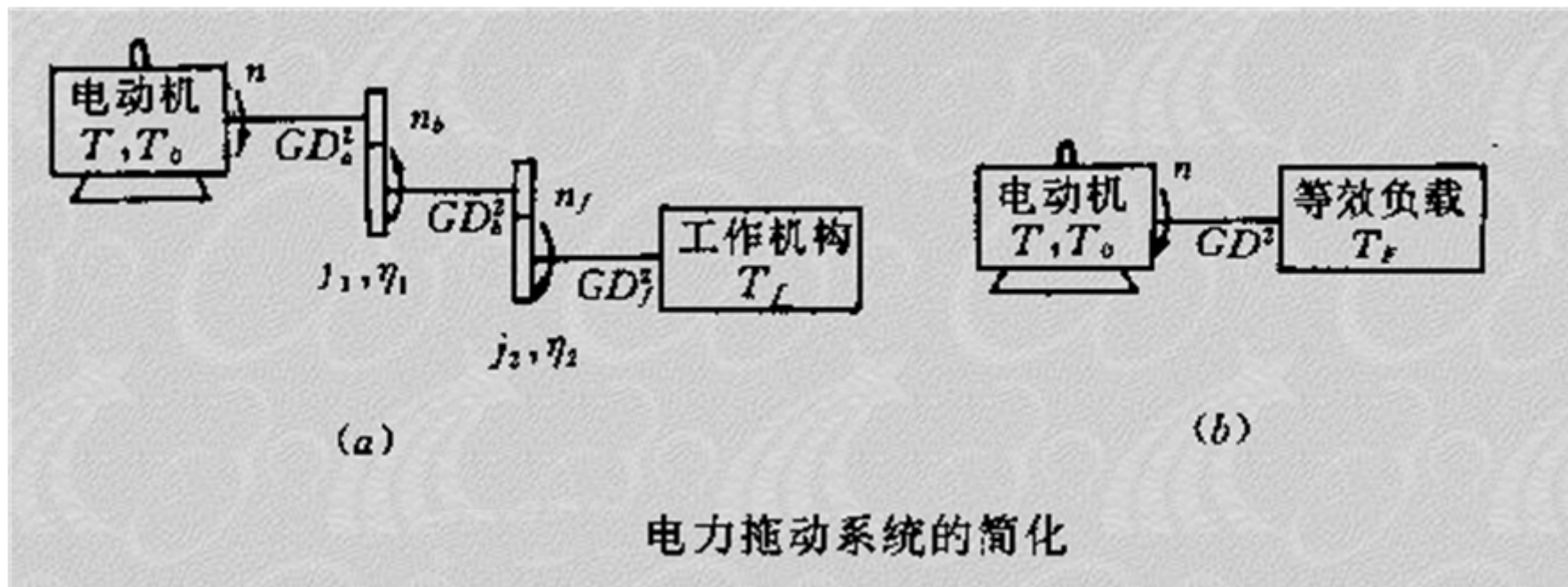
动转矩

$G$  ——转动部件的重量

$D$  ——转动惯性直径

$n$  ——转速

## 第二节 多轴系统的运动方程



速比  $j = \frac{n}{n_f}$



## 第二节 多轴系统的运动方程

# 电 磁 力

- (1) 转矩按速比的反比折算  
(折算前后**功率**不变)
- (2) 飞轮矩按速比平方的反比折算  
(折算前后**动能**不变)

## 第二节 多轴系统的运动方程

- 转矩按速比的反比折算（折算前后功率不变）

无机械损耗

$$T_F \Omega = T_f \Omega_f$$

$$T_F = \frac{T_f \Omega_f}{\Omega} = \frac{T_f n_f}{n} = \frac{T_f}{j}$$

有机械损耗

$$T_F \Omega \eta = T_f \Omega_f$$

$$T_F = \frac{T_f}{j \eta}$$

## 第二节 多轴系统的运动方程

- 飞轮矩按速比平方的反比折算（折算前后动能不变）

$$\frac{1}{2} J \Omega^2 = \frac{1}{2} \frac{GD_F^2}{4g} \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{GD_f^2}{4g} \left( \frac{2\pi n_f}{60} \right)^2$$

工作轴的飞轮矩

$$GD_F^2 = \frac{GD_f^2}{j^2}$$

系统总的飞轮矩

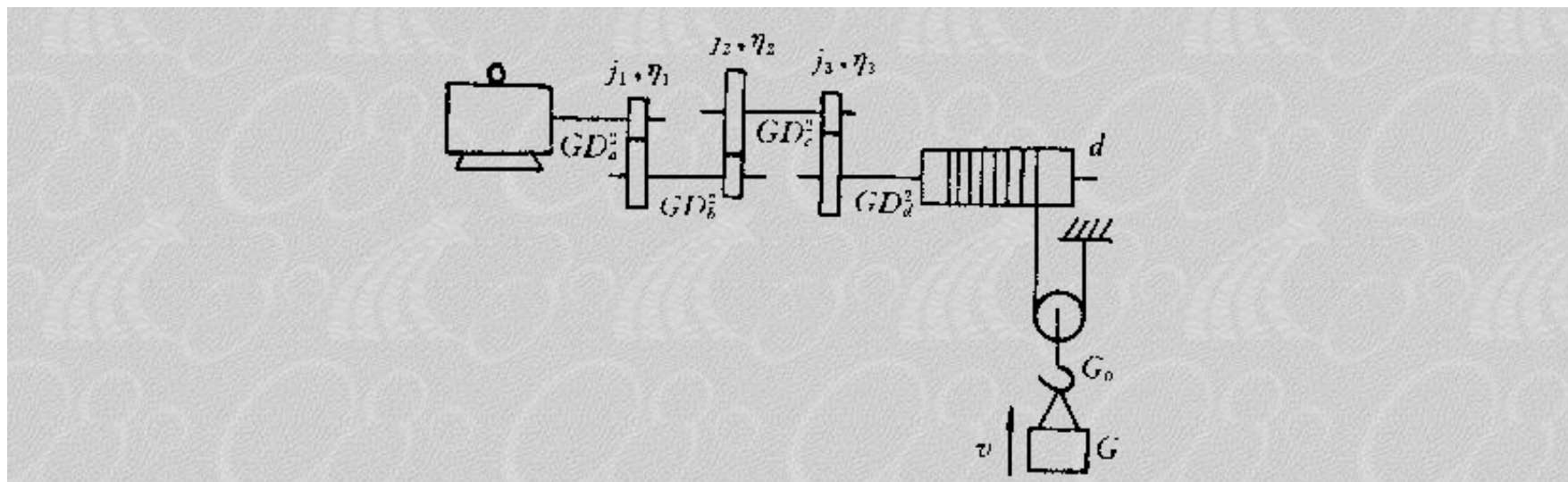
$$GD^2 = GD_a^2 + \frac{GD_b^2}{j_1^2} + \frac{GD_c^2}{(j_1 j_2)^2} + \dots + \frac{GD_f^2}{j^2}$$



## 第二节 多轴系统的运动方程

某起重机的电力拖动系统如图所示。电动机 $P_N=20$  kW,  $n_N=950$  r/min, 传动机构的速比 $j_1=3$ ,  $j_2=3.5$ ,  $j_3=4$ , 各级齿轮传动效率都是 $\eta=0.95$ , 各转轴上的飞轮矩 $GD_a^2=123$  N·m<sup>2</sup>,  $GD_b^2=49$  N·m<sup>2</sup>,  $GD_c^2=40$  N·m<sup>2</sup>,  $GD_d^2=465$  N·m<sup>2</sup>, 卷筒直径 $d=0.6$  m, 吊钩重 $G_0=1962$  N, 被吊重物 $G=49050$  N, 忽略电动机空载转矩, 忽略钢丝绳重量, 忽略滑轮传递的损耗, 求:

- (1) 以速度 $v=0.3$  m/s提升重物时, 负载(重物及吊钩)转矩、卷筒转速、电动机输出转矩及电动机转速;
- (2) 负载及系统的飞轮矩(折算到电动机轴上);
- (3) 以加速度 $a=0.1$  m/s<sup>2</sup>提升重物时, 电动机输出的转矩。



## 第二节 多轴系统的运动方程

解

(1) 以速度  $v=0.3 \text{ m/s}$  提升重物时, 负载 (重物及吊钩) 转矩

$$T_f = \frac{1}{2}(G_0 + G) \cdot \frac{d}{2} = \frac{1}{2} \times (1962 + 49050) \times \frac{0.6}{2} = 7651.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

卷筒转速

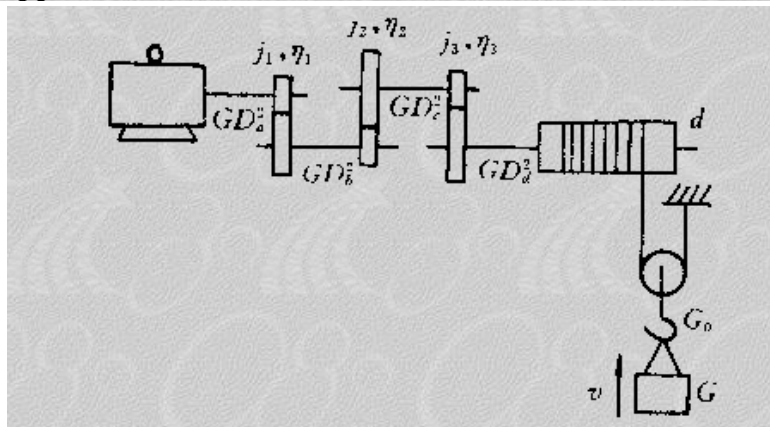
$$n_f = \frac{60(2v)}{\pi d} = \frac{60 \times 2 \times 0.3}{\pi \times 0.6} = 19.1 \text{ r/min}$$

电动机输出转矩

$$T_2 = T_f = \frac{T_f}{j\eta} = \frac{7651.8}{3 \times 3.5 \times 4 \times 0.95^3} = 212.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

电动机转速

$$n = n_f j = 19.1 \times 3 \times 3.5 \times 4 = 802.2 \text{ r/min}$$



## 第二节 多轴系统的运动方程

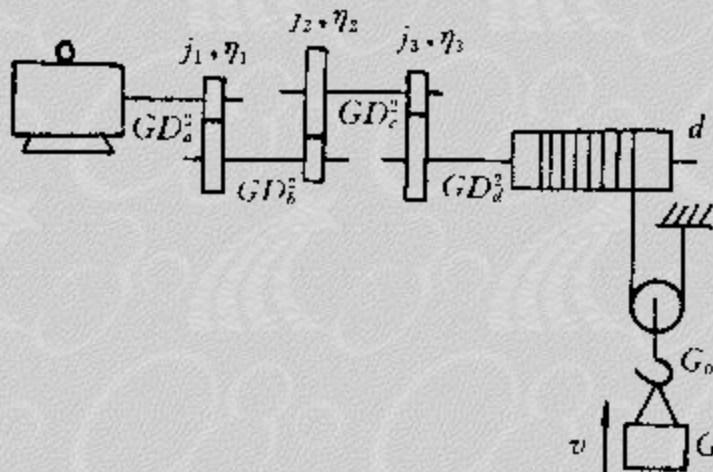
### (2) 负载及系统的飞轮矩

吊钩及重物飞轮矩

$$GD_F^2 = 365 \frac{(G_0 + G)v^2}{n^2} = 365 \times \frac{(1962 + 49050) \times 0.3^2}{802.2^2} \\ = 2.6 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

系统总的飞轮矩

$$GD^2 = GD_a^2 + \frac{GD_b^2}{j_1^2} + \frac{GD_c^2}{(j_1 j_2)^2} + \frac{GD_d^2}{(j_1 j_2 j_3)^2} + GD_F^2 \\ = 123 + \frac{49}{3^2} + \frac{40}{(3 \times 3.5)^2} + \frac{465}{(3 \times 3.5 \times 4)^2} + 2.6 \\ = 131.7 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$



## 第二节 多轴系统的运动方程

### ■ 平移系统的折算

$$P=Fv$$

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

若不考虑传动系统的传动损耗，根据功率不变的原则，有

$$Fv = T_F \frac{2\pi n}{60}$$

$$T_F = \frac{Fv}{\frac{2\pi n}{60}} = 9.55 \frac{Fv}{n}$$

若考虑传动系统的传动损耗，则

$$T_F = 9.55 \frac{Fv}{n\eta}$$

## 第二节 多轴系统的运动方程

### ■ 平移系统的折算

做平移运动部分的物体总重为  $G_f = m_f g$ ，其动能为

$$\frac{1}{2} m_f v^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{G_f}{g} v^2$$

折算到电动机轴上后的动能为

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{GD_F^2}{4g} \cdot \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

折算前后的动能不变，因此

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot \frac{G_f}{g} v^2 &= \frac{1}{2} \cdot \frac{GD_F^2}{4g} \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2 \\ GD_F^2 &= 4 \frac{G_f v^2}{\left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2} = 365 \frac{G_f v^2}{n^2} \end{aligned}$$

## 第二节 多轴系统的运动方程

(3) 以加速度  $a=0.1 \text{ m/s}^2$  提升重物时, 电动机输出转矩的计算  
电动机转速与重物提升速度的关系为

$$n = n_f j_1 j_2 j_3 = 60 \times \frac{2v}{\pi d} j_1 j_2 j_3$$

电动机加速度与重物提升加速度的关系为

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{d}{dt} \left( \frac{120v}{\pi d} j_1 j_2 j_3 \right) = \frac{120}{\pi d} j_1 j_2 j_3 \frac{dv}{dt} \\ &= \frac{120}{\pi d} j_1 j_2 j_3 a \end{aligned}$$

电动机加速度大小为

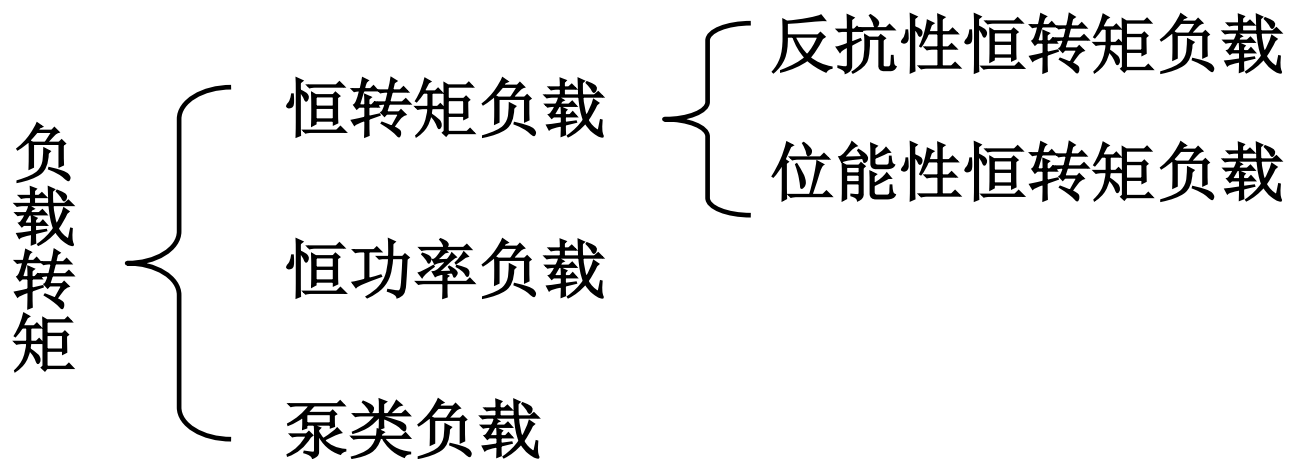
$$\frac{dn}{dt} = \frac{120}{\pi \times 0.6} \times 3 \times 3.5 \times 4 \times 0.1 = 267.4 \text{ r/min} \cdot \text{s}$$

电动机输出转矩为

$$T = T_F + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = 212.5 + \frac{131.7}{375} \times 267.4 = 306.4 \text{ N} \cdot \text{m}$$

# 第三节 负载转矩特性

## ■ 负载转矩特性——负载转矩与转速之间的关系





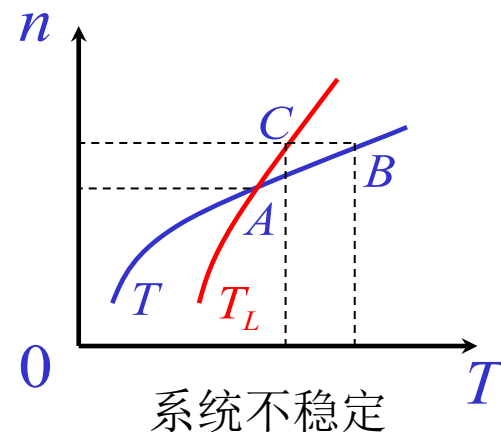
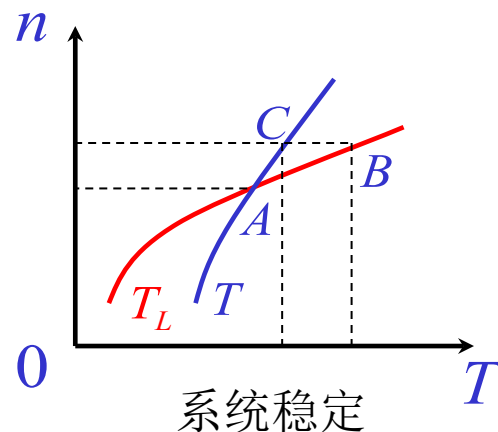
# 第四节 电力拖动系统稳定运行的条件

## ■ 电力拖动系统稳定运行的定义

- (1) 稳态时速度不变；
- (2) 受到干扰或系统给定变化时，速度能回复到原来的稳态速度或达到新的稳态速度。

## ■ 电力拖动系统稳定运行的条件

- (1) 稳态时  $T = T_L$
- (2) 暂态时  $\frac{dT}{dn} < \frac{dT_L}{dn}$







# 第三章 直流电机

## 第一节 直流电机的用途及基本工作原理

### 一、直流电机的用途及特点

#### 1、用途：机械能与直流电能的相互转化

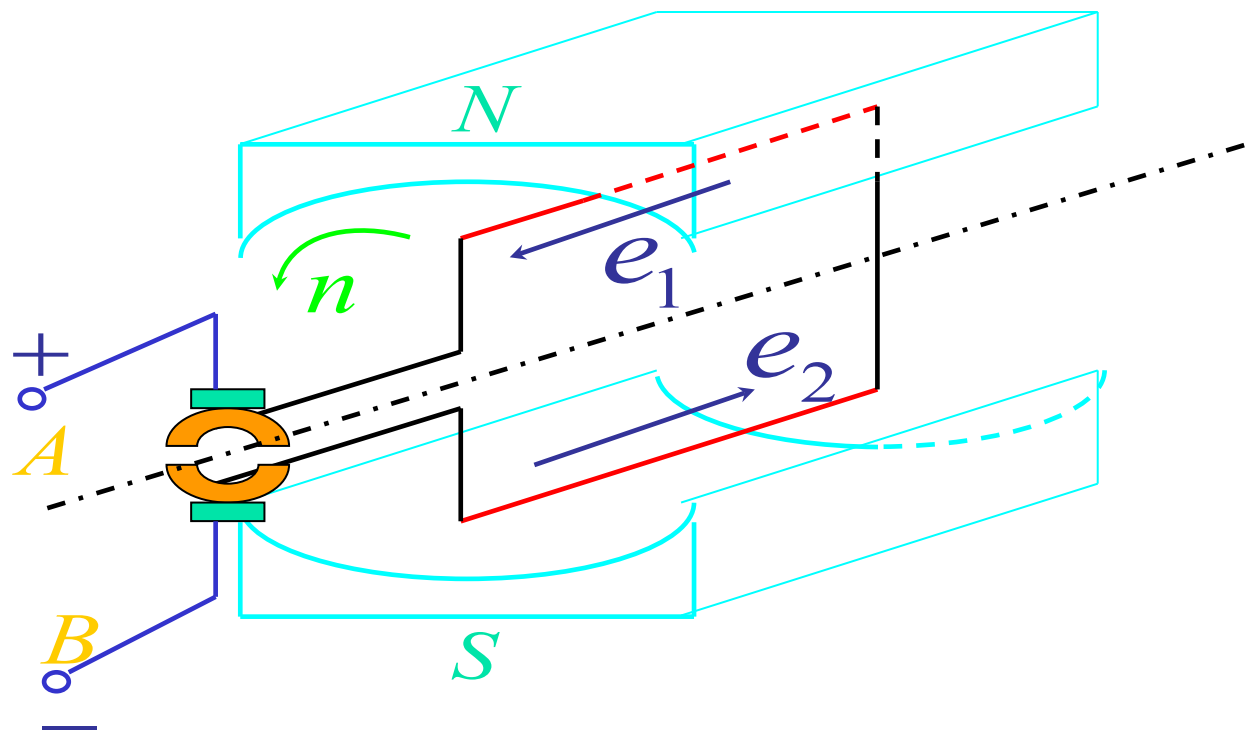
直流发电机：机械能——直流电能

直流电动机：直流电能——机械能

#### 2、特点：优点突出而缺点明显

- (1)调速范围大，易平滑调速
- (2)起、制动转矩大，过载能力强
- (3)易控制，可靠性高
- (4)换向问题，维护问题

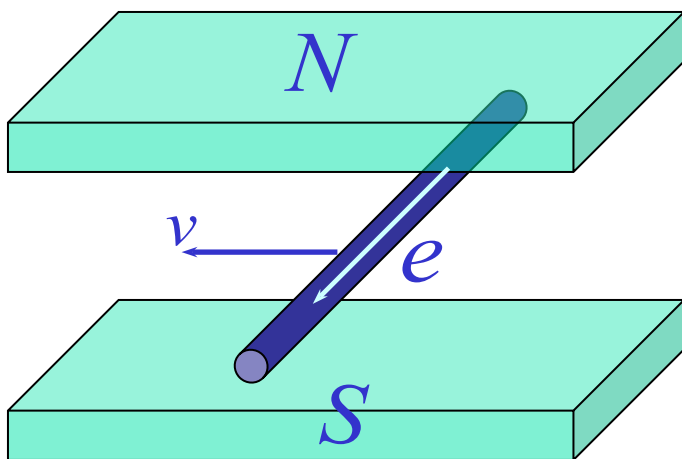
## 二、直流发电机物理模型



## 二、直流发电机物理模型

### 电磁感应定律

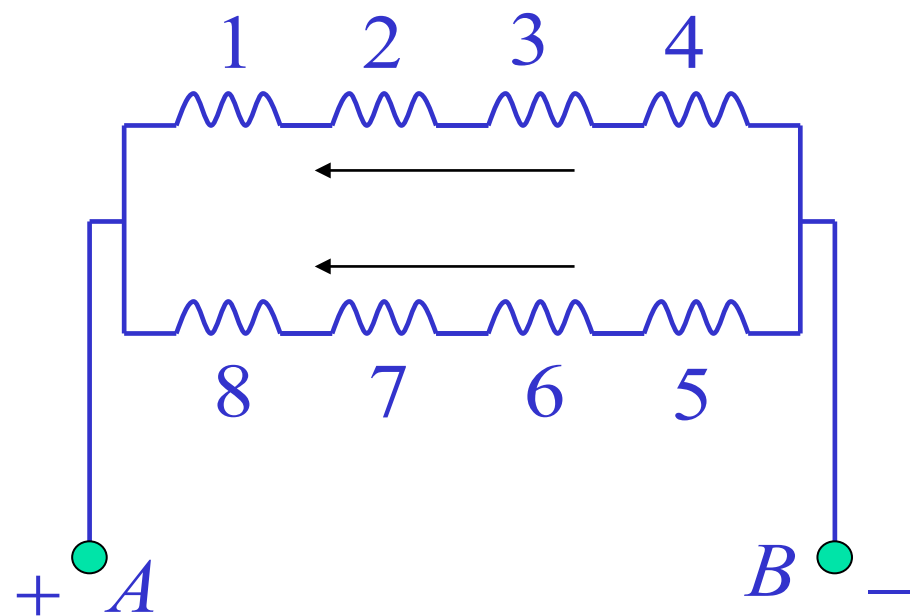
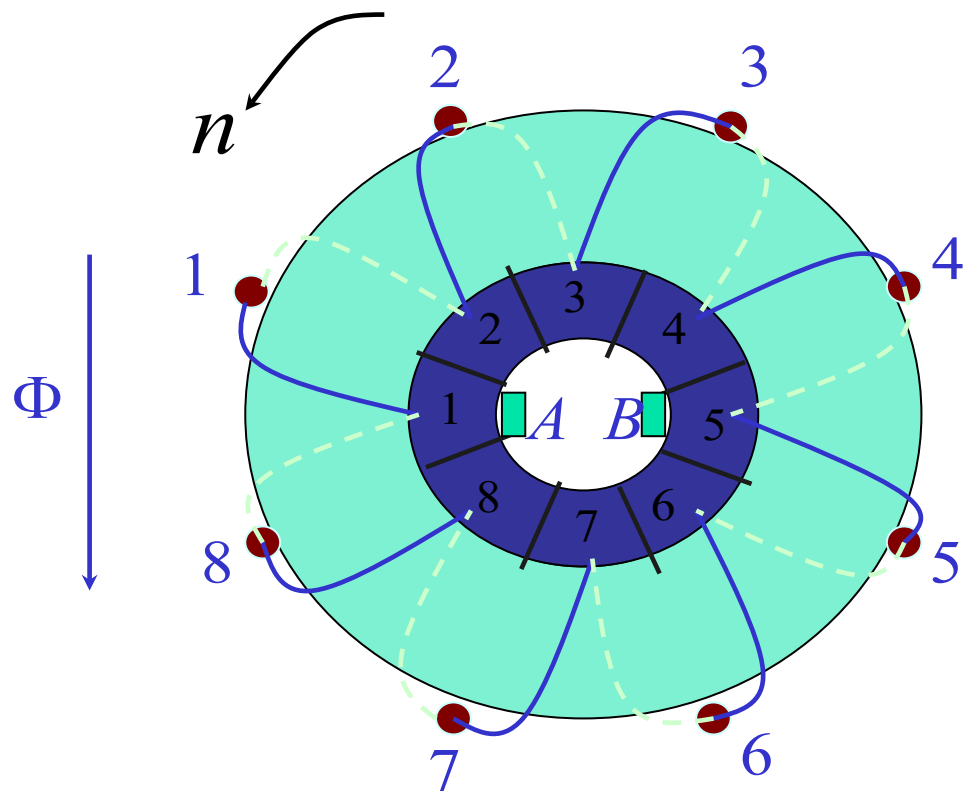
- 切割电动势：导体与磁场有相对运动



$$e = Blv$$

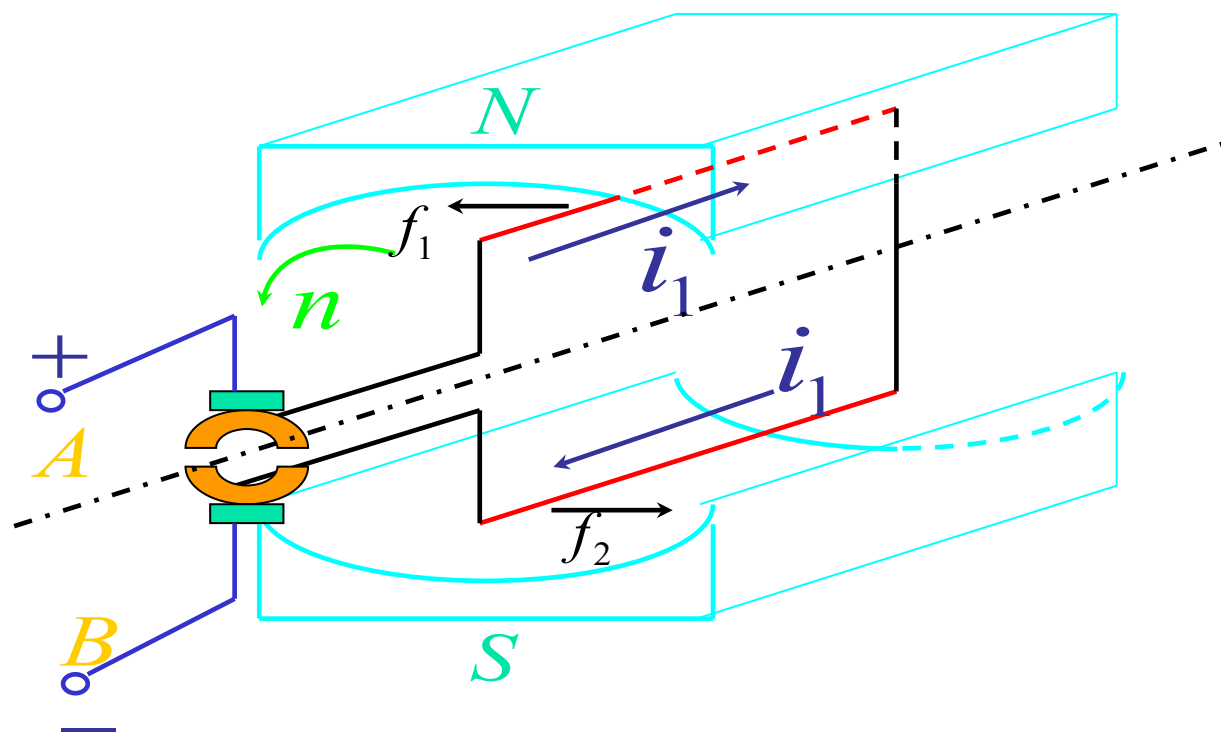
切割电动势的方向与磁场和运动方向的关系遵循右手定则

## 二、直流发电机物理模型



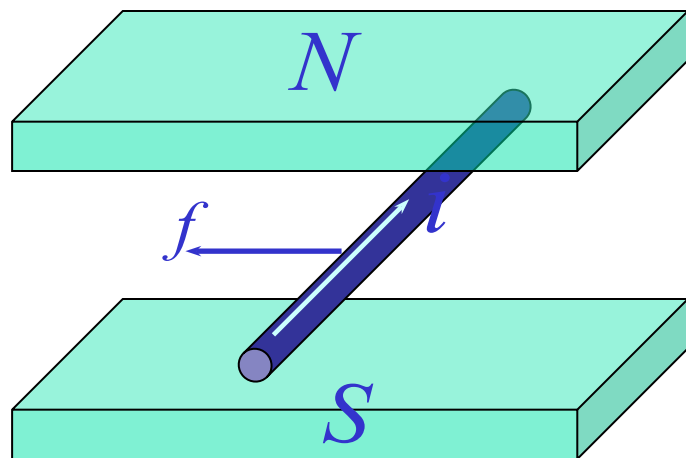
并联支路图

### 三、直流电动机物理模型



### 三、直流电动机物理模型

- 安培力：在磁场中磁场对载流导体施加的力



$$f = Bli$$

安培力的方向与磁场和电流的关系遵循左手定则

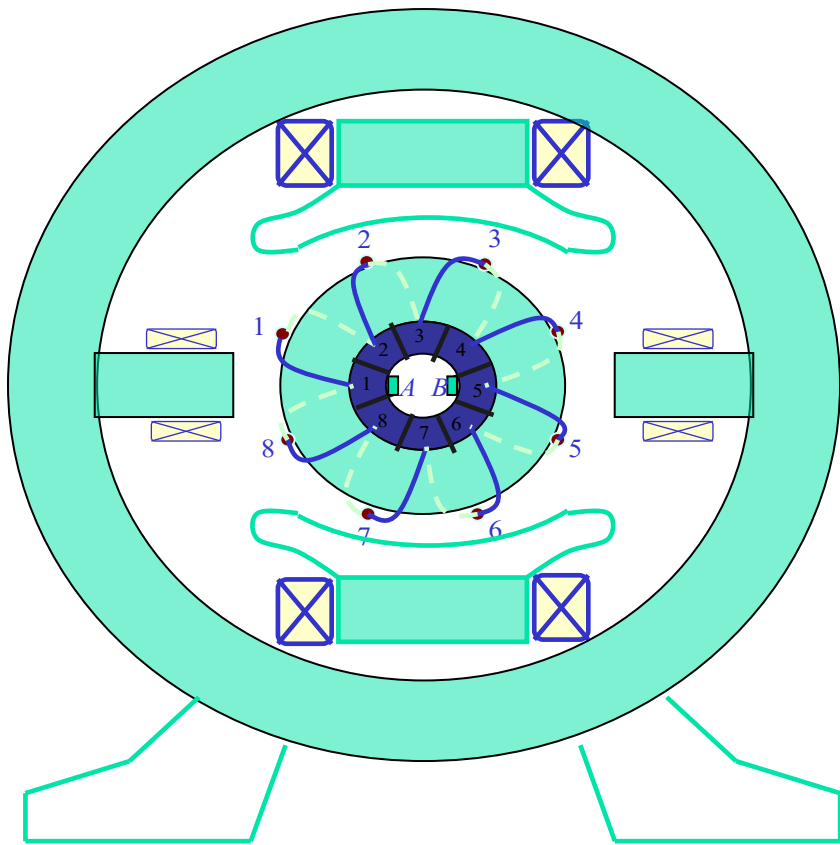


## 四、直流电机的可逆原理

- 直流发电机和直流电动机两者结构完全相同，只是运行条件不同
- 直流电机，适当改变其运行条件即可作为发电机运行，也可作为电动机运行
- 直流电机的运行状态具有可逆性。

# 第二节直流电机的主要结构与铭牌数据

## ■ 直流电机的主要结构



### 1、转子部分

- (1) 轴；
- (2) 电枢铁心；
- (3) 电枢绕组；
- (4) 换向器；
- (5) 风扇等。

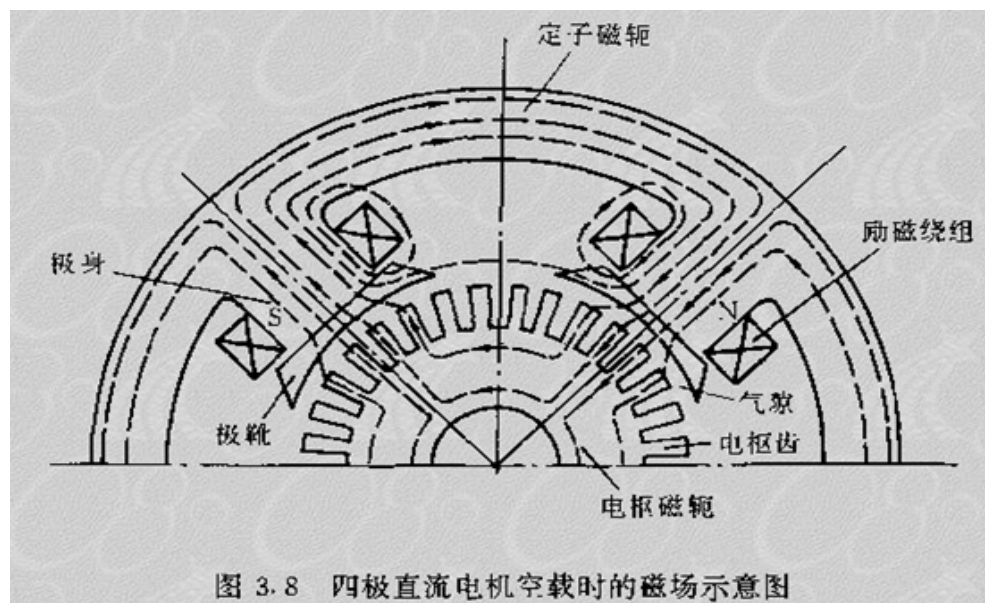
### 2、定子部分

- (1) 机座；
- (2) 主磁极；
- (3) 励磁绕组；
- (4) 换向极；
- (5) 电刷装置等。



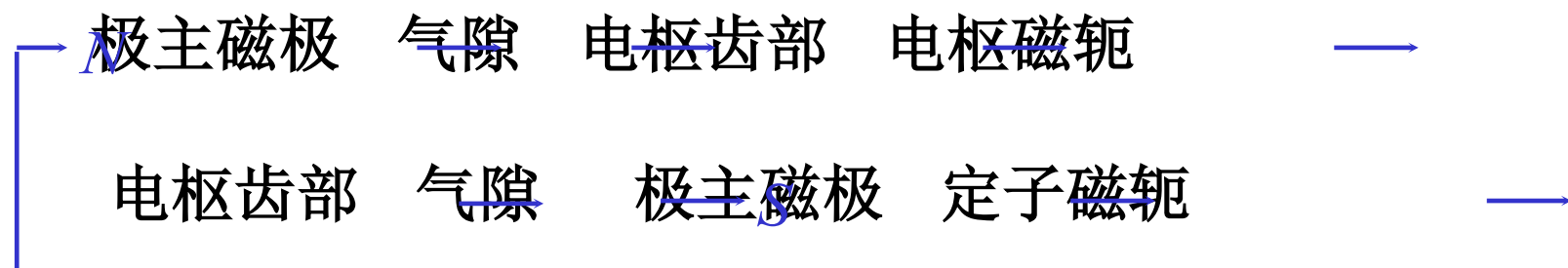
# 第三节 直流电机的磁路、空载时的气隙磁密与空载磁化特性

## 一、直流电机的磁场（空载运行）：



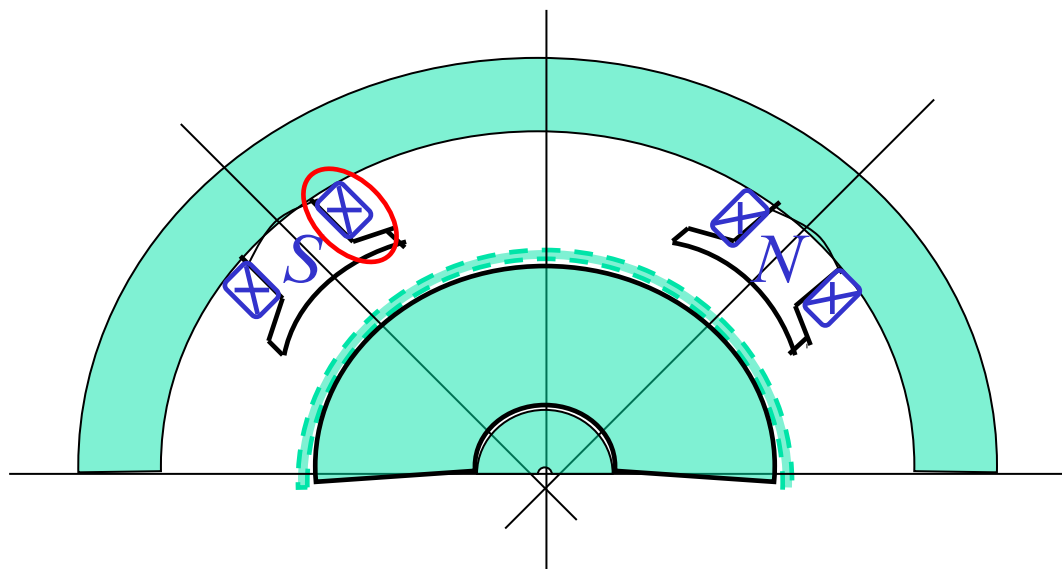
以四极电机为例  
空载运行指仅有励磁电  
流  $I_f$ ，无电枢电流  $I_a$

### 1、主磁路：



# 一、直流电机的磁场（空载运行）

## 2、漏磁路：



注：1）主磁路计算分段  
气隙、电枢齿、电枢磁轭、  
主磁极、定子磁轭五段  
2）负载运行时电机磁场由  
各绕组共同产生

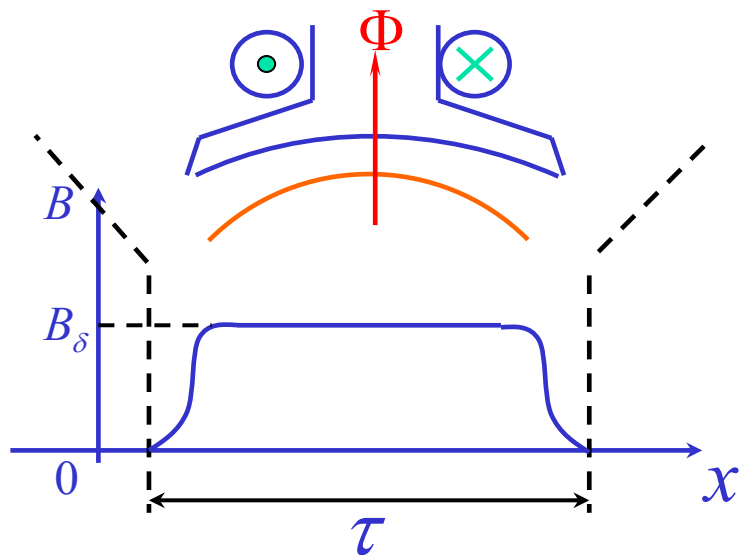
定义：

主磁通：同时连接励磁绕组和电枢绕组的磁通。  
它产生电磁转矩。

漏磁通：指连接一个绕组本身的磁通。  
它仅增加磁路的饱和程度。

## 二、空载运行时气隙磁通密度的分布波形

磁场方向：穿出电枢表面为正



- 1、磁极中心部分：气隙小，磁密大。
- 2、两极靴尖部：磁密小。
- 3、两极靴外：磁密迅速减小。
- 4、两极之间的几何中线处：磁密为0。

$$F = \frac{B}{\mu} L = \frac{L}{\mu S} \Phi$$

空气中  $\mu_0$  很小，磁路中的磁位降，主要集中在气隙中。 $F$ 为每极励磁磁通势

### 三、空载磁化特性

1、定义：空载时气隙每极磁通  $\Phi$  与空载励磁磁通势  $F_f$  或空载励磁电流  $I_f$  的关系。即

$$\Phi = f(F_f) \quad \Phi = f(I_f)$$

称为空载磁化特性。

研究它的意义：后面要介绍的电枢电势、电磁转矩等，都对磁通有所要求。

为得到所需要的磁通，需要确定励磁电流。

### 三、空载磁化特性

2、计算：由需要的气隙每极磁通求出空载励磁电流

$$\Phi \Rightarrow B \Rightarrow H \Rightarrow I_f$$

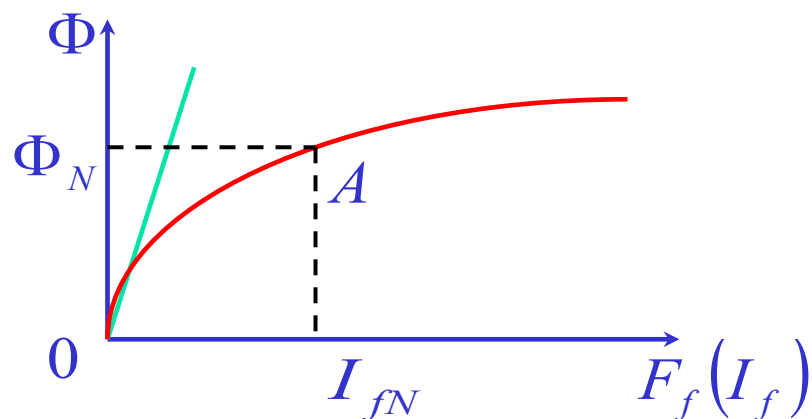
$$B = \Phi/S \Rightarrow H = B/\mu_0 \Rightarrow I_f = Hl/N$$

3、空载磁化特性曲线：

曲线说明：

1) 气隙中  $F_f(I_f) \propto \Phi$

其他  $F_f(I_f)$  非线性

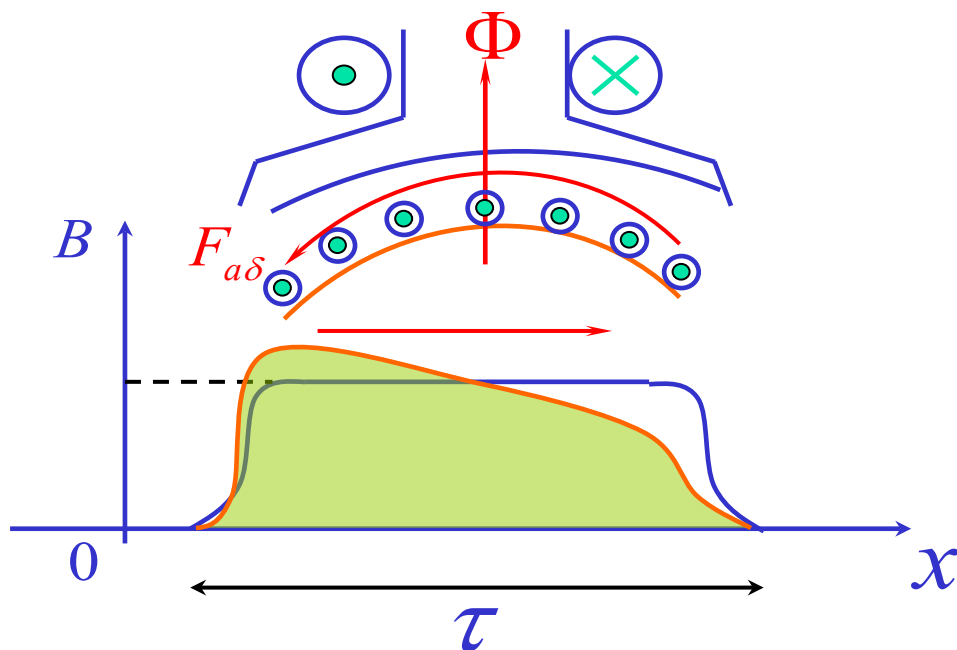


2)  $\Phi$  较小时，总磁位降主要在气隙上。  
 $\Phi$  较大时，铁磁材料饱和。

3) 额定运行点一般选在 A 点。

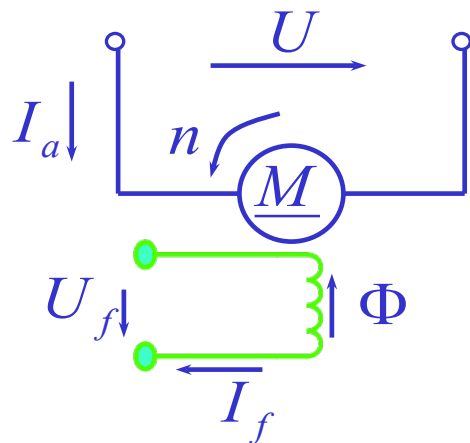
## 四、负载运行时的电枢反应

- 1、电枢磁通势  $F_a$ ：电枢电流产生的磁通势
- 2、电枢反应：由于  $F_a$  的存在，将影响空载时  $F_f$  产生的磁场，改变  $B$  的分布及  $\Phi$  的大小，此现象称电枢反应。
- 3、去磁效应： $F_f$  使电机定、转子铁心处于近饱和状态，加上后， $F_a$  一侧加深饱和时 增加较少，另一侧减小饱和时 减小较多，总体上 减小， $B$  减小， $\Phi$  减小，此现象称为去磁效应。



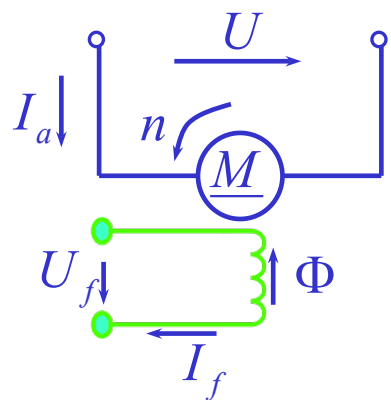
## 五、直流电机的图形符号及励磁方式

### 1、图形符号：

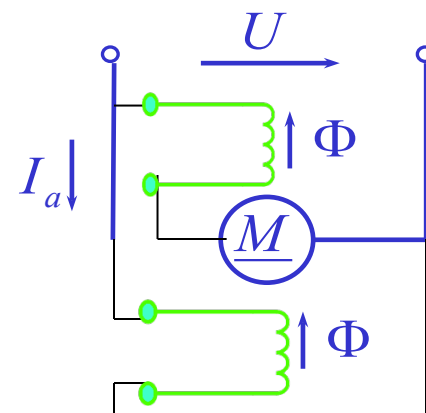
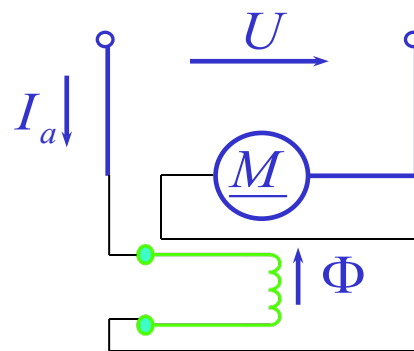
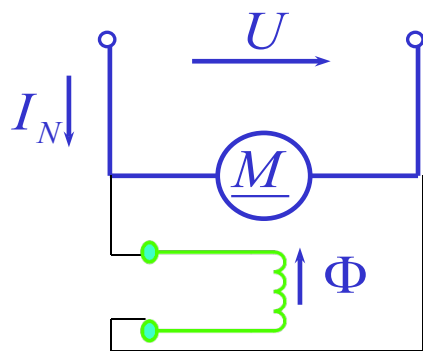


### 2、励磁方式：励磁绕组与电枢绕组的关系

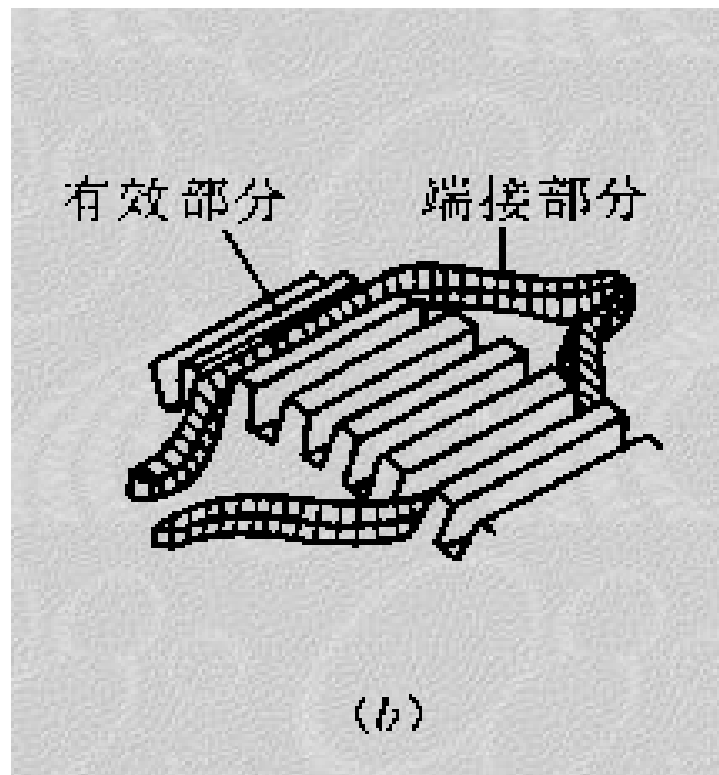
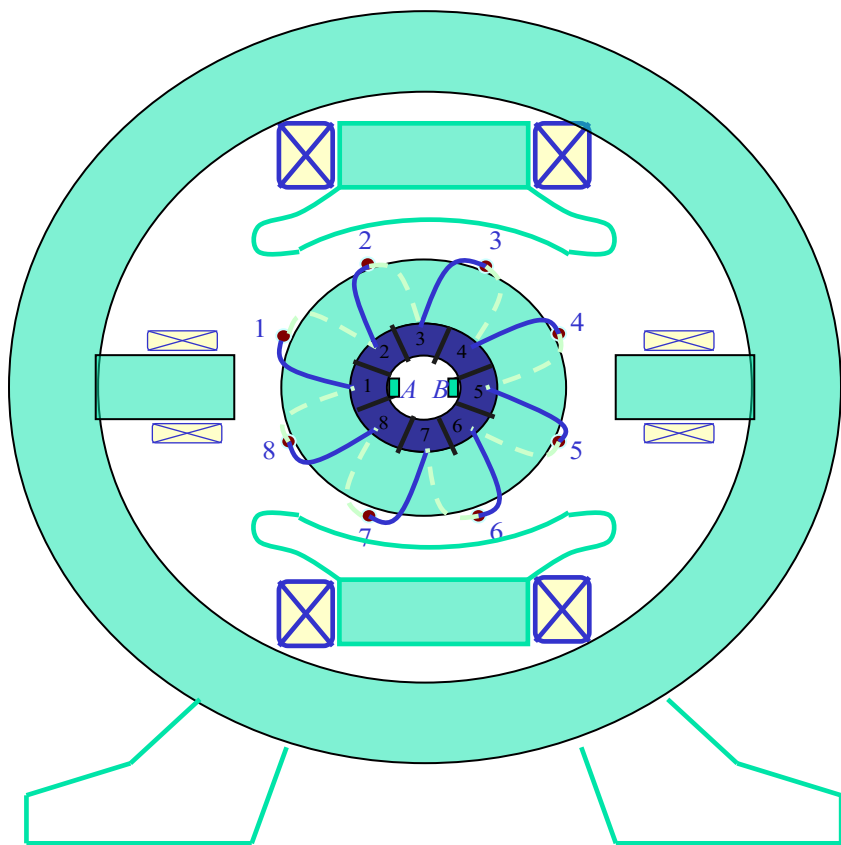
#### 1)、他励：



#### 2)、自励：并励、串励、复励



## 第四节 直流电机的电枢绕组





## 第四节 直流电机的电枢绕组

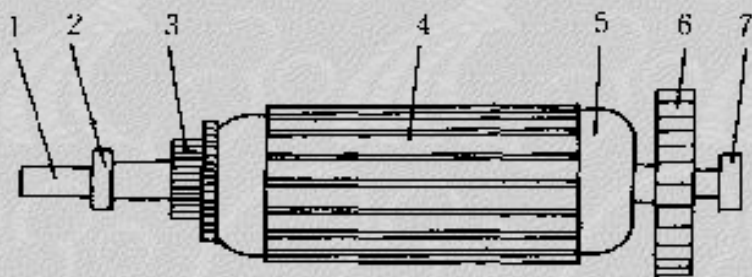
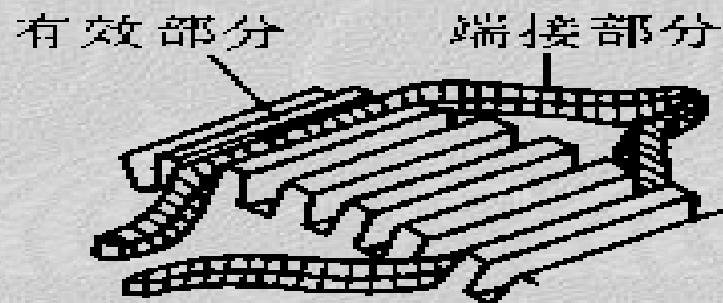


图 3.7 直流电机电枢

1——转轴；2——轴承；3——换向器；4——电枢铁心；  
5——电枢绕组；6——风扇；7——轴承



(b)

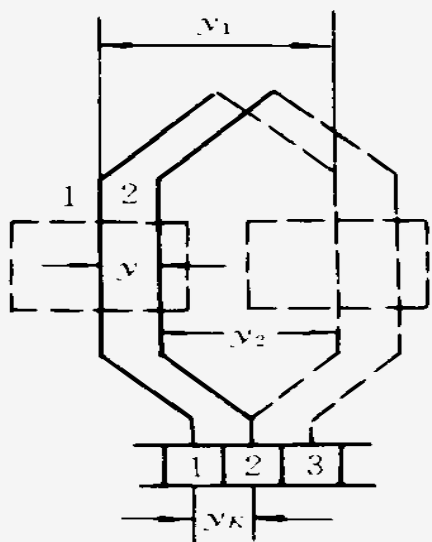


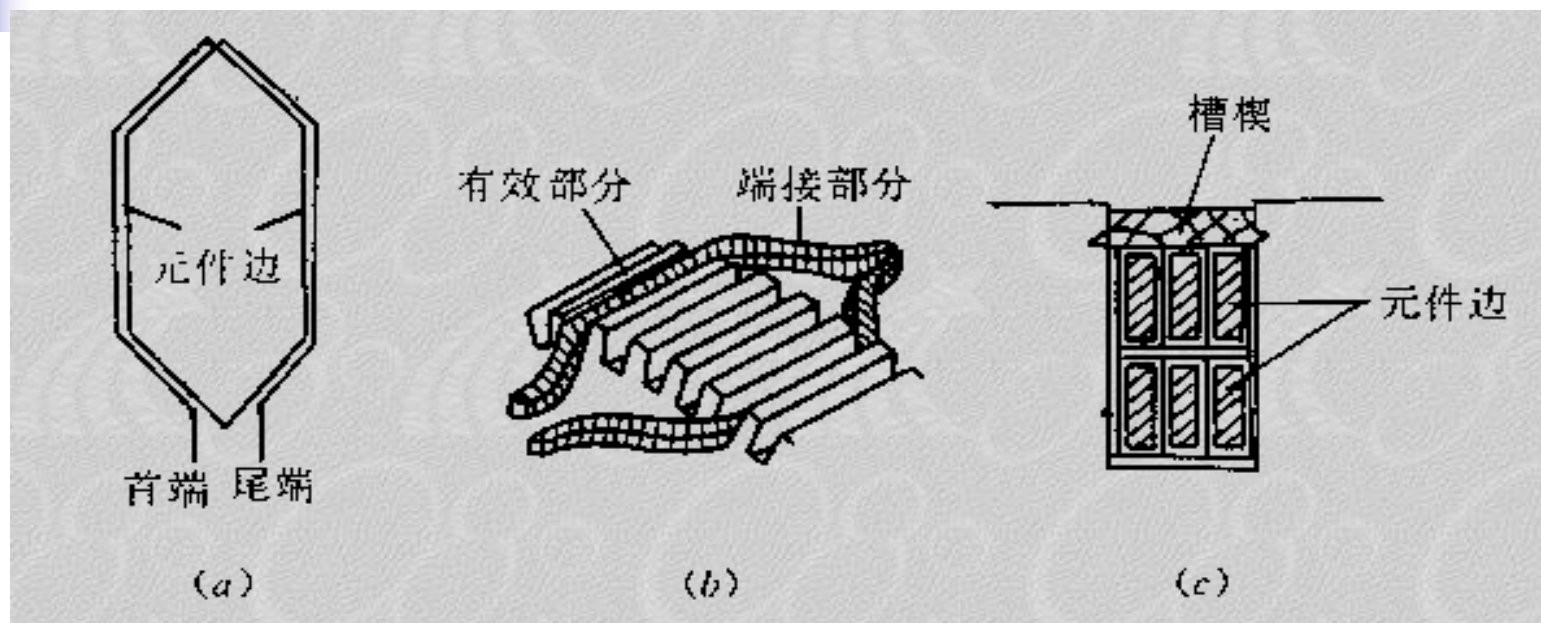
图 3.14 单叠绕组的节距

元件：（一个线圈）  
 $N_y$  匝 首端和尾端  
接不同的换向片上

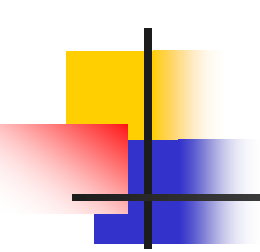
元件数：S  
换向片数：K

$$K=S$$

## 第四节 直流电机的电枢绕组



- 实槽中的虚槽数 $u$ ：指上层（或下层）槽里放置的元件数
- 总实槽数 $Z$ ：
- 总虚槽数 $Z_e$ ：  $Z_e = uZ = S = K$
- 总导体数：  $z = 2uN_y Z = 2N_y Z_e$
- **注意**：每个槽里可以放若干元件边，当槽里放两个元件边时，总槽数  $Z = S = K$

- 
- **电枢绕组：**安放在转子表面，转子旋转时将产生感应电动势，并流过电流。

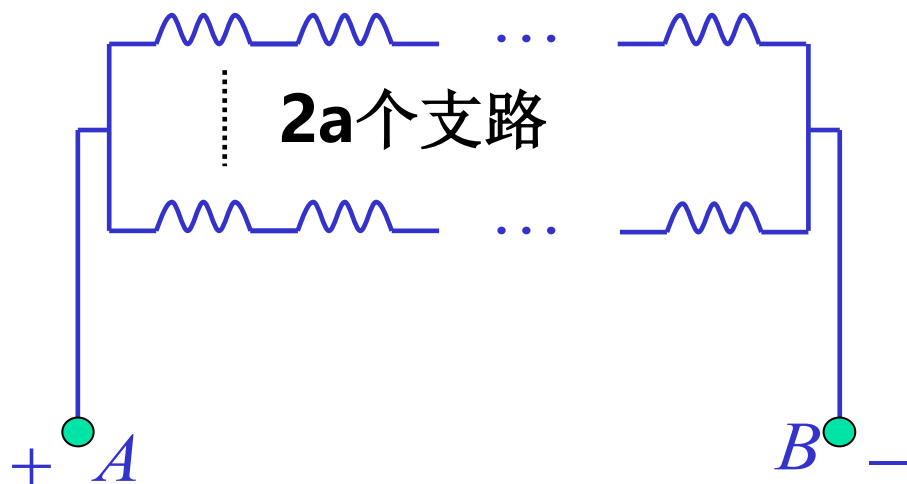
- 无论是发电机还是电动机

电磁功率=电枢电势×电枢电流

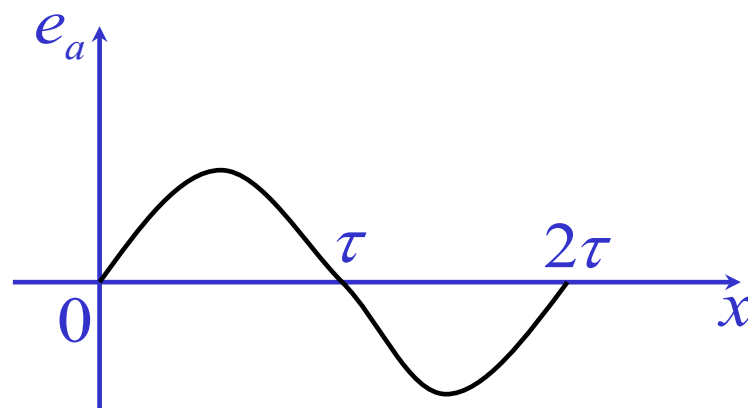
## 第五节 电枢电势、电磁转矩、电磁功率

各量的符号：电枢导体总数  $z$ 、极对数  $p$  极距  $\tau$   
并联支路对数  $a$

等效并联支路图：



每个支路的导体数  $z/2a$   
每个导体的感应电势  $e_a$   
在  $2\tau$  中呈周期性变化



# 一、电枢电势

电枢电势  $E_a$  :

1、一个  $\tau$  范围内的平均磁密

$$B_{av} = \Phi / \tau l$$

$\Phi$  —— 每极磁通

$l$  —— 轴向的导体有效长度

$\tau$  —— 极距

2、一个  $\tau$  内一根导体的电势

$$e_{av} = B_{av} l v$$

$$v = 2 p \tau \frac{n}{60}$$

$v$  —— 导体的线速度

$$\therefore e_{av} = \frac{2p}{60} \cdot \Phi n$$

3、电枢电势:

$$E_a = \frac{z}{2a} \cdot e_{av} = \frac{pz}{60a} \cdot \Phi n$$

令:

$$C_e = \frac{pz}{60a}$$

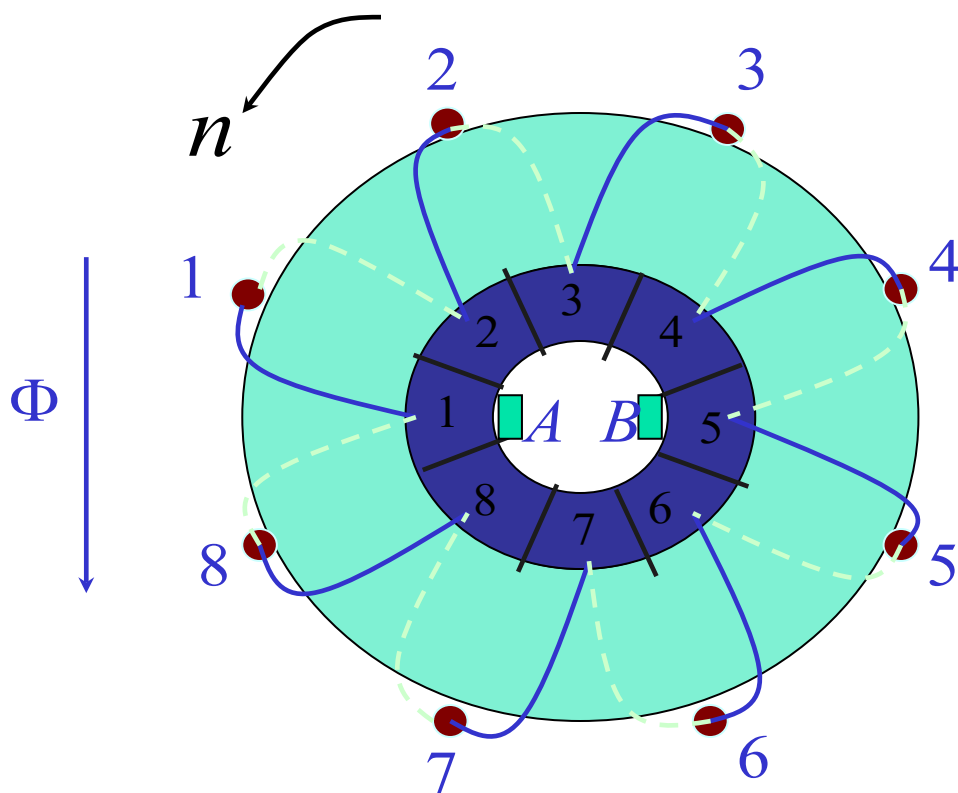
称为电势常数

$$E_a = C_e \Phi n$$

# 一、电枢电势

说明：

发电机运行时：电枢电流与电枢电势同方向，  
电磁力与转速反方向，即**吸收机械能，输出电能**



电动机运行时：电枢电势，也称反电动势，**吸收电能，输出机械能**

## 二、电磁转矩

电磁转矩  $T$  :

1、一根导体的平均电磁力

$$f_{av} = B_{av} l i_a$$

$$i_a = I_a / 2a$$

$$f_{av} = \frac{\Phi}{\tau l} \cdot l \frac{I_a}{2a} = \frac{1}{2a\tau} \cdot \Phi I_a$$

2、一根导体贡献的电磁转矩

$$T_{av} = f_{av} \cdot D/2$$

$$D = \frac{2p\tau}{\pi}$$

$$T_{av} = \frac{1}{2a\tau} \cdot \Phi I_a \cdot \frac{2p\tau}{2\pi} = \frac{p}{2a\pi} \cdot \Phi I_a$$

3、电磁转矩:  $T = z \cdot T_{av} = \frac{pz}{2a\pi} \cdot \Phi I_a$

令:  $C_t = \frac{pz}{2a\pi}$

称为转矩常数

$$T = C_t \Phi I_a$$



## 二、电磁转矩

---

说明：

1、  $C_t = 9.55 C_e$

2、方向的意义：

发电机运行时：电磁转矩与转速反方向，**吸收机械能，  
输出电能。**

电动机运行时：电磁转矩带动转子旋转，**输出机械能，  
吸收电能。**



### 三、电磁功率

电磁功率  $P_M$  :

发电机：电枢吸收机械功率  $T\Omega$ ，输出电功率  $E_a I_a$

电动机：电枢吸收电功率  $E_a I_a$ ，输出机械功率  $T\Omega$

电枢是能量转换的枢纽，这也是“电枢”这个名称的由来  
机械形式的功率  $T\Omega$ ，电形式的功率  $E_a I_a$

在数值上相等

$$T\Omega = \frac{pz}{2\pi a} \cdot \Phi I_a \cdot \frac{2\pi n}{60} = \frac{pz}{60a} \cdot \Phi \cdot n \cdot I_a = E_a I_a$$

这两个形式不同而数值相同的功率叫电磁功率

$$P_M = T\Omega = E_a I_a$$



# 电磁功率的理解

- 发电机：电枢吸收**机械形式**的电磁功率转换成**电形式**的电磁功率；
- 电动机：电枢吸收**电形式**的电磁功率转换成**机械形式**的电磁功率；
- 电磁功率：在电机中进行**能量形式转换**的那部分能量。



## 第六节 直流发电机—以他励发电机为例

主要内容:

- 发电机稳态运行基本方程式
- 发电机的功率传递关系

# 一、发电机惯例

## 1、惯例图示：

## 2、主回路：

$T_1$ ——原动机转矩  $N \cdot m$

$T_0$ ——空载转矩  $N \cdot m$

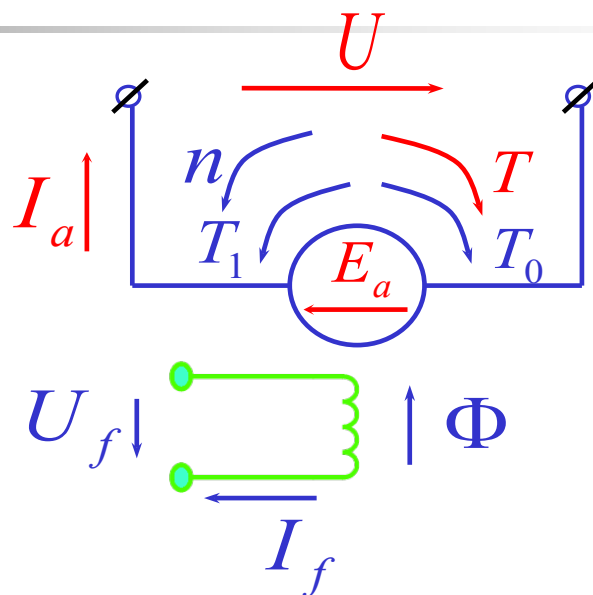
$T$ ——电磁转矩  $N \cdot m$

$n$ ——转速  $r/min$

$E_a$ ——电枢电势  $V$

$I_a$ ——电枢电流  $A$

$U$ ——输出电压  $V$



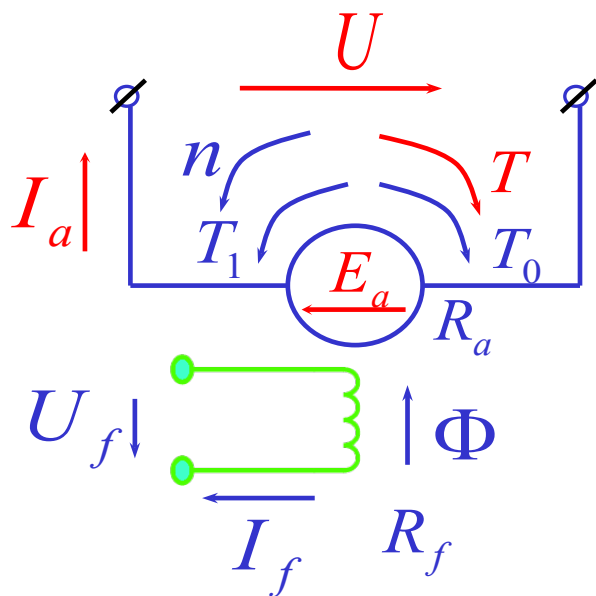
## 3、励磁回路：

$U_f$ ——励磁电压  $V$

$I_f$ ——励磁电流  $A$

$\Phi$ ——主磁通（每极磁通）  $Wb$

## 二、稳态运行时的基本方程式



1、电动势电压平衡方程式：

$$E_a = U + I_a R_a$$

2、电枢电动势：

$$E_a = C_e \Phi n$$

3、电磁转矩：

$$T = C_t \Phi I_a$$

4、转动平衡方程式：

$$T_1 = T + T_0$$

5、励磁回路：

$$I_f = U_f / R_f$$

6、气隙每极磁通：

$$\Phi = f(I_f, I_a) = f(I_f) + f(I_a)$$

### 三、发电机稳态运行时的功率传递关系

发电机吸收机械功率，输出电功率。

#### 1、机械功率：

由转动平衡方程式： $T_1 = T + T_0$

$$\implies T_1\Omega = T\Omega + T_0\Omega$$

$$\implies P_1 = P_M + p_0$$

$P_1$ ——输入功率，原动机输给发电机的机械功率

$P_M$ ——机械形式的电磁功率

$p_0$ ——空载损耗功率

### 三、发电机稳态运行时的功率传递关系

#### 2、电功率：

由电动势电压平衡方程式： $E_a = U + I_a R_a$

$$\implies E_a I_a = UI_a + I_a^2 R_a$$

$$\implies P_M = P_2 + p_{Cua}$$

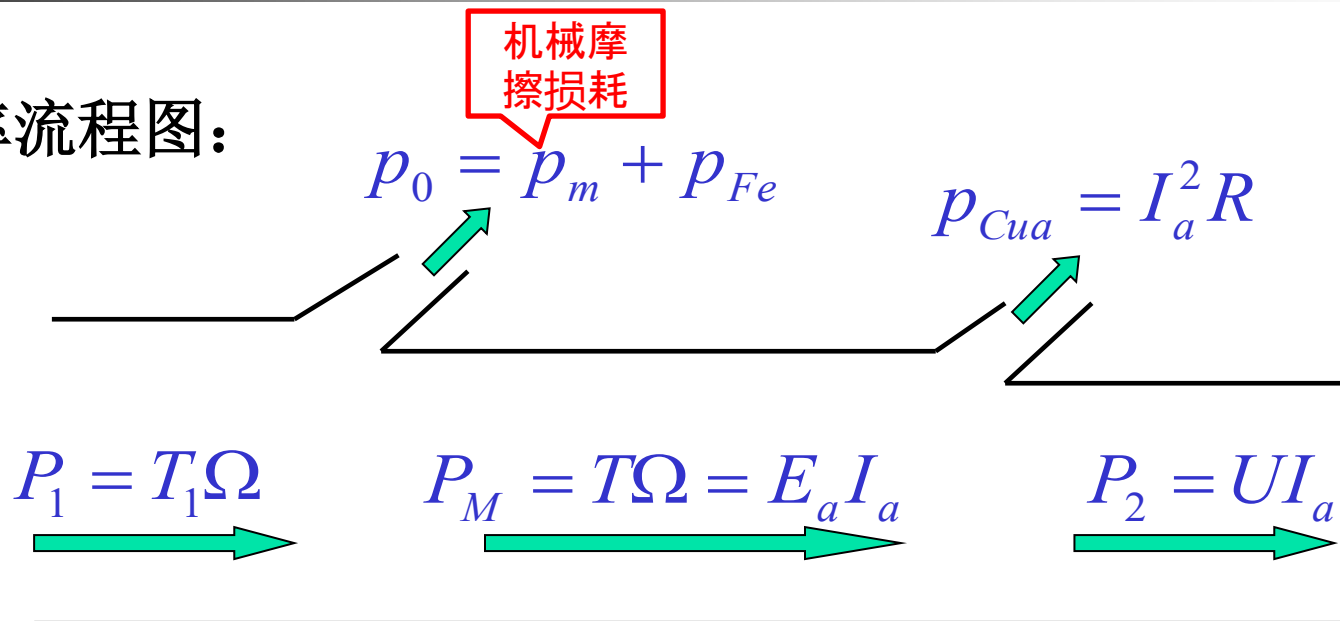
$P_M$ ——电形式的电磁功率

$P_2$ ——输出功率

$p_{Cua}$ ——电枢损耗功率（电枢铜耗）

### 三、发电机稳态运行时的功率传递关系

#### 3、功率流程图：



#### 4、发电机的效率：

1) 总损耗：

$$\sum p = p_m + p_{Fe} + p_{Cua} + p_s + p_{Cuf}$$

2) 效率：

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{\sum p + P_2}$$

励磁损耗  
他励没有

杂散损耗

有补偿：额定功率0.5%  
无补偿：额定功率1%





## 第七节 直流电动机—以他励电动机为例

主要内容:

- 电动机稳态运行基本方程式
- 电动机的功率传递关系

# 一、直流电动机惯例

1、惯例图示：

2、主回路：

$T_2$  —— 输出转矩  $N \cdot m$

$T_0$  —— 空载转矩  $N \cdot m$

$T$  —— 电磁转矩  $N \cdot m$

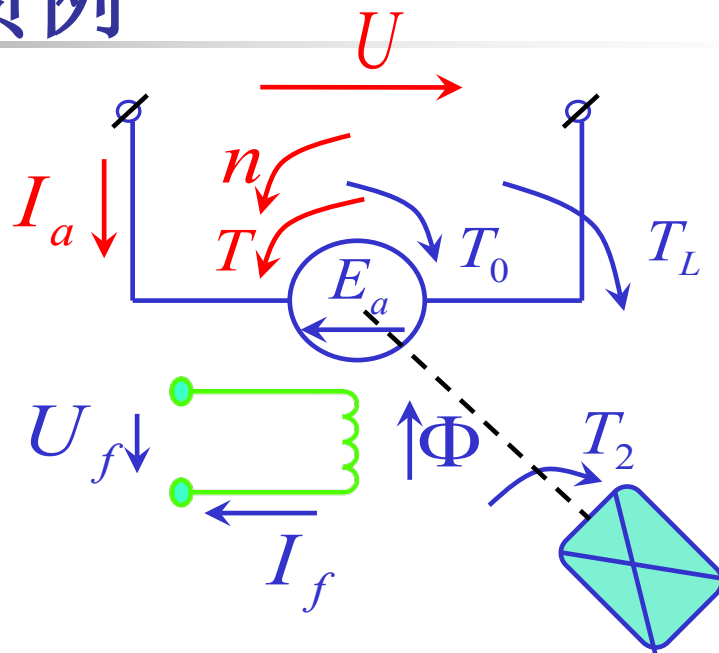
$n$  —— 转速  $r/min$

$E_a$  —— 电枢电势  $V$

$I_a$  —— 电枢电流  $A$

$U$  —— 输入电压  $V$

$T_L = T_2 + T_0$  —— 负载转矩



3、励磁回路：

$U_f$  —— 励磁电压  $V$

$I_f$  —— 励磁电流  $A$

$\Phi$  —— 主磁通（每极磁通）  $Wb$

## 二、直流电动机稳态运行的基本方程式

1、电动势电压平衡方程式：

$$U = E_a + I_a R_a$$

2、电枢电动势：

$$E_a = C_e \Phi n$$

3、电磁转矩：

$$T = C_t \Phi I_a$$

4、转动平衡方程式：

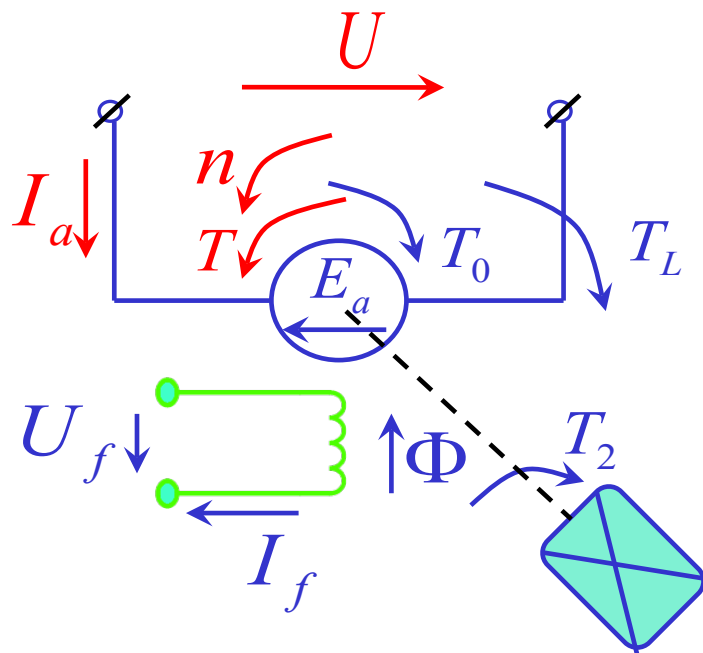
$$T = T_2 + T_0 = T_L$$

5、励磁回路：

$$I_f = U_f / R_f$$

6、气隙每极磁通：

$$\Phi = f(I_f, I_a) = f(I_f) + f(I_a)$$



### 三、电动机稳态运行时的功率传递关系

电动机吸收电功率，输出机械功率。

#### 1、电功率：

由电动势电压平衡方程式： $U = E_a + I_a R_a$

$$\implies UI_a = E_a I_a + I_a^2 R_a$$

$$\implies P_1 = P_M + p_{Cua}$$

$P_M$  ——电形式的电磁功率

$P_1$  ——输入功率

$p_{Cua}$  ——电枢损耗功率（电枢铜耗）

# 三、电动机稳态运行时的功率传递关系

## 2、机械功率：

由转动平衡方程式：

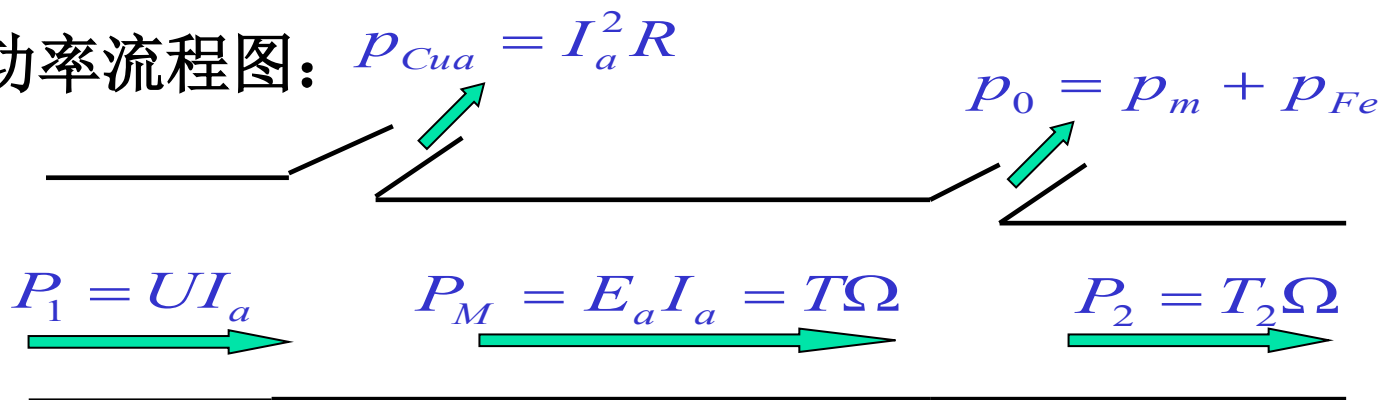
$$T = T_2 + T_0$$
$$\implies T\Omega = T_2\Omega + T_0\Omega$$
$$\implies P_M = P_2 + p_0$$

$P_2$  ——输出功率，电动机轴上输出的机械功率

$P_M$  ——机械形式的电磁功率

$p_0$  ——空载损耗功率

## 3、功率流程图：



### 三、电动机稳态运行时的功率传递关系

#### 4、电动机的效率：

1) 总损耗：

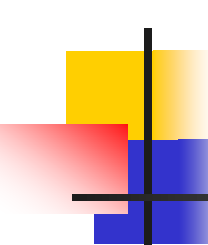
$$\sum p = p_m + p_{Fe} + p_{Cua} + p_s + p_{Cuf}$$

励磁损耗  
他励没有

2) 效率：

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{\sum p + P_2}$$

杂散损耗  
有补偿：额定功率0.5%  
无补偿：额定功率1%



**例题3-6：**一台四极他励直流电机，单波绕组，电枢导体总数  $z = 372$ ，电枢回路总电阻  $R_a = 0.208\Omega$ ，此电机运行在电压  $U = 220V$  的直流电网上，电机转速  $n = 1500 r/\min$ ，气隙每极磁通  $\Phi = 0.011Wb$ ， $p_{Fe} = 362W$ ， $p_m = 204W$ ，忽略附加损耗和励磁损耗。

问：该电机运行在发电机状态还是电动机状态？

求：电磁转矩、输入功率、总损耗和效率。

解:  $C_e = \frac{pz}{60a} = \frac{2 \times 372}{60 \times 1} = 12.4$

$$E_a = C_e \Phi n = 12.4 \times 0.011 \times 1500 = 204.6(V)$$

按发电机惯例

$$E_a = U + I_a R_a \Rightarrow I_a = \frac{E_a - U}{R_a} = -74(A)$$

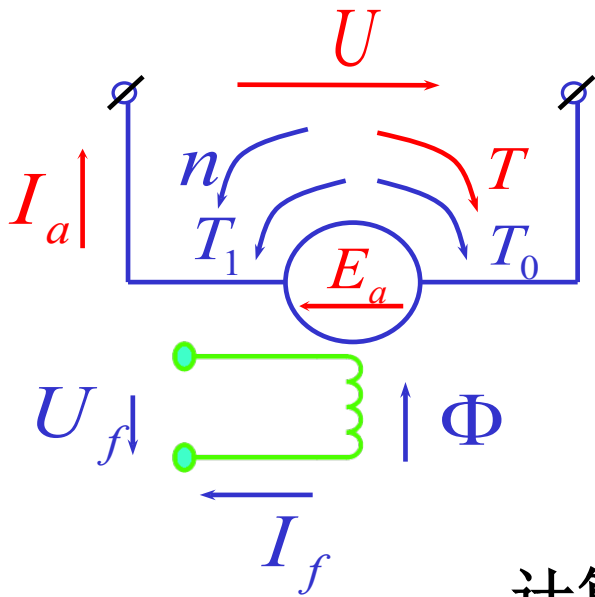
$$UI_a < 0$$

不是输出电功率，而是吸收电功率  
所以，电机运行在电动机状态

也可用  $E_a < U$  或  $UI_a < 0$  进行判断

计算采用电动机惯例，比较简单，结果如下：

$$T = 96.38 N \cdot m \quad P_2 = 14574 W \quad \eta = 89.5\%$$







## 第八节 直流电机的换向

换向火花产生的原因很复杂，它受到电磁、机械、电热、电化学等多种原因的影响，最主要的原因是电磁因素。

阻碍电枢绕组电流换向的电磁因素是换向元件在换向过程中产生的附加电动势，附加电动势可分为两类：

- 电抗电动势
- 电枢反应电动势

## 第八节 直流电机的换向

改善换向的主要方法：

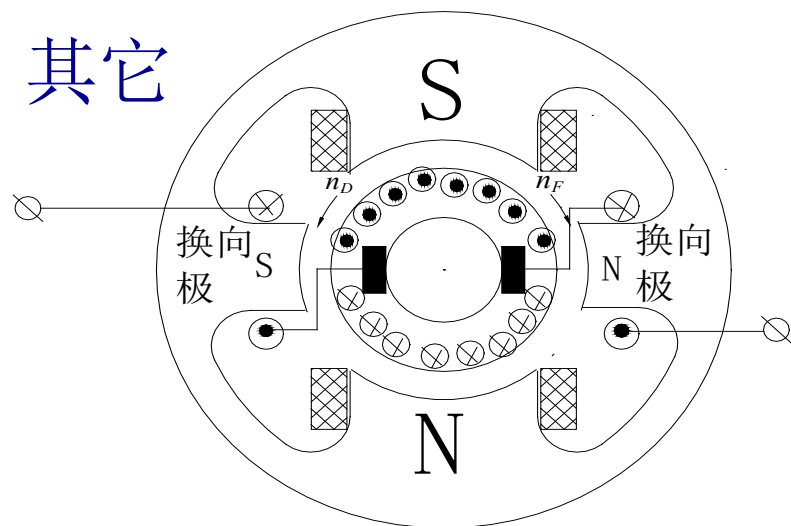
装置换向磁极

安装补偿绕组

调整电刷

合理选择电刷

其它



利用换向磁极产生的磁动势方向与电枢反应磁动势的方向相反，大小略大于电枢反应磁动势。这就使换向磁动势可以抵消电枢反应磁动势，剩余的换向磁动势产生的磁通会在换向元中产生感应电动势，其方向正好与电抗电势相反，迭加的结果可抵消。从而消除火花，改善换向。



# 第四章 直流电机的电力拖动

## 他励直流电机为例

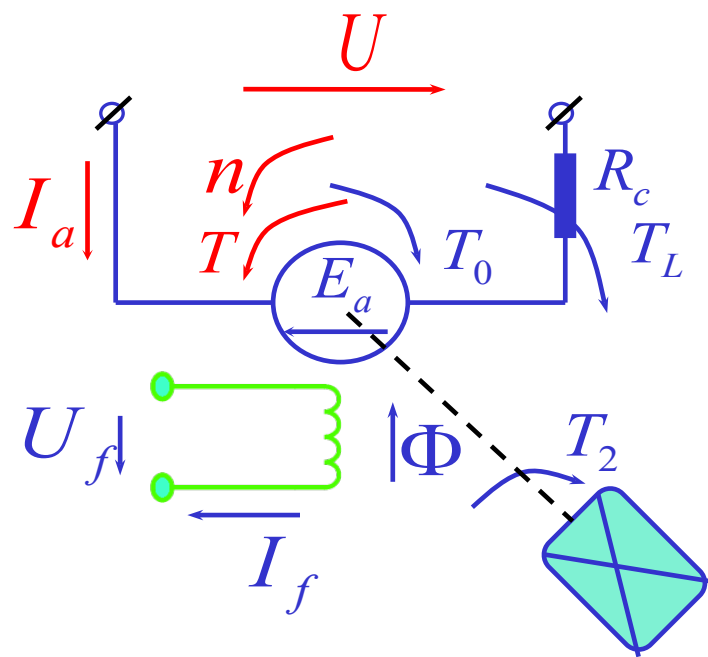
### 本章主要内容

- 直流电机的机械特性
- 直流电机的起动、反转
- 直流电机的调速
- 直流电机的制动
- 电力拖动系统的过渡过程

# 第一节 他励直流电动机的机械特性

电机的机械特性——电动机转速与电磁转矩之间的关系

## 一、机械特性的一般表达式



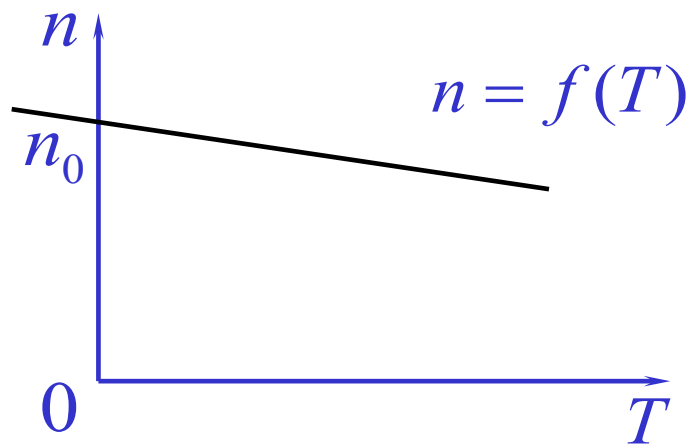
$$\left. \begin{aligned} E_a &= C_e \Phi n \\ T &= C_t \Phi I_a \Rightarrow I_a = \frac{T}{C_t \Phi} \\ E_a &= U - I_a (R_a + R_c) \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

理解的基础上记忆

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_c}{C_e C_t \Phi^2} \cdot T$$

# 第一节 他励直流电动机的机械特性

由一般表达式可见，当  $U$ 、 $\Phi$ 、 $R_a$  一定时，方程  $n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_c}{C_e C_t \Phi^2} \cdot T$  为一次函数，可用  $T-n$  坐标系中的一条直线表示。



$$n = n_0 - \beta T$$

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

理想空载转速

$$\beta = \frac{R_a + R_c}{C_e C_t \Phi^2}$$

直线斜率

通常称  $\beta$  大的机械特性为软特性，

$\beta$  小的机械特性为硬特性。

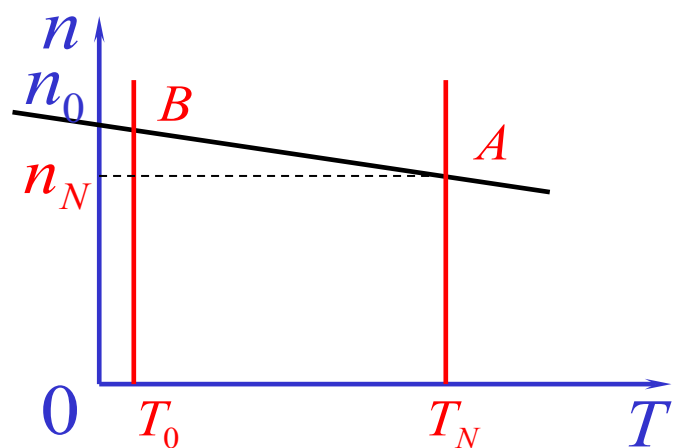
# 第一节 他励直流电动机的机械特性

一般情况下，制成的电机  $C_e$ 、 $C_t$  是不变的。

当  $U = U_N$ 、 $\Phi = \Phi_N$ 、 $R_c = 0$  时，称为固有特性。

当人为改变  $U$  或  $\Phi$  或  $R_c$  时，称为人为特性。

## 二、直流电机的固有机机械特性 $U = U_N$ $\Phi = \Phi_N$ $R_c = 0$



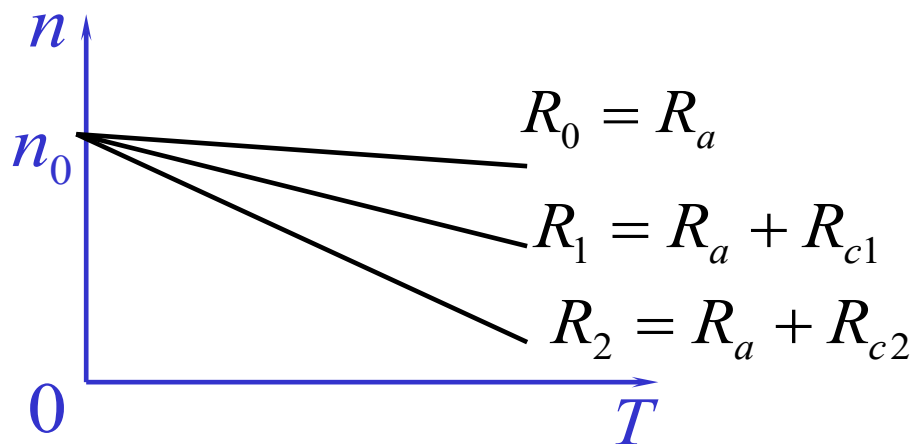
$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi_N^2} \cdot T$$

$$\Delta n_N = n_0 - n_N = \beta_N T_N = \frac{R_a}{C_e C_t \Phi_N^2}$$

称为额定转速降

### 三、直流电机的人为机械特性

#### 1、电枢回路串电阻的人为特性



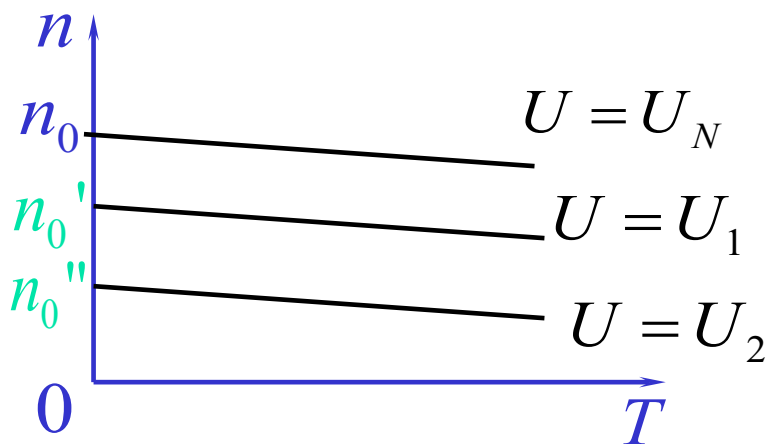
$$U = U_N \quad \Phi = \Phi_N \quad R_c \neq 0$$

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_c}{C_e C_t \Phi_N^2} \cdot T$$

$$\Delta n_0 : \Delta n_1 : \Delta n_2 = R_0 : R_1 : R_2$$

特点：（1） $n_0$ 不变， $\beta$ 变大；  
（2） $R_c$ 越大，特性越软。

#### 2、降电枢电压的人为特性



$$U < U_N \quad \Phi = \Phi_N \quad R_c = 0$$

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi_N^2} \cdot T$$

$$n_0 : n_0' : n_0'' = U_N : U_1 : U_2$$

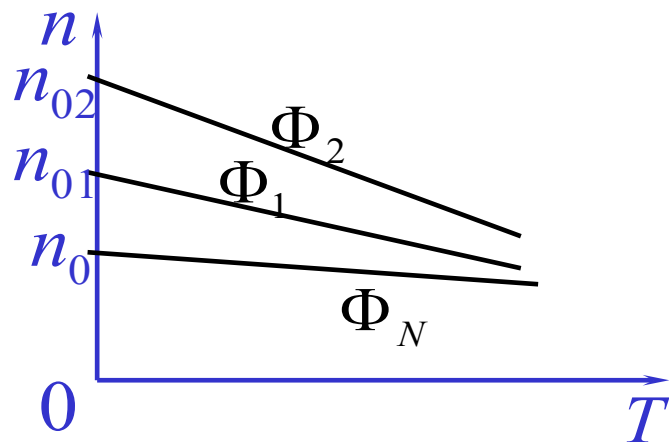
特点：（1） $n_0$ 随  $U$  变化；  
（2）曲线是一组平行线。

### 三、直流电机的人为机械特性

#### 3、弱磁的人为特性

$$U = U_N \quad \Phi < \Phi_N \quad R_c = 0$$

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi^2} \cdot T$$



$$n_0 : n_{01} : n_{02} = \frac{1}{\Phi_N} : \frac{1}{\Phi_1} : \frac{1}{\Phi_2}$$

特点：（1）弱磁， $n_0$  增大；  
（2）弱磁， $\beta$  增大



## 第二节 他励直流电动机的起动、反转

### 一、起动的有关问题

1、起动：指电机从静止到转动直到稳定转速的过程

$$\text{即： } n : 0 \rightarrow n_L$$

$$\text{此时： } E_a : 0 \rightarrow E_{aL}$$

2、起动的必要条件

$$\text{只有 } T > T_L, \text{ 才能使 } \frac{dn}{dt} > 0, n \uparrow$$

即：要求有足够大的起动转矩  $T_s$



# 一、起动的有关问题

$$T_s = C_t \Phi I_s$$

$T_s$  起动转矩

$I_s$  起动电流

**通常要求满磁通起动**

讨论：

- 1、不加励磁电流起动会出现什么情况？
- 2、起动到一定转速时，励磁回路断路，会出现什么问题？

**绝不允许励磁回路断路**



# 一、起动的有关问题

## 3、电动机拖动负载起动的一般条件

$$(1)、I_s \leq (2 \sim 2.5)I_N$$

$$(2)、T_s \geq (1.1 \sim 1.3)T_L$$

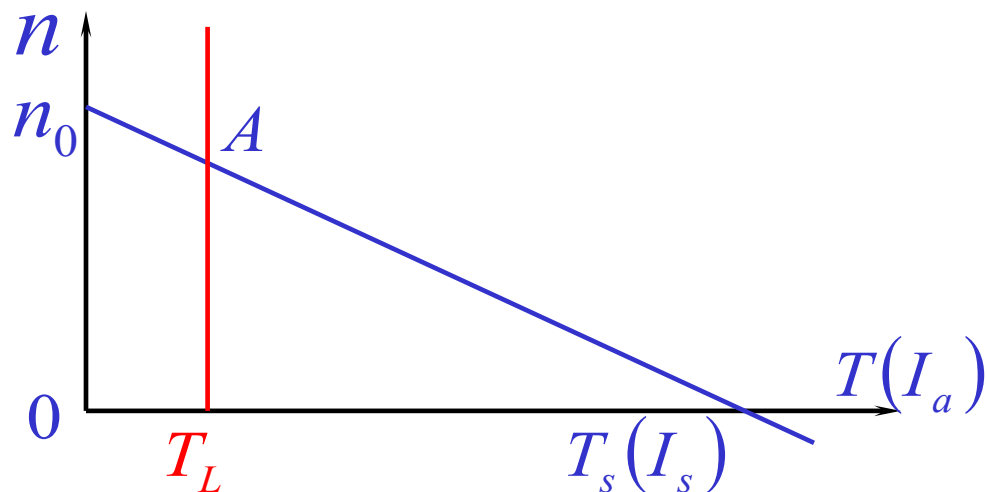
$$\Leftrightarrow I_s \geq (1.1 \sim 1.3)I_L$$

$$\text{即}(1.1 \sim 1.3)I_L \leq I_s \leq (2 \sim 2.5)I_N$$

## 二、起动方式

### 1、直接起动（固有特性启动）

此时  $U = U_N$ ,  $R_c = 0$ ,  $\Phi = \Phi_N$



$$\because U_N = E_a + I_s R_a,$$

$$\text{且 } E_a = 0, E_{aN} \approx 0.95U_N$$

$$\therefore I_s \approx 20I_N \gg I_N$$

$$\text{此时 } T_s \approx 20T_N$$

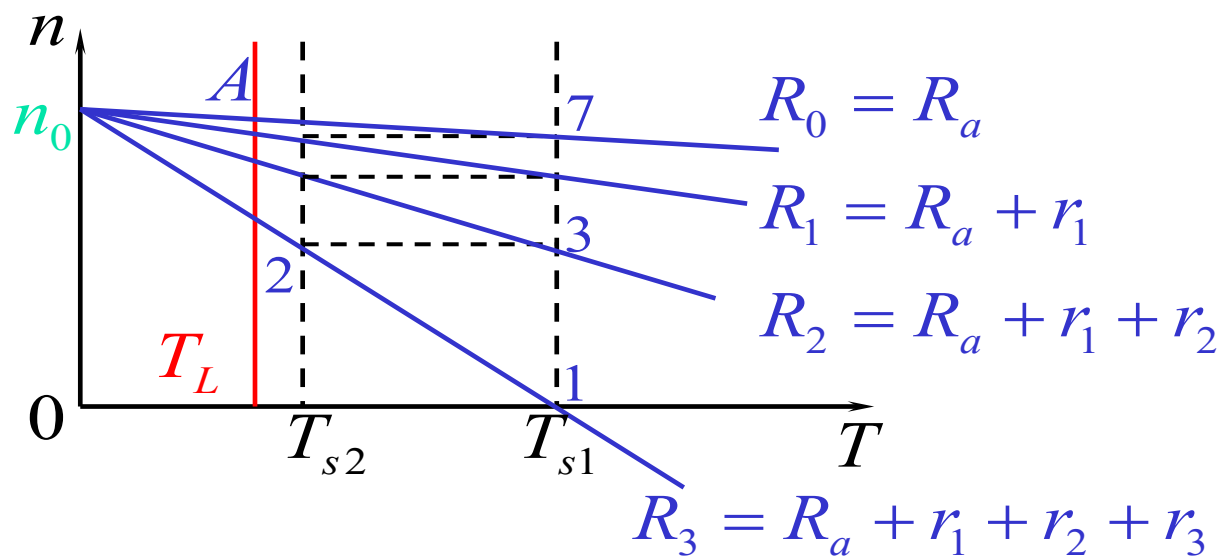
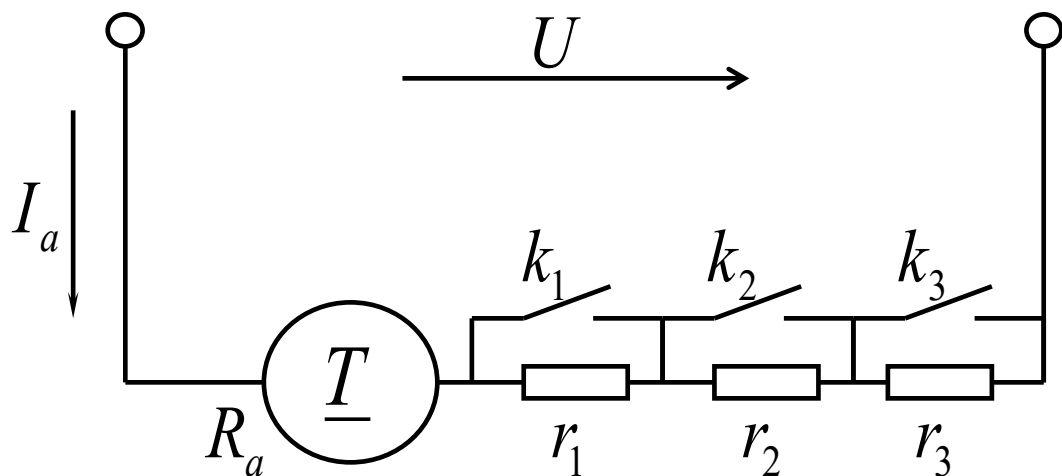
直流电机一般**不允许**直接起动

要使起动电流满足一般条件可采用两种方法

- 电枢回路串电阻起动
- 降压起动

## 二、起动方式

### 2、电枢回路串电阻起动

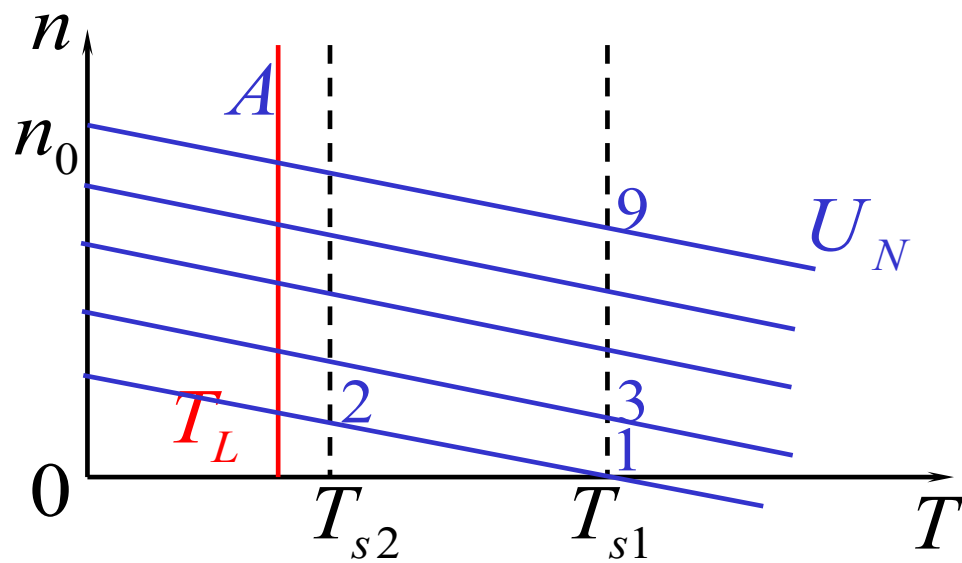


$T_{s1}$  —— 为起动转矩  
一般取  $T_{s1} = (1.5 \sim 2.2)T_N$

$T_{s2}$  —— 为切换转矩  
一般取  $T_{s2} = (1.1 \sim 1.3)T_L$

$T_{s1}$ 、 $T_{s2}$  对应  
的电流  $I_{s1}$ 、 $I_{s2}$   
叫起动电流和  
切换电流

### 3、降电压起动:





## 4、反转：

---

改变励磁电流方向/即磁通的方向  
改变电源的极性

## 第三节 他励直流电动机的调速

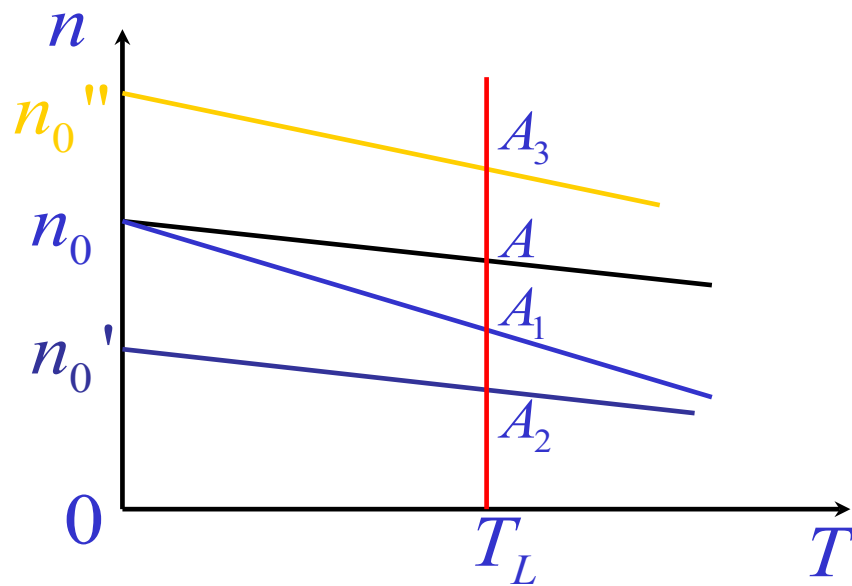
本课程只讲电机的调速方法及一些相关问题，调速方法的实现将在后续课程中介绍。

### 一、他励直流电动机的调速方法

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_c}{C_e C_t \Phi^2} \cdot T$$

对应的调速方法有三种。

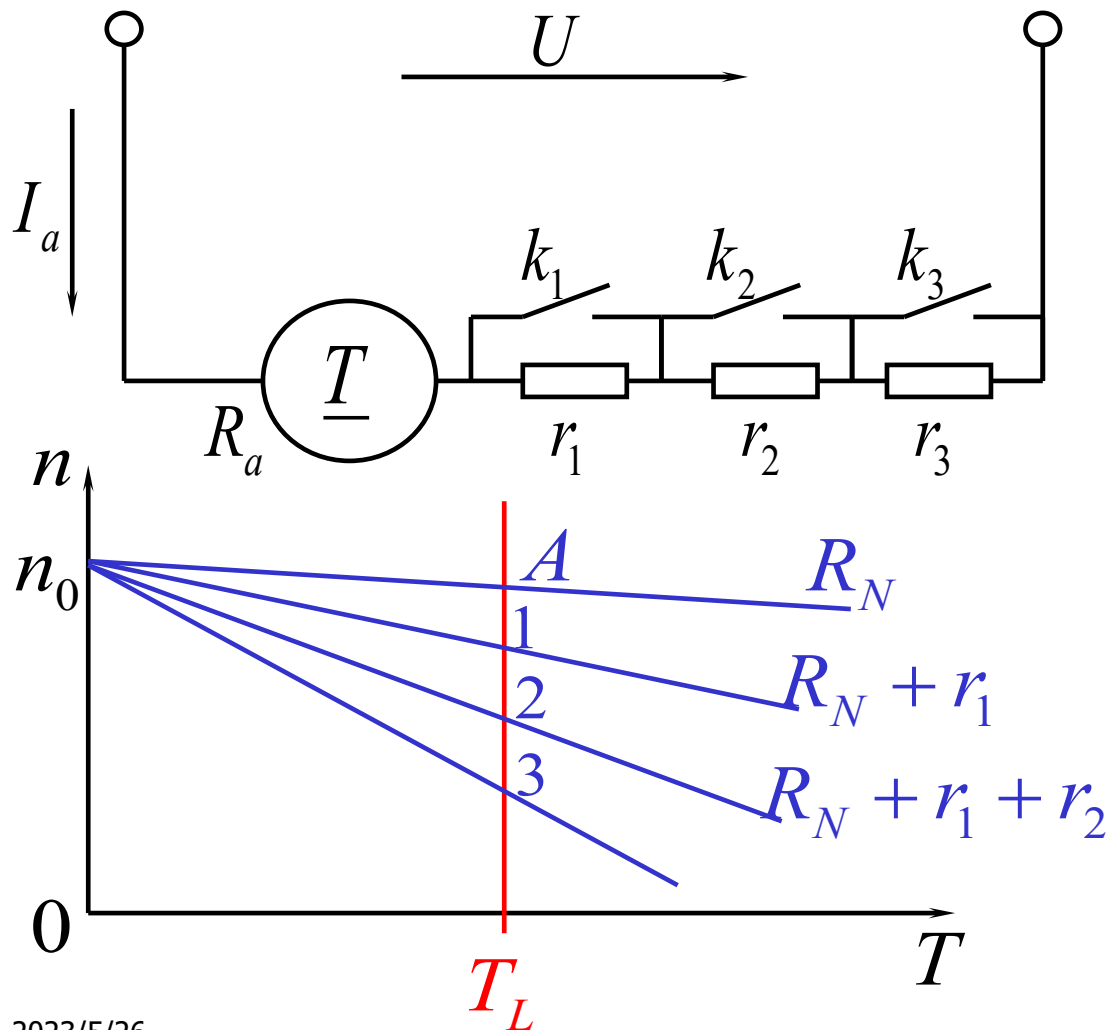
- 电枢回路串电阻调速
- 降电压调速
- 弱磁调速





# 一、他励直流电动机的调速方法

## 1、电枢回路串电阻调速



性质:

➤调速方向——向下

基速: 固有机械特性上的转速

调速方向: 从基速向下调

➤稳态电枢电流不变, 与 $n$ 无关

➤串接电阻上损耗大

➤特性变软, 速度稳定性差

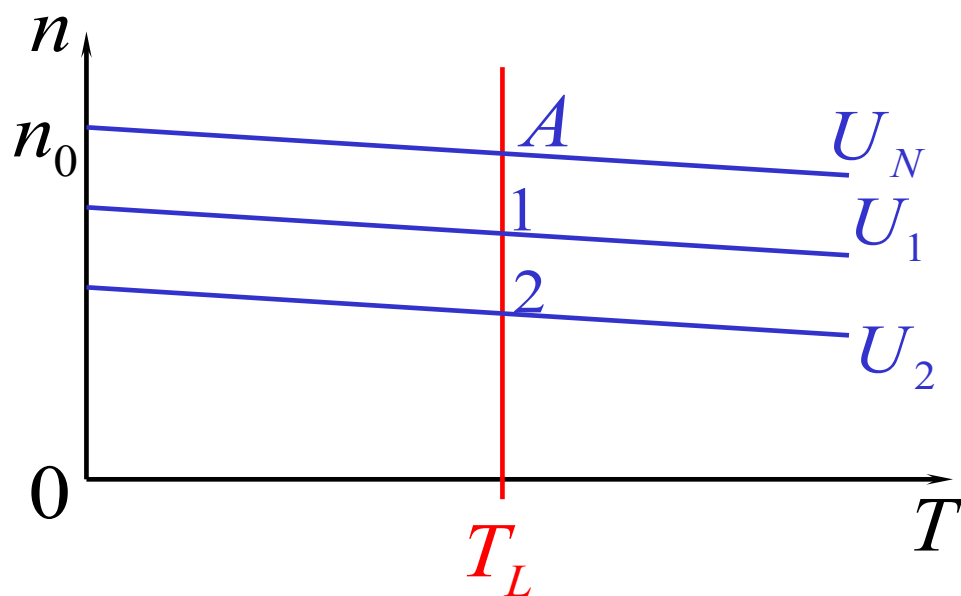
➤电枢电流较大时, 设备笨重

➤有级调速 (最多6级)

➤大容量电动机不采用

# 一、他励直流电动机的调速方法

## 2、降低电源电压调速



$$U_2 < U_1 < U_N$$

性质：

- 调速方向——向下；
- 稳态电枢电流不变；
- 特性硬度不变，速度稳定性好；
- 可实现无级调速。

# 一、他励直流电动机的调速方法

## 3、弱磁调速

性质：

➤调速方向——向上

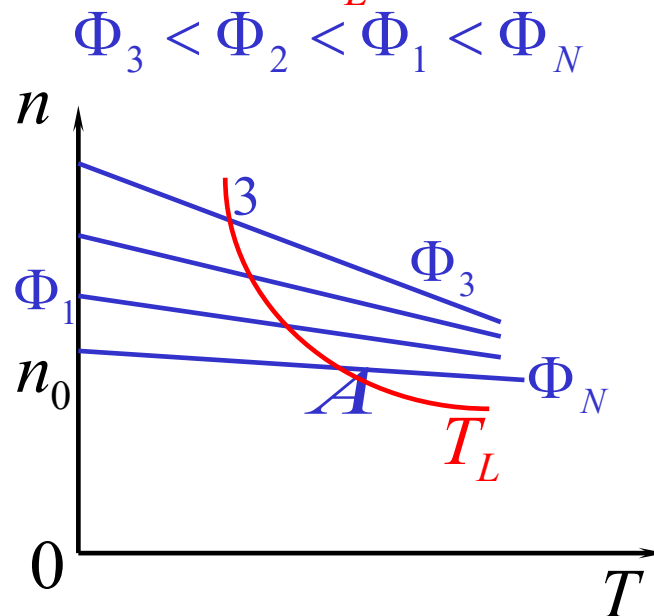
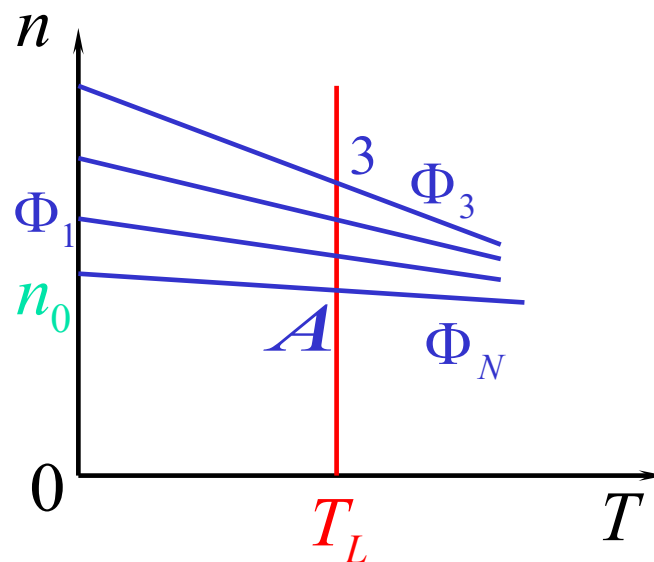
➤稳态电枢电流

恒功率负载——不变

恒转矩负载——与磁通反比

➤特性变软，速度稳定性变差

➤可实现无级调速



## 二、调速方式

### 1、额定电流的含义：

长期运行条件下，电枢电流的**上限值**。

### 2、调速方式的含义：

在电枢电流为**额定电流**时，表征某种调速方法的负载能力与允许输出。

1) 恒转矩调速方式：即采用某种调速方法时**电磁转矩不变**

$$T = T_N \Big|_{I_a = I_N}$$

2) 恒功率调速方式：即采用某种调速方法时**电磁功率不变**

$$P_M = P_{MN} \Big|_{I_a = I_N}$$

### 三、调速的性能指标(后续课程具体讲)

表 4.1 所示为他励直流电动机三种调速方法的一些调速性能比较。

表 4.1

调 速 方 法	电枢串电阻	降电源电压	减 弱 磁 通
调 速 方 向	向 下 调	向 下 调	向 上 调
$\delta \leq 50\%$ 时调速范围	约 2	约 10~12	1.2~2 3~4 (与 $\delta$ 无关)
一定调速范围内 转速的稳定性	差	好	较好
负载能力	恒转矩	恒转矩	恒功率
调速平滑性	有级调速	无级调速	无级调速
设备初投资	少	多	较多
电能损耗	多	较少	少

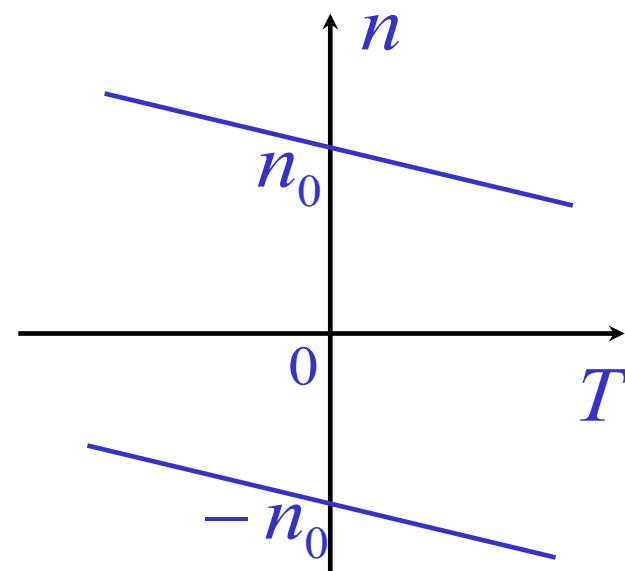
工程中常用降电压与弱磁相结合的双向调速方法

## 第四节 他励直流电动机的制动

### 一、象限问题

#### 1、他励直流电动机会在四个象限内运行

- 1) 机械特性分布于四个象限;
- 2) 负载转矩特性也可能分布于四个象限;
- 3) 稳态运行点可能分布于四个象限;
- 4) 过渡过程可能经过四个象限。

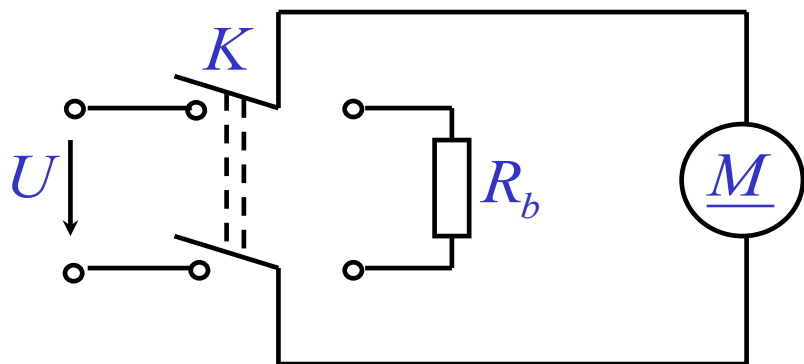


#### 2、电动运行和制动运行的定义

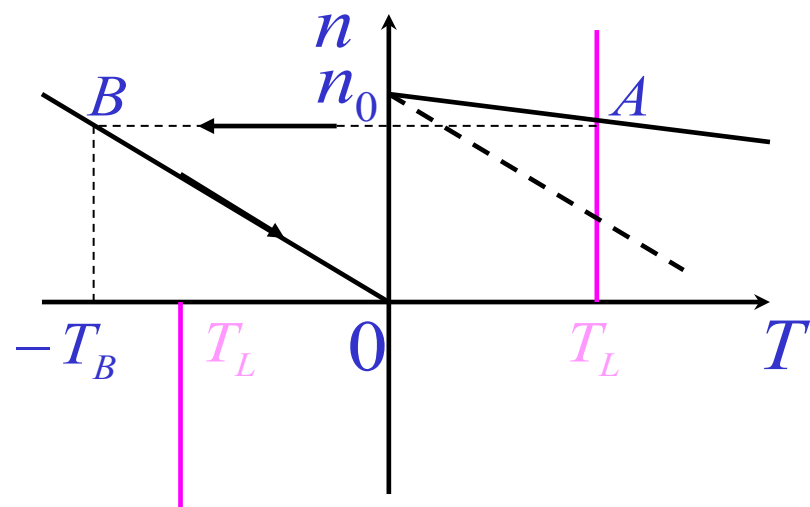
- 1) 电动运行：运行在一、三象限内时， $T$  与  $n$  同向。
- 2) 制动运行：运行在二、四象限内时， $T$  与  $n$  反向。

## 二、几种制动状态（过渡过程运行）

### 1、能耗制动



接线图



### 1) 正向电动——能耗制动

带反抗性恒转矩负载时

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi_N^2} T$$

$$\rightarrow n = -\frac{R_a + R_b}{C_e C_t \Phi_N^2} T$$

切换后  $n_0 = 0$  且平行于  $R_c = R_b$  的人为特性。

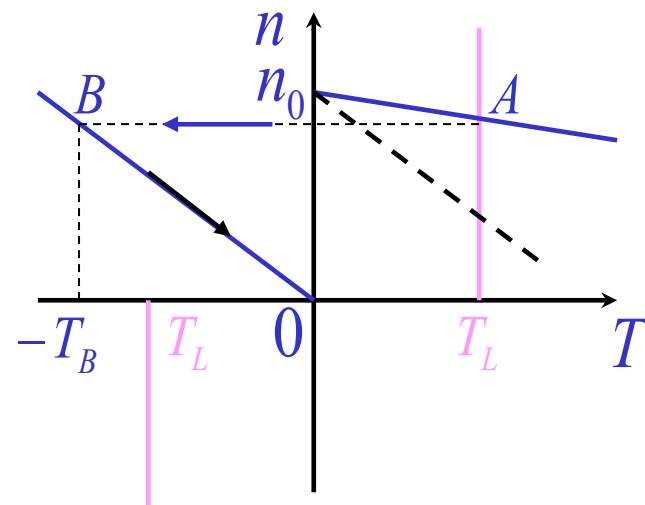
# 1、能耗制动

➤ B点电枢电流

$$I_{aB} = \frac{-E_a}{R_a + R_b}$$

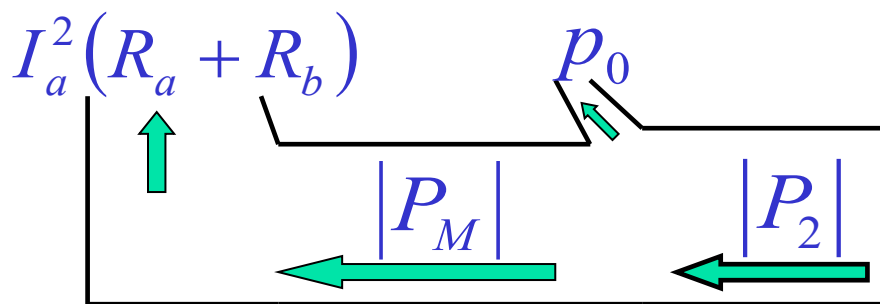
➤  $R_b$  的选择:

$$R_{b\min} = \frac{E_a}{I_{a\max}} - R_a$$



➤ 功率传递关系:

$$P_1 = 0, \quad p_{Cua} > 0, \quad P_M < 0, \quad p_0 > 0, \quad P_2 < 0$$



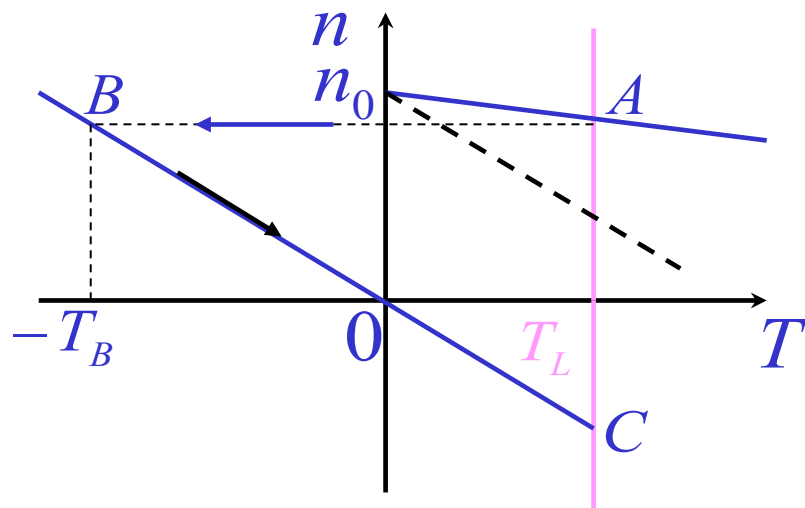
➤ 上述过程叫能耗制动过程



# 1、能耗制动

## 2) 正向电动——能耗制动

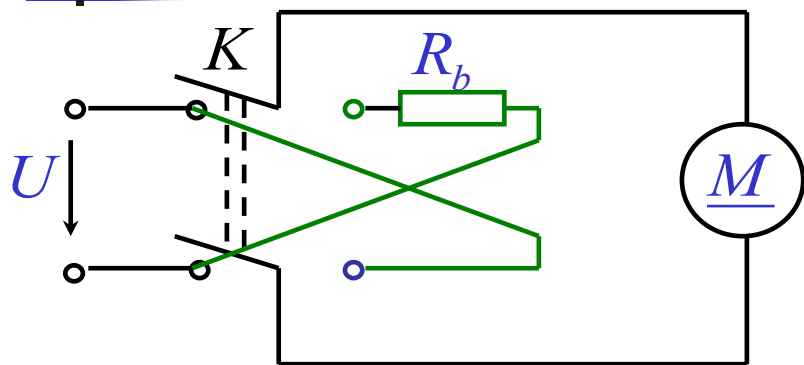
带位能性恒转矩负载时



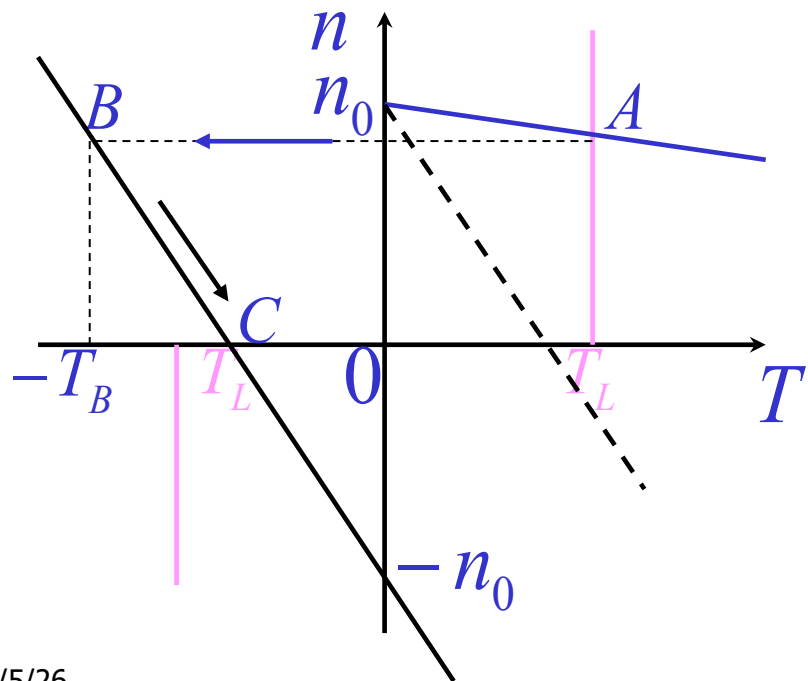
到0点后，由于负载的作用，电机反向转动

C点叫能耗制动运行点

## 2、反接制动



接线图

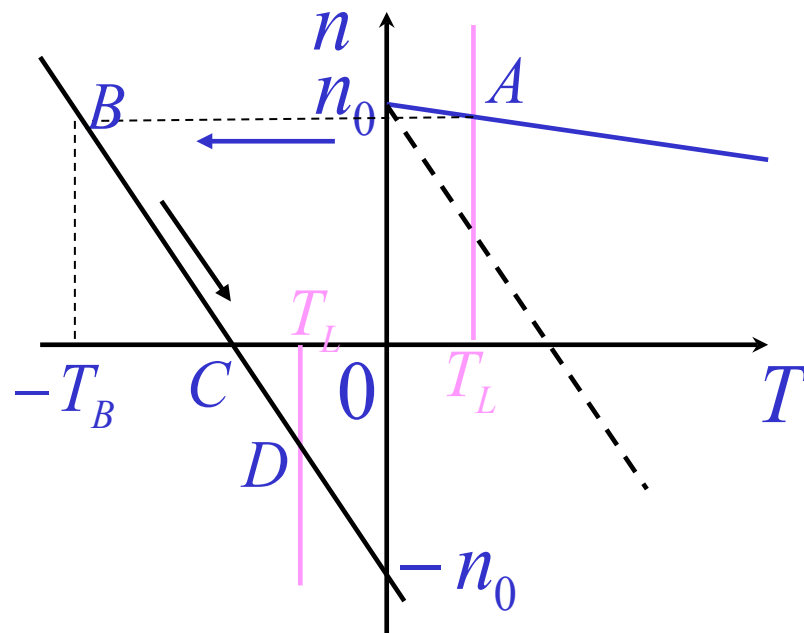


### 1) 正向电动——反接制动

帶反抗性恒转矩负载时

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi_N^2} T$$

$$\rightarrow n = -\frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_b}{C_e C_t \Phi_N^2} T$$

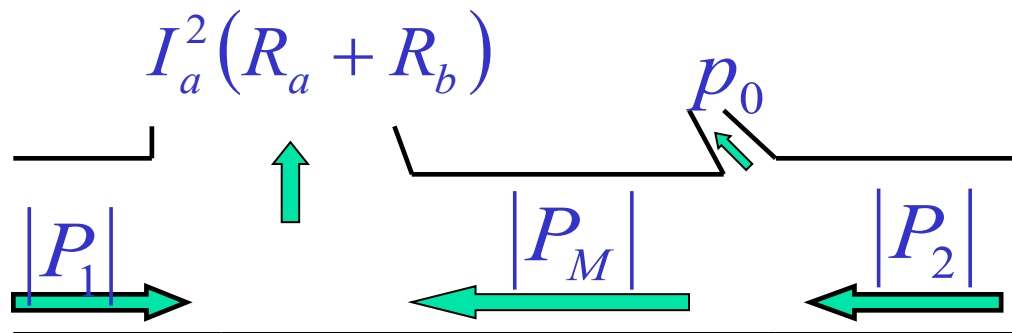


## 2、反接制动

### 2) 与能耗制动比较

- 制动时间短，制动快；
- 相同最大电流时， $R_b$ 几乎大一倍。

### 3) 功率传递关系



## 第六节 电力拖动系统的过渡过程

### ■ 过渡过程的定义：

当系统平衡破坏之后，系统从一个稳态向另一个稳态过渡的过程。

### ■ 研究的主要内容：

在过渡过程中转速、电磁转矩、电枢电流随时间的变化规律。

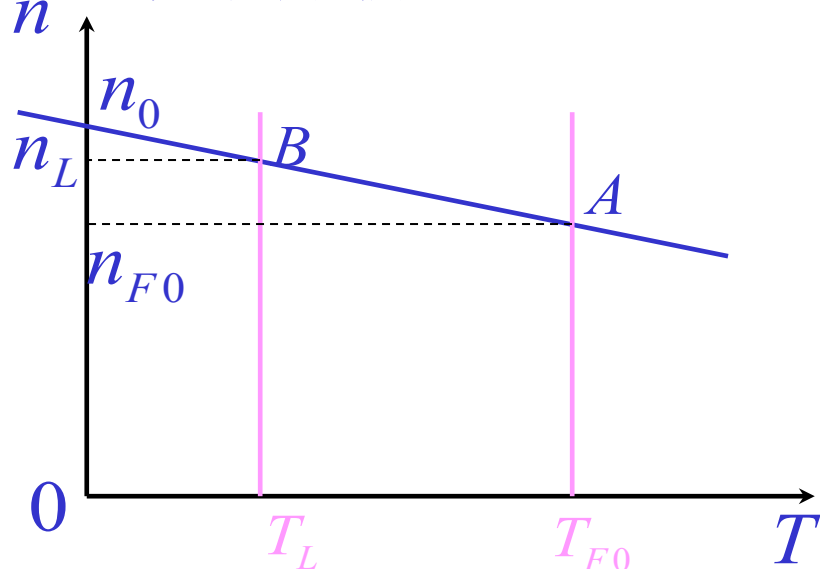
$$\text{即： } n = f(t), \quad T = f(t), \quad I_a = f(t)$$

### ● 前提：

- 1、只考虑机械过渡过程，忽略电磁过渡过程
- 2、过渡过程沿机械特性曲线向稳态点变化

# 一、数学分析及三要素法

## 1、数学分析



$$(1) \quad n = f(t)$$

$$T - T_L = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$$

$$n = n_0 - \beta T$$

$$\Rightarrow n = n_0 - \beta \left( T_L + \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \right)$$

$$\Rightarrow n = n_0 - \beta T_L - \beta \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$$

$$\Rightarrow n = n_L - T_M \frac{dn}{dt}$$

$$T_M = \beta \frac{GD^2}{375}$$

$$= \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{R_a + R_c}{C_e C_t \Phi^2}$$

$T_M$  —— 叫电力拖动系统  
机电时间常数

# 1、数学分析

由：  $n = n_L - T_M \frac{dn}{dt}$

得：  $\frac{dn}{n - n_L} = -\frac{dt}{T_M}$

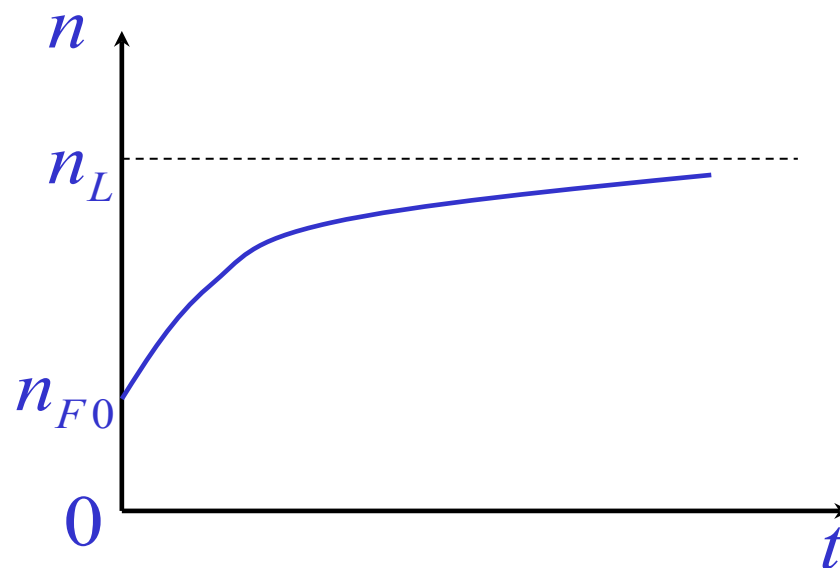
分离变量法得：

$$n - n_L = Ke^{-\frac{t}{T_M}}$$

代入初始条件：

$t = 0$  时  $n = n_{F0}$

$$n = n_L + (n_{F0} - n_L)e^{-\frac{t}{T_M}}$$



# 1、数学分析

$$(2) \quad T = f(t)$$

$$n = n_0 - \beta T$$

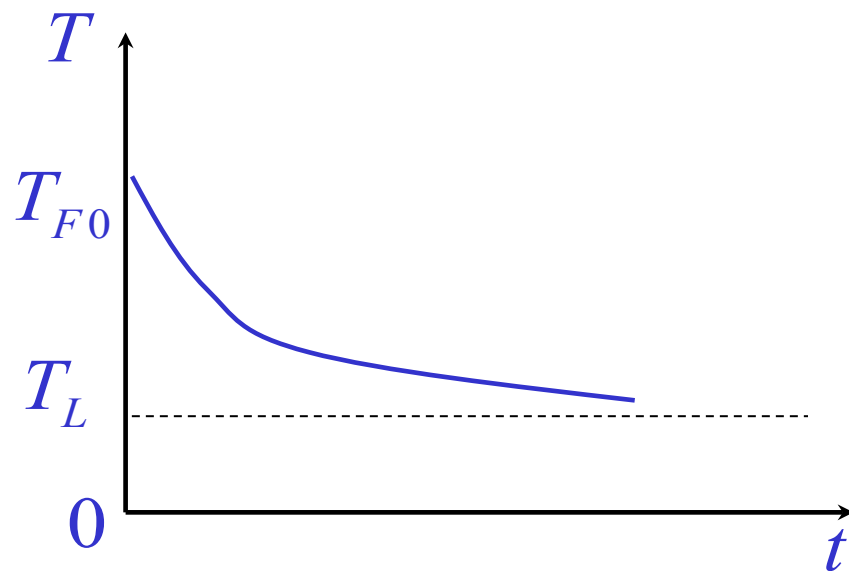
$$n_L = n_0 - \beta T_L$$

$$n_{F0} = n_0 - \beta T_{F0}$$



$$\text{代入 } n = n_L + (n_{F0} - n_L)e^{-\frac{t}{T_M}}$$

$$\text{得到 } T = T_L + (T_{F0} - T_L)e^{-\frac{t}{T_M}}$$



# 1、数学分析

$$(3) \quad I_a = f(t)$$

$$T = C_t \Phi I_a$$

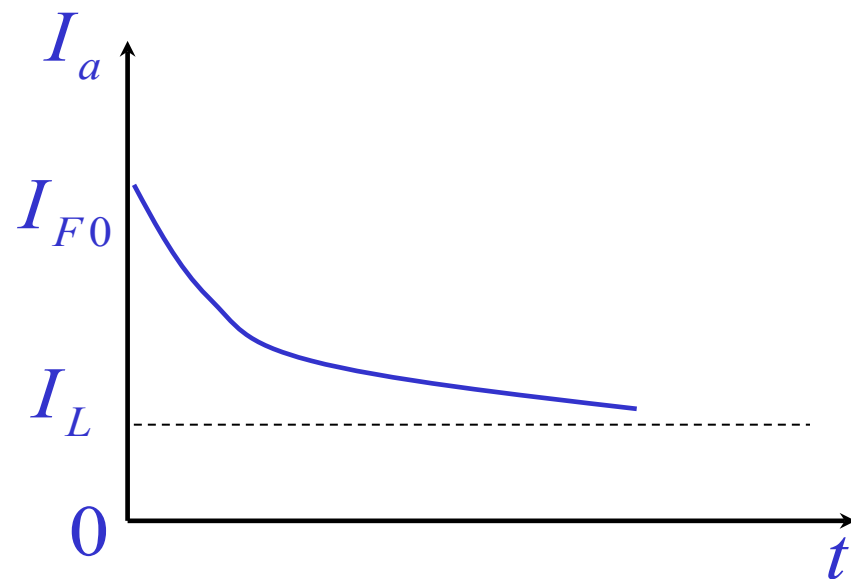
$$T_L = C_t \Phi I_L$$

$$T_{F0} = C_t \Phi I_{F0}$$



$$\text{代入 } T = T_L + (T_{F0} - T_L)e^{-\frac{t}{T_M}}$$

$$\text{得到 } I_a = I_L + (I_{F0} - I_L)e^{-\frac{t}{T_M}}$$



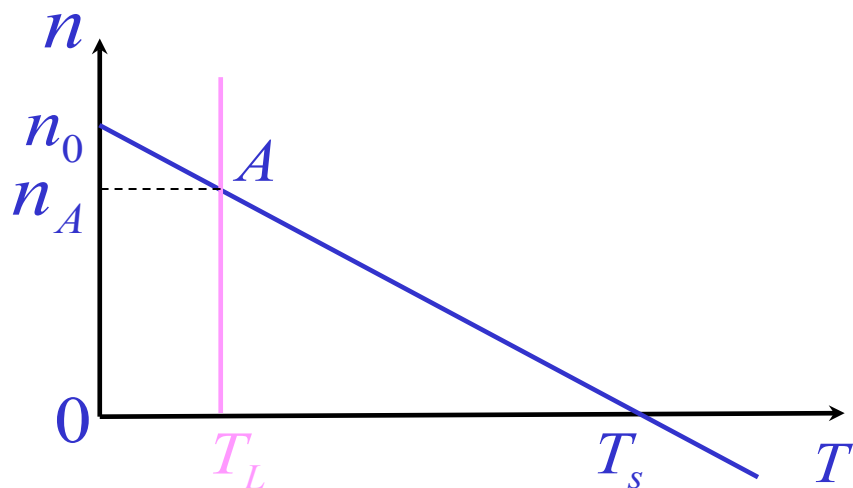


## 2、三要素法

$$\left. \begin{aligned} n &= n_L + (n_{F0} - n_L)e^{-\frac{t}{T_M}} \\ T &= T_L + (T_{F0} - T_L)e^{-\frac{t}{T_M}} \\ I_a &= I_L + (I_{F0} - I_L)e^{-\frac{t}{T_M}} \end{aligned} \right\}$$

三要素法——由上面三个方程可知，要想得到电力拖动系统的过渡过程方程，只需要确定三个关键的数量：起始值、稳态值、机电时间常数。

### 3、简单分析直接起动的过渡过程



$$n_{F0} = 0, \quad n_L = n_A,$$

$$T_M = \frac{R_a}{C_e C_t \Phi^2} \cdot \frac{GD^2}{375}$$

$$n = n_A - n_A e^{-\frac{t}{T_M}}$$

$$T = T_L + (T_s - T_L) e^{-\frac{t}{T_M}}$$

$$I_a = I_L + (I_s - I_L) e^{-\frac{t}{T_M}}$$



## 二、过渡过程时间的计算

### 1、整个过渡过程的时间

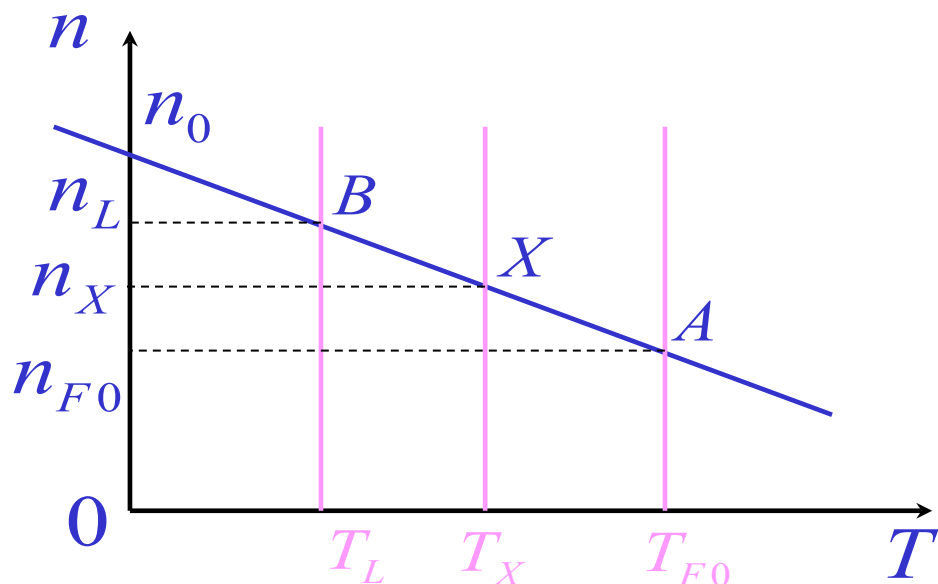
理论上，过渡过程达到稳定点的时间为无穷大

即： $t \rightarrow \infty$

工程上， $t = (3 \sim 4)T_M$  时，各量均达到稳态值的 95-98%，可以认为过渡过程达到稳定点。

一般取： $t = 4T_M$

## 2、部分过渡过程时间的计算



同理：  $t_X = T_M \ln \frac{T_{F0} - T_L}{T_X - T_L}$

$$t_X = T_M \ln \frac{I_{F0} - I_L}{I_X - I_L}$$

设：

X为过渡过程中的任意一点

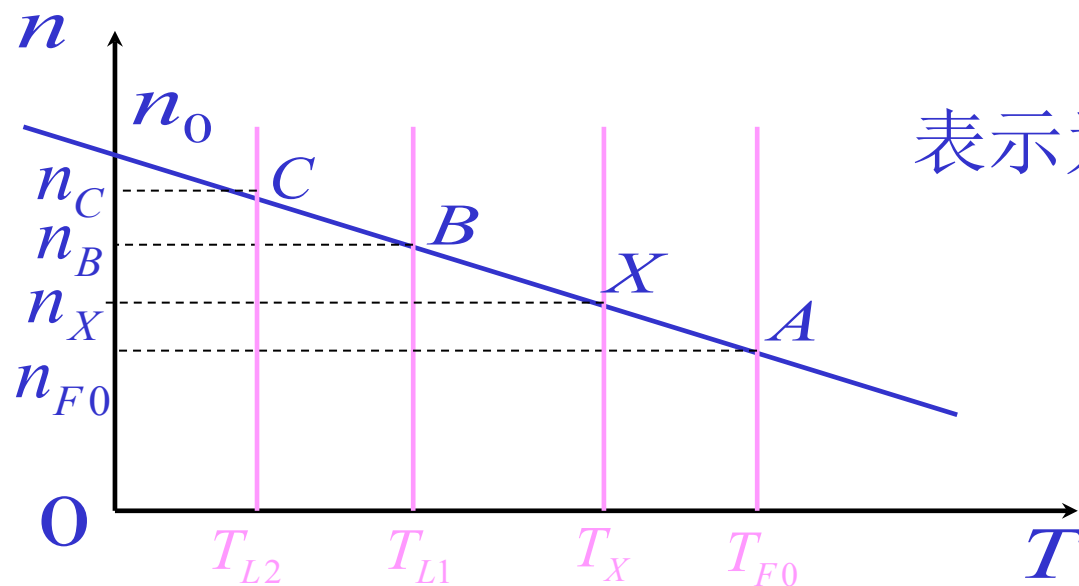
$A \rightarrow X$ 的时间为  $t_X$

由  $n = n_L + (n_{F0} - n_L)e^{-\frac{t}{T_M}}$

得到  $n_X = n_L + (n_{F0} - n_L)e^{-\frac{t_X}{T_M}}$

$$\Rightarrow t_X = T_M \ln \frac{n_{F0} - n_L}{n_X - n_L}$$

### 3、虚稳态点

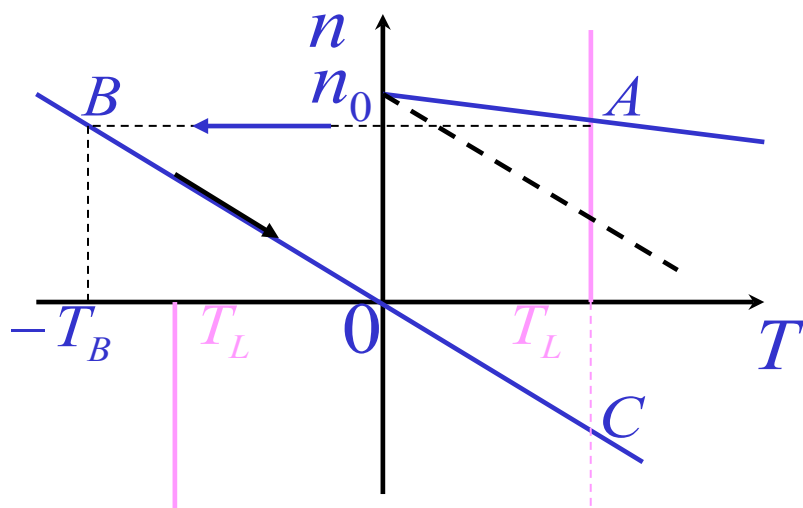


表示为:  $A \rightarrow X(\rightarrow B) \rightarrow C$

$$n = \begin{cases} n_B + (n_{F0} - n_B)e^{-\frac{t}{T_M}} & (n_{F0} \leq n \leq n_X) \\ n_C + (n_X - n_C)e^{-\frac{t-t_X}{T_M}} & (n_X \leq n \leq n_C) \end{cases}$$

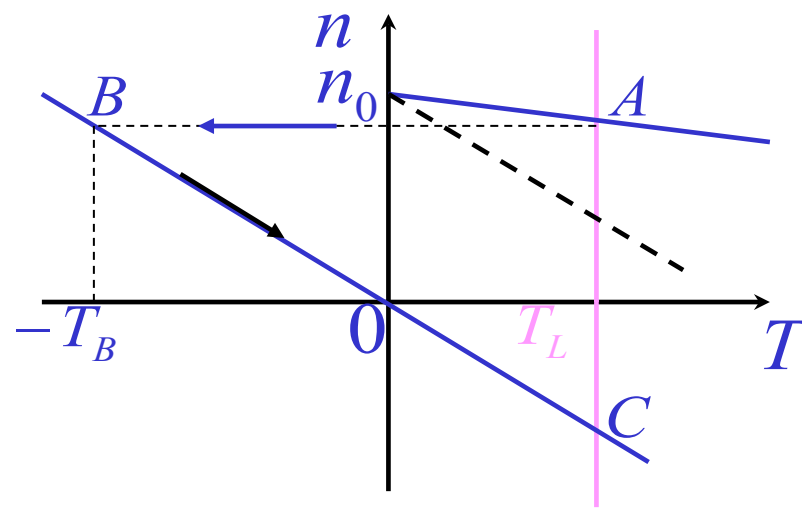
### 三、一些典型过渡过程的三要素

#### 1、能耗制动过渡过程



带反抗性恒转矩负载

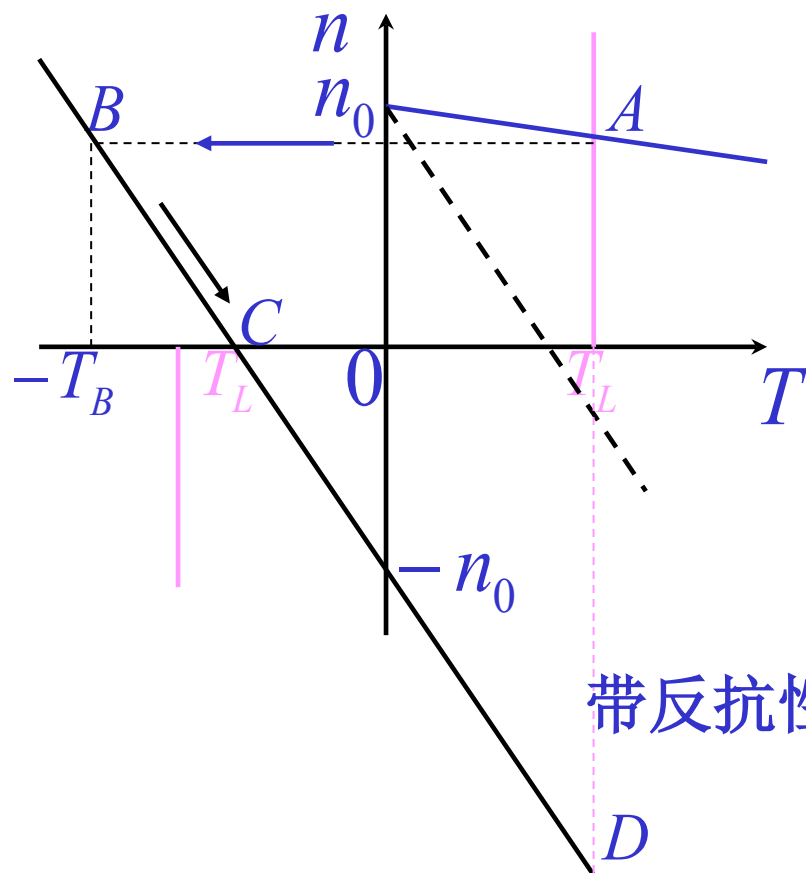
$$B \rightarrow O(\rightarrow C)$$



带位能性恒转矩负载

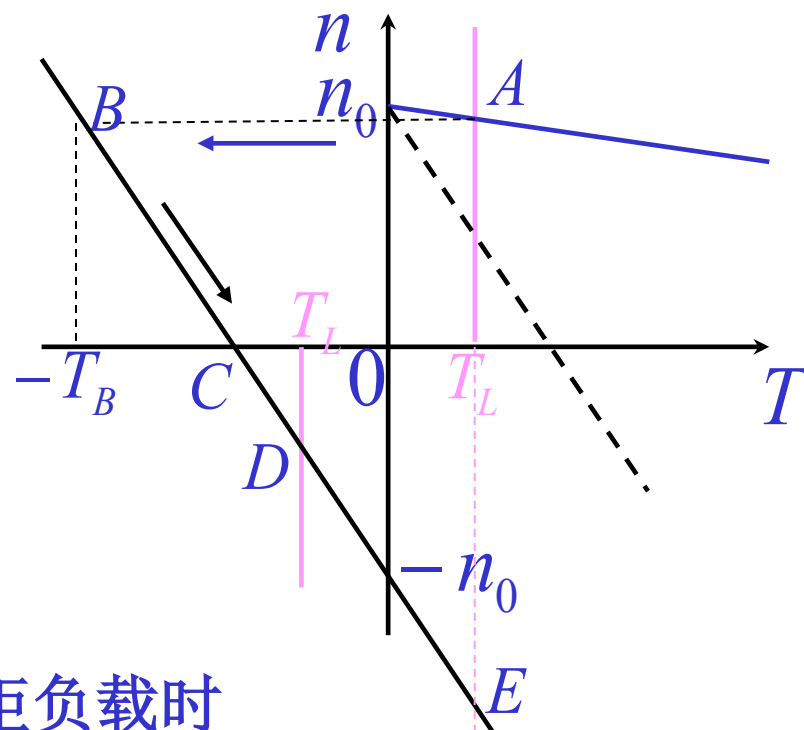
$$B \rightarrow O \rightarrow C$$

## 2、反接制动过渡过程



$B \rightarrow C(\rightarrow D)$

带反抗性恒转矩负载时



$B \rightarrow C(\rightarrow E) \rightarrow D$

## 例题:

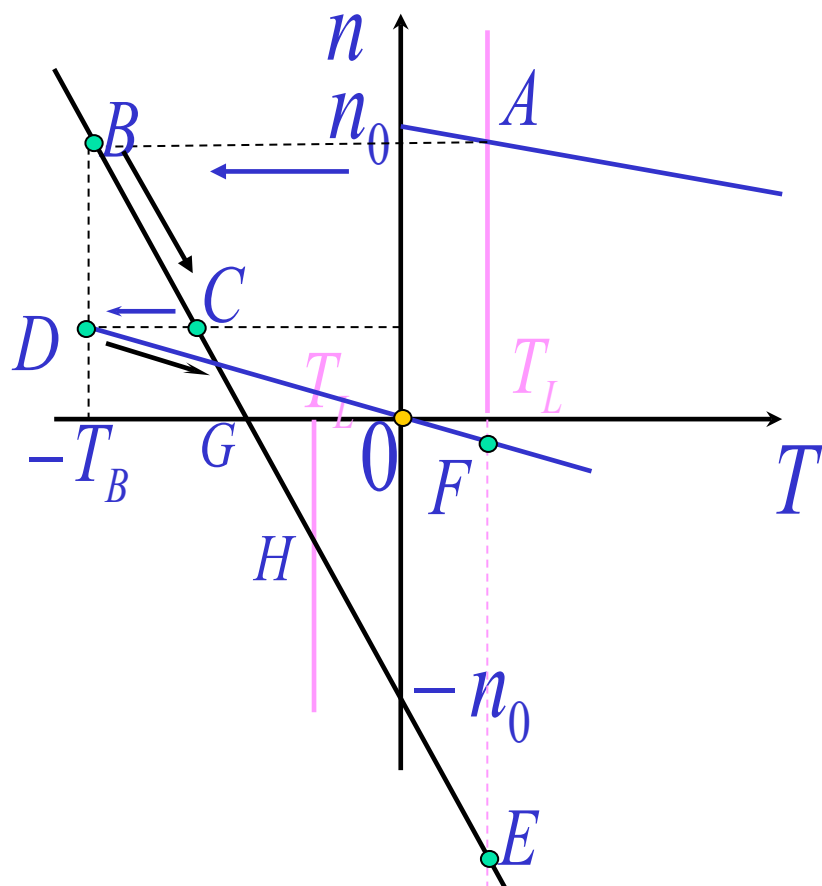
他励直流电动机数据为  $P_N = 15kW$ ,  $U_N = 220V$ ,  
 $I_N = 80A$ ,  $n_N = 1000 r/min$ ,  $R_a = 0.2\Omega$ ,  $GD_d^2$   
 $= 20N \cdot m^2$ , 拖动反抗性恒转矩负载,  $T_L = 0.8$   
 $T_N$ , 运行在固有机械特性上。

- 1、采用反接制动停车, 制动起始转矩为  $2T_N$ , 求电枢回路应串入的电阻值;
- 2、当反接制动使转速下降到  $0.3n_N$  时, 切换成能耗制动, 制动起始转矩仍为  $2T_N$ , 求电枢回路应串入的电阻值;
- 3、若系统总飞轮矩  $GD^2 = 1.25GD_d^2$ , 求制动停车所用时间;
- 4、定性画出过渡过程中  $n=f(t)$  曲线。



解：

## 过渡过程的机械特性图



反接制动：

$B \rightarrow C(\rightarrow E) \rightarrow G(\rightarrow E) \rightarrow H$

能耗制动：

$D \rightarrow O(\rightarrow F)$

1) 反接制动电阻的计算

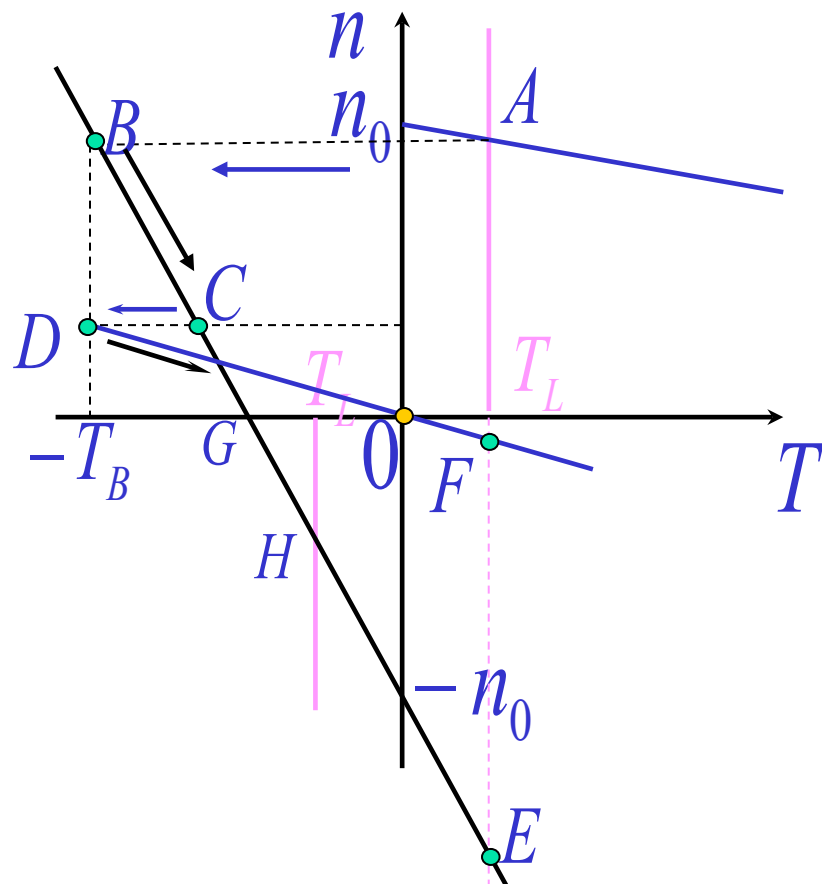
$$I_A = I_L = \frac{0.8T_N}{T_N} I_N = 0.8I_N$$

$$E_A = U_N - I_A R_a = 207.2(V)$$

$$I_B = \frac{-2T_N}{T_N} I_N = -160A$$

$$R_{b1} = \frac{-U_N - E_B}{I_B} - R_a = 2.47\Omega$$

# 过渡过程的机械特性图



## 2) 能耗制动电阻的计算

$$\begin{aligned} E_D &= E_C = C_e \Phi \cdot 0.3 n_N \\ &= 0.3 E_{aN} = 0.3 (U_N - I_N R_a) \\ &= 61.2 V \end{aligned}$$

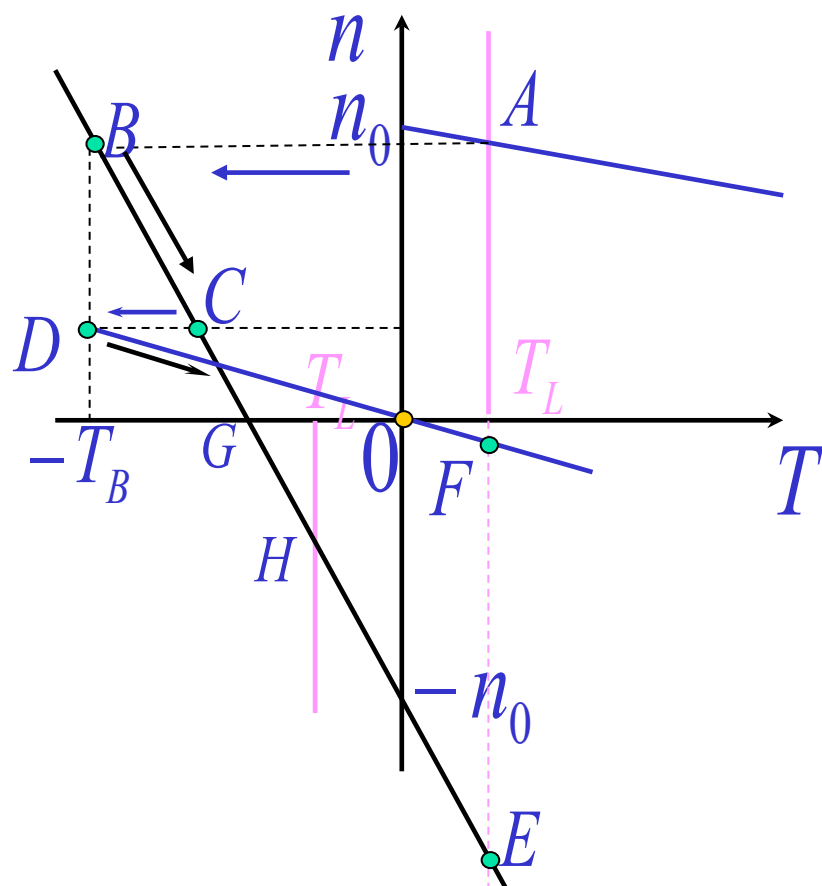
$$R_{b2} = \frac{-E_D}{-2I_N} - R_a = 0.183 \Omega$$

## 3) 制动时间的计算

$$C_e \Phi_N = \frac{E_{aN}}{n_N} = 0.204$$

$$\begin{aligned} T_{M1} &= \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{R_a + R_{b1}}{9.55 (C_e \Phi_N)^2} \\ &= 0.448 s \end{aligned}$$

# 过渡过程的机械特性图



$$I_B = -2I_N = -160A$$

$$I_C = \frac{-U_N - E_C}{R_a + R_{b1}} = -105.3A$$

$$I_E = I_L = 64A$$

$$t_{BC} = T_{M1} \cdot \ln \frac{I_B - I_E}{I_C - I_E} = 0.13s$$

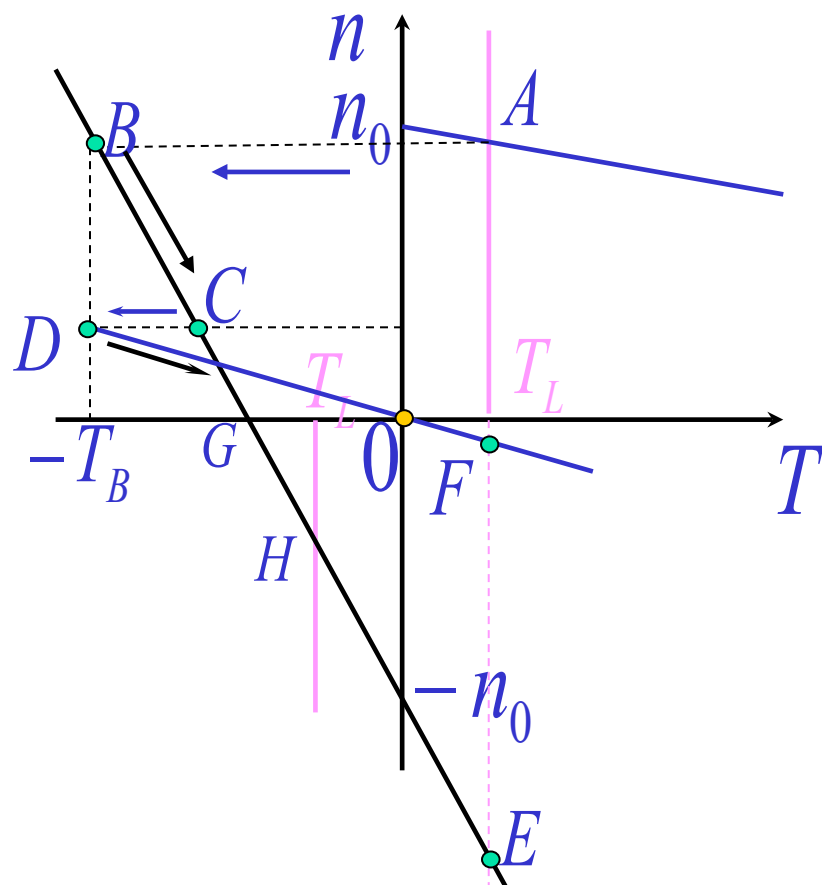
$$T_{M2} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{R_a + R_{b2}}{9.55(C_e \Phi_N)^2} = 0.064s$$

$$t_{DO} = T_{M2} \ln \frac{I_D - I_F}{I_O - I_F} = 0.08s$$

$$t = t_{BC} + t_{DO} = 0.21s$$

# 过渡过程的机械特性图

## 过渡过程的机械特性图



## 4) 转速过渡过程草图

