

# 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



# 回顾

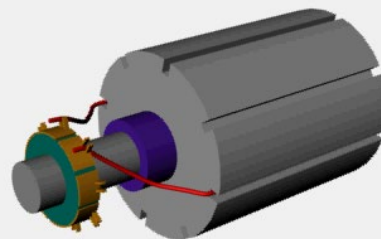
---

# 电 磁 力

## 第四节 直流电机的电枢绕组



直流电机结构



电枢绕组结构

## 第四节 直流电机的电枢绕组

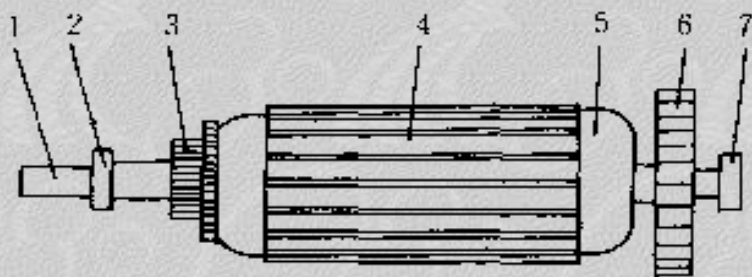
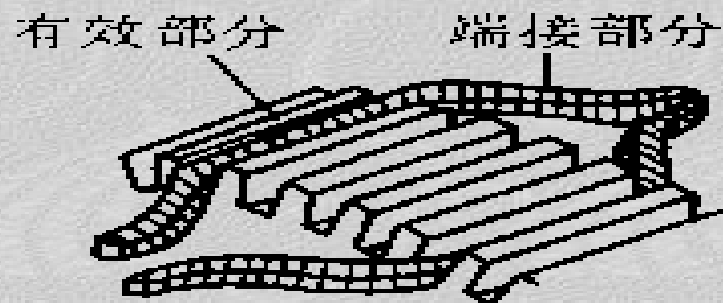


图 3.7 直流电机电枢

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)

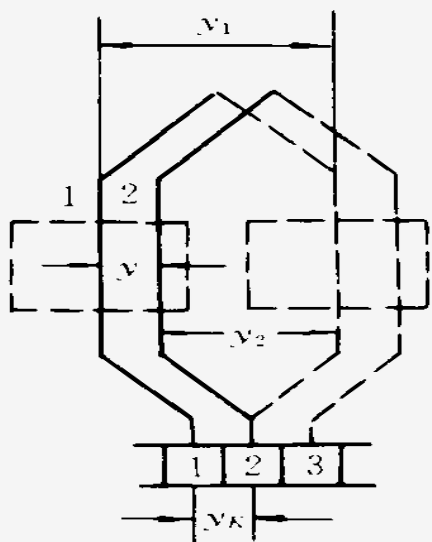


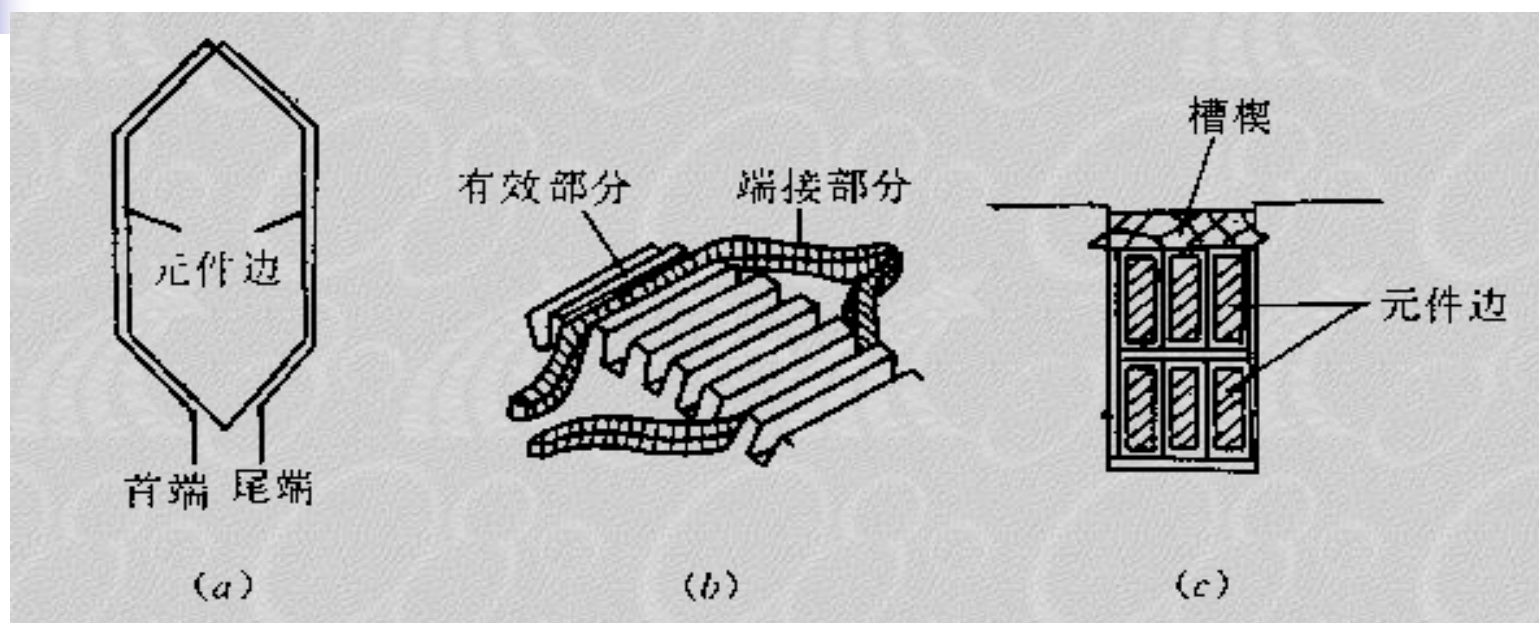
图 3.14 单叠绕组的节距

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  $Z = S = K$

# 单叠绕组

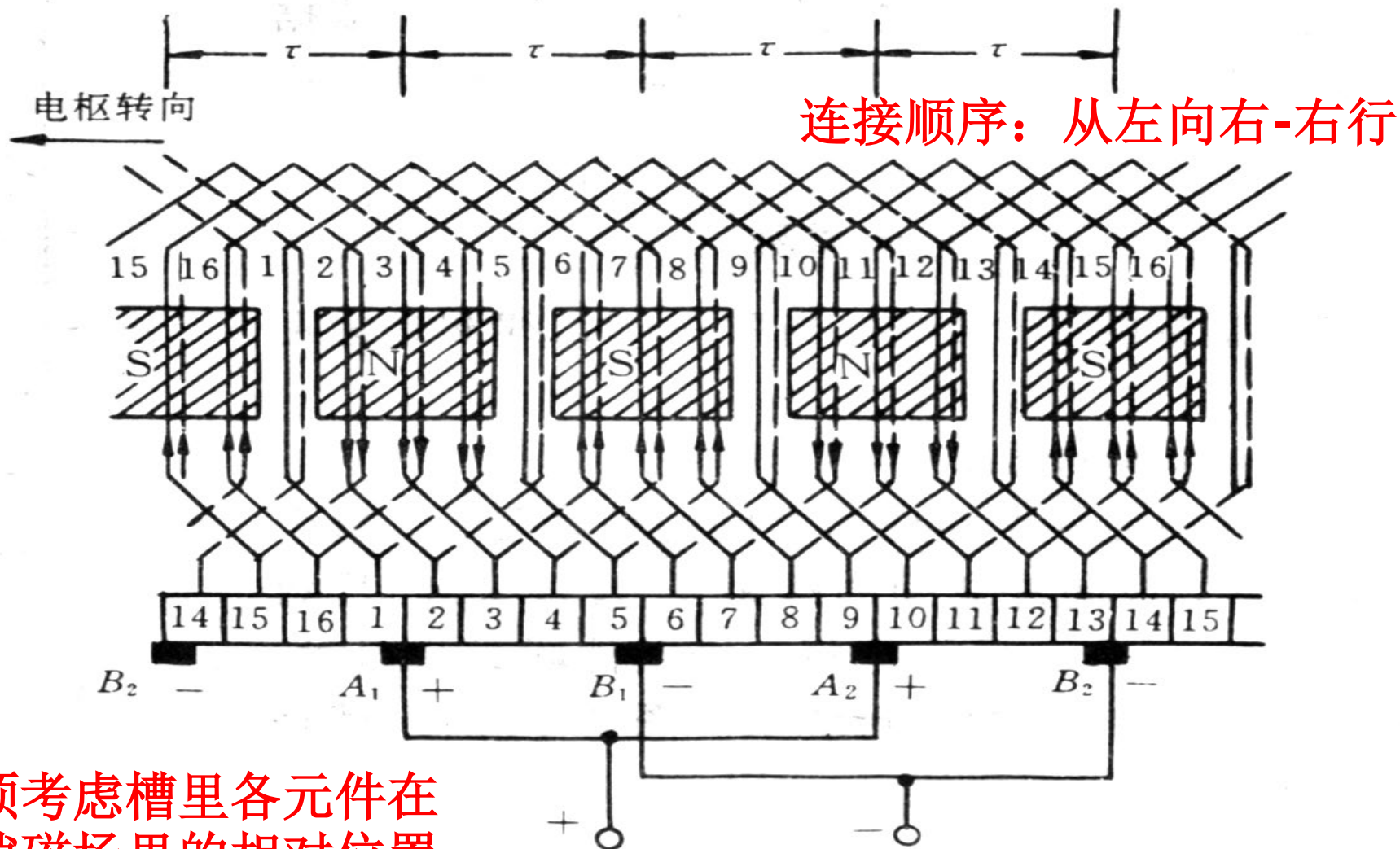


图 3.15 单叠绕组展开图

# 单叠绕组

## 3、单叠绕组元件联接次序

1-5-2-6-3-7—.....—1

## 4、单叠绕组的并联支路图

单叠绕组的并联支路对数 $a$ 等于极对数 $p$

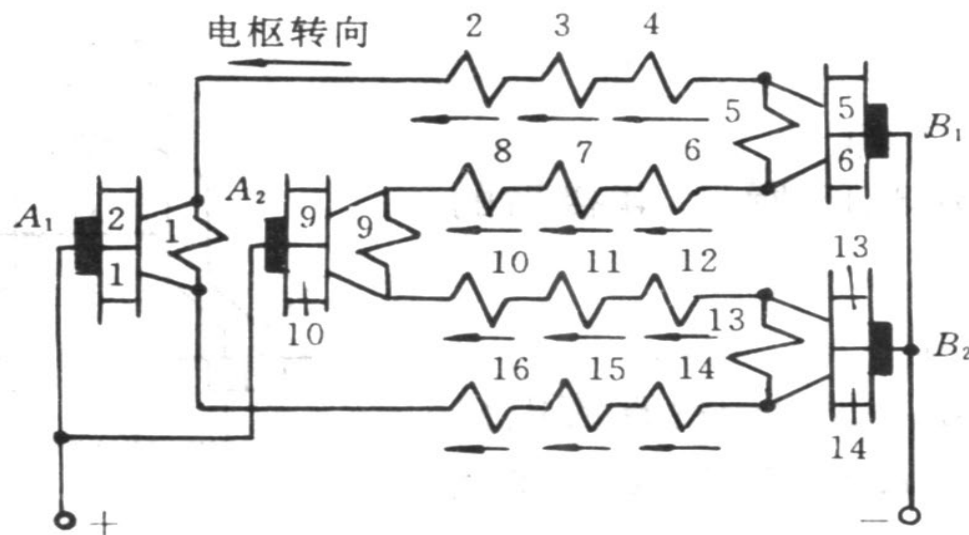


图 3.17 单叠绕组的并联支路图



# 单叠绕组

---

特点：

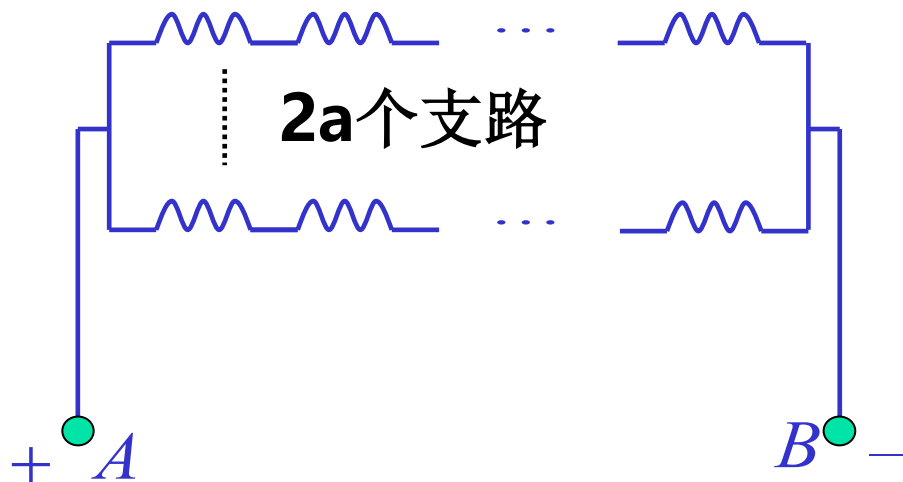
- (1) 位于同一个磁极下的各元件串联起来组成了一个支路，即支路对数等于极对数  $a=p$
- (2) 当元件的几何形状对称时，电刷放在主磁极中心线时，正负电刷间感应电动势最大，短路电动势最小
- (3) 电刷杆数等于极数



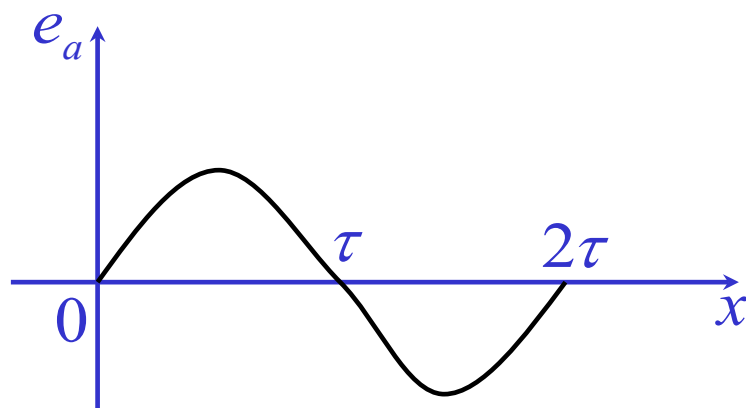
## 第五节 电枢电势、电磁转矩、电磁功率

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

$$E_a = C_e \Phi n$$

## 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  $N \cdot m$

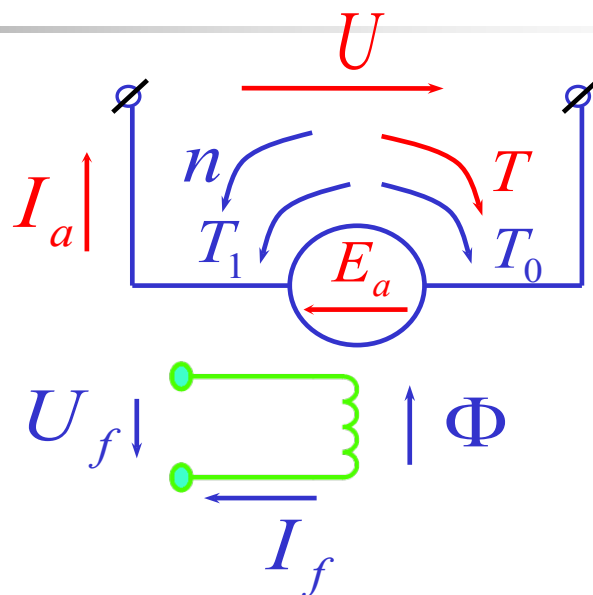
$T$  —— 电磁转矩  $N \cdot m$

$n$  —— 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：

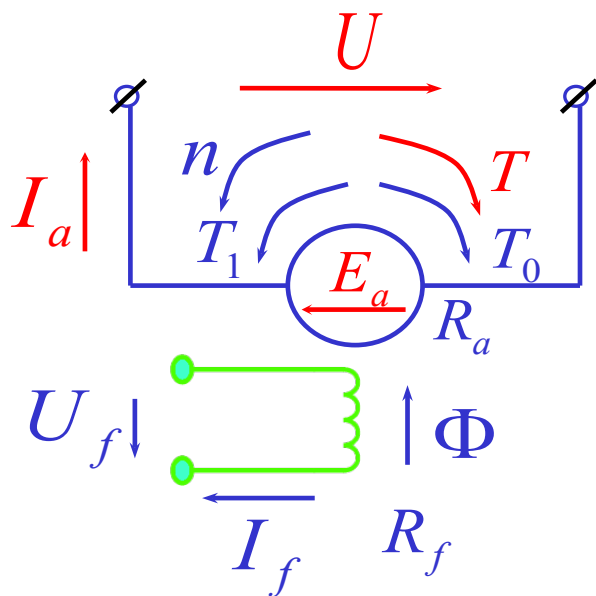
$U_f$  —— 励磁电压  $V$

$I_f$  —— 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： $E_a = U + I_a R_a$

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

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

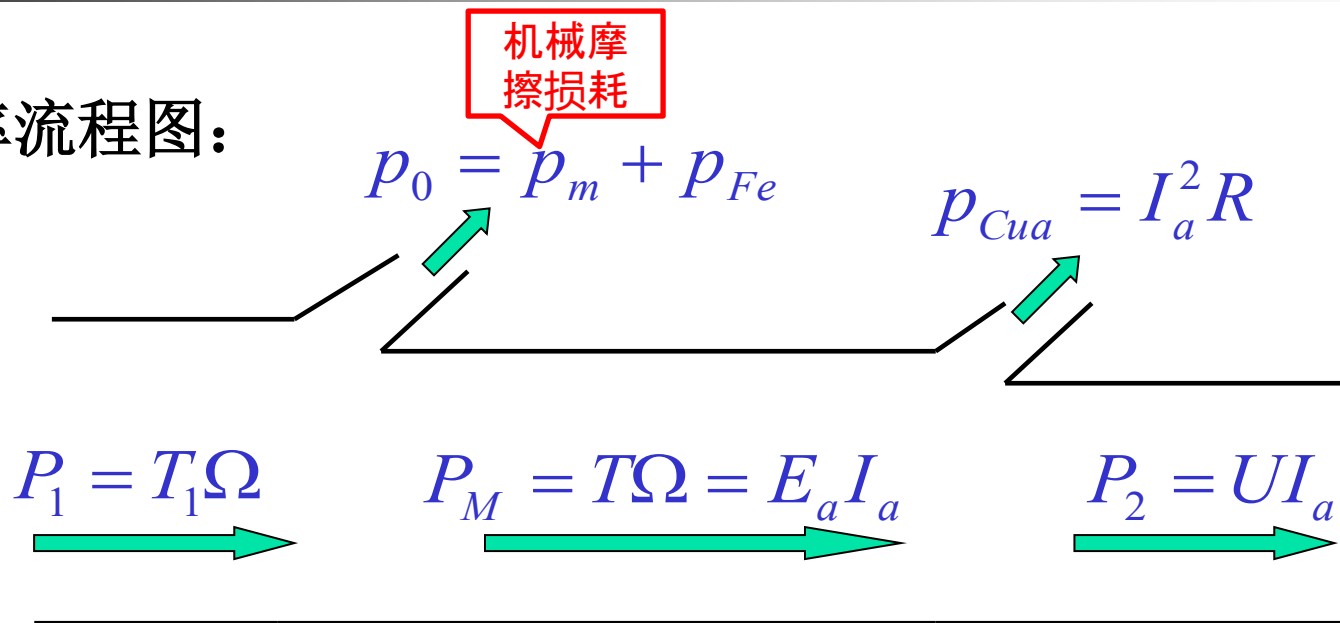
$P_M$ ——电形式的电磁功率

$P_2$ ——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：

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

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%

### 三、发电机稳态运行时的功率传递关系

例题：无补偿绕组并励直流发电机， $P_N = 15kW$   $U_N = 230V$   
 $n_N = 1450 r/min$   $R_a = 0.3\Omega$   $R_f = 115\Omega$   $p_m + p_{Fe} = 700W$

求：  $p_{Cua} = ?$   $p_{Cuf} = ?$   $P_M = ?$   $\sum p = ?$   $P_1 = ?$   $\eta = ?$

解： 
$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{15 \times 10^3}{230} = 65.2(A)$$

$$I_f = \frac{U_f}{R_f} = \frac{U_N}{R_f} = \frac{230}{115} = 2(A) \quad I_a = I_N + I_f = 67.2(A)$$

$$p_{Cua} = I_a^2 R_a = 1355(W) \quad p_{Cuf} = I_f^2 R_f = 460(W)$$

$$P_M = P_2 + p_{Cua} + p_{Cuf} = 15000 + 1355 + 460 = 16815(W)$$

$$\sum p = p_{Cua} + p_{Cuf} + p_m + p_{Fe} + p_s = 2665(W)$$

$$P_1 = P_2 + \sum p = 17665(W) \quad \eta = \frac{P_1}{P_2} = \frac{17665}{17815} = 99.1\%$$

杂散损耗

无补偿：额定功率1%

4.9%



## 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  $N \cdot m$

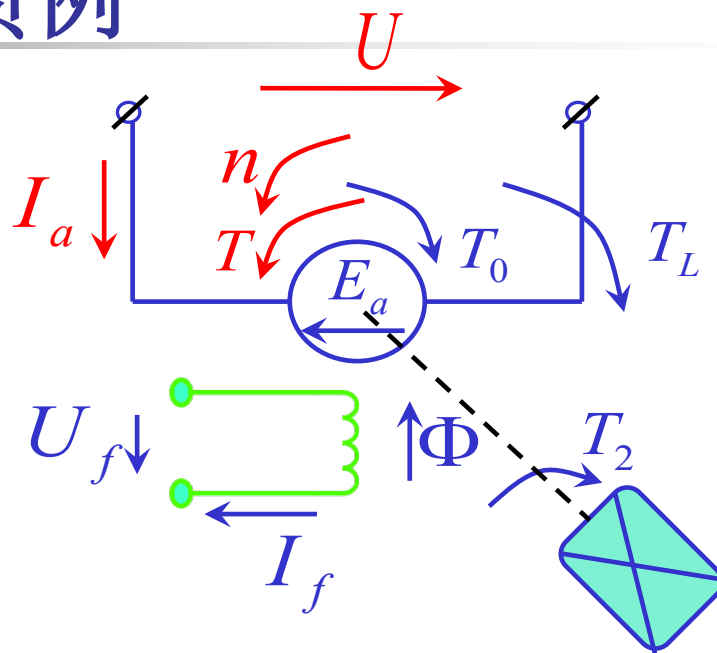
$n$  —— 转速  $r/min$

$E_a$  —— 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：

$$T = C_t \Phi I_a$$

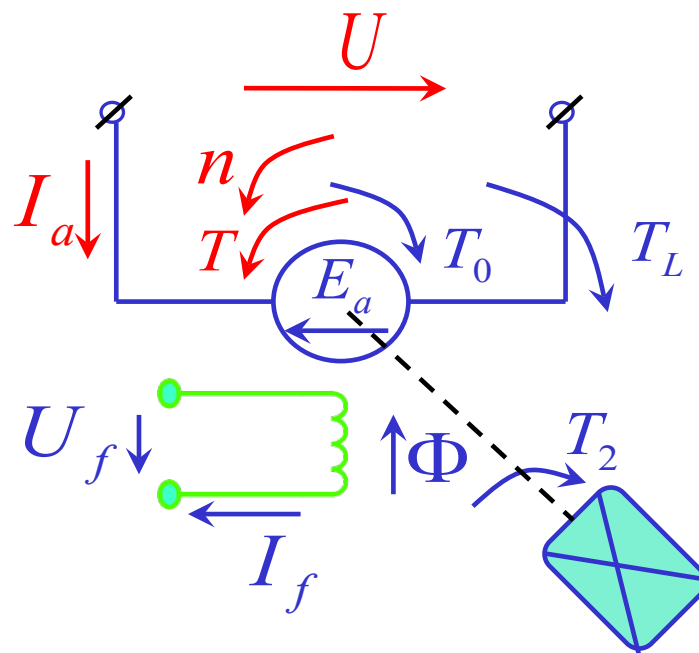
4、转动平衡方程式：

$$T = T_2 + T_0 = T_L$$

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：

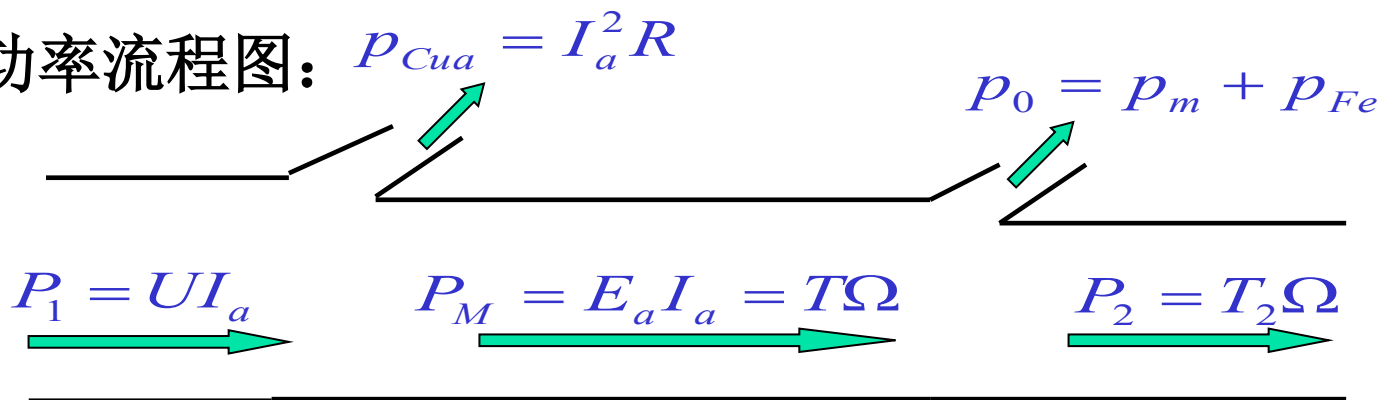
$$T = T_2 + T_0$$
$$\implies T\Omega = T_2\Omega + T_0\Omega$$
$$\implies P_M = P_2 + p_0$$

$P_2$  ——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：

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

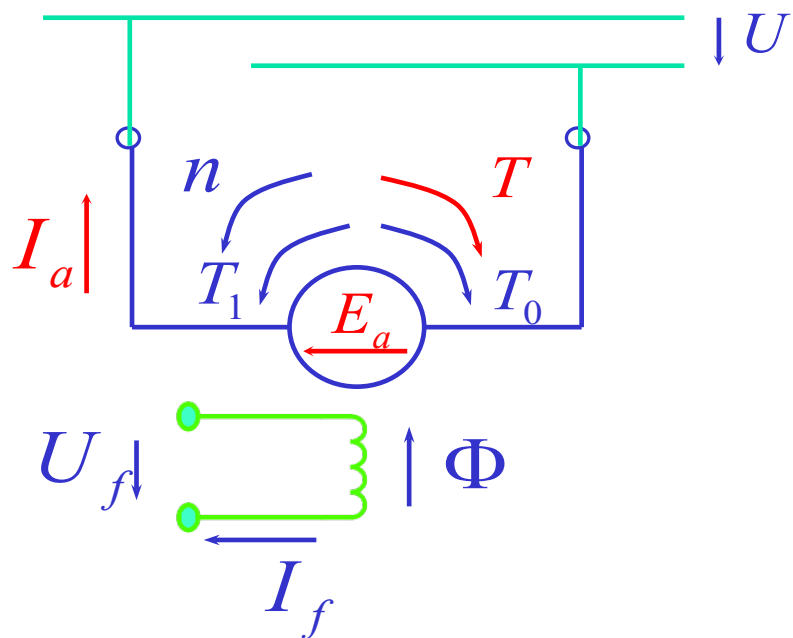
励磁损耗  
他励没有

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%

# 直流电机的可逆原理—以他励电动机为例

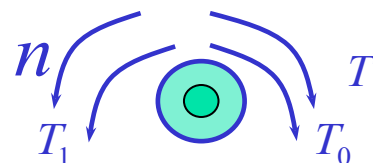


将他励直流电机与直流电网并联运行

## 1、发电运行时（稳态）

$$P_1 = P_M + p_0$$

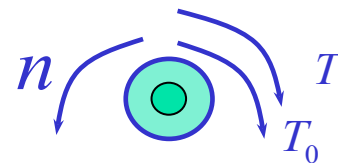
$$T_1 = T + T_0$$



## 2、改变条件 $P_1 = 0$

1) 开始瞬间:  $n$   $E_a$   $I_a$  不突变

$$T_1 - T - T_0 = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$$



$$T_1 = 0 \Rightarrow \frac{dn}{dt} < 0 \Rightarrow n \downarrow$$

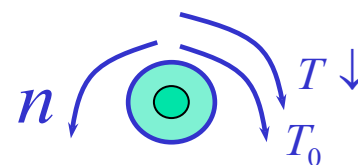
# 直流电机的可逆原理—以他励电动机为例

## 2) 由于转速下降

$$E_a = C_e \Phi n_{\downarrow} \Rightarrow E_a \downarrow$$

$$E_a \downarrow = U + I_a R_a \Rightarrow I_a \downarrow$$

$$T = C_t \Phi I_{a\downarrow} \Rightarrow T \downarrow$$



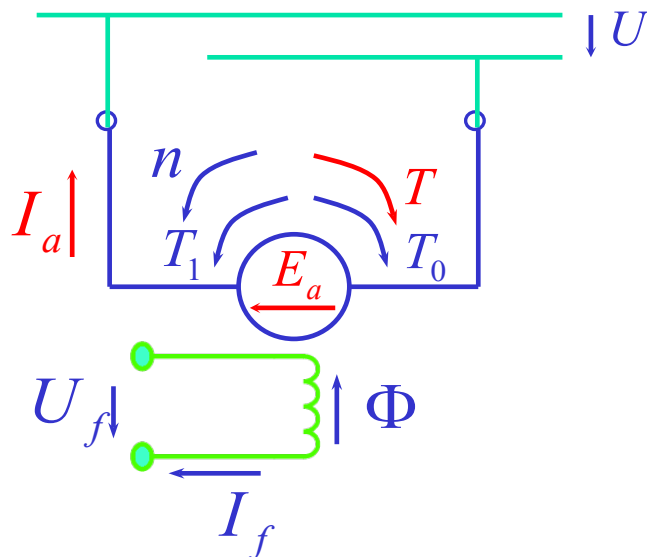
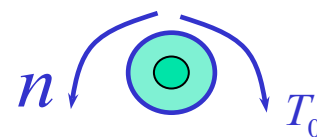
## 3) 当 $n = n_0$ 时

$$E_a = C_e \Phi n_0 = U$$

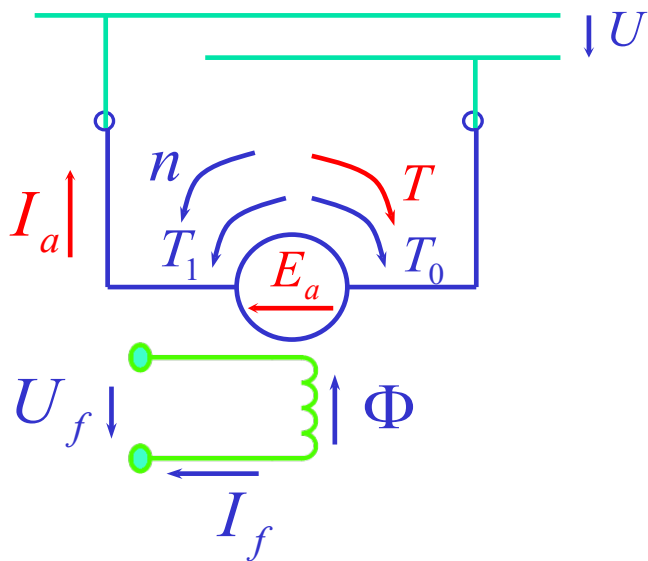
$$E_a = U + I_a R_a \Rightarrow I_a = 0$$

$$T = C_t \Phi I_a = 0$$

$$P_2 = UI_a = 0 \quad \text{不再向电网提供电能}$$



将他励直流电机  
与直流电网并联  
运行



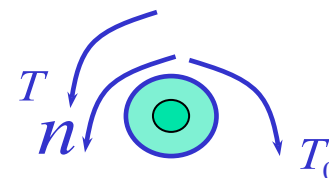
5) 当  $n < n_0$  时

$$E_a = C_e \Phi n < C_e \Phi n_0 = U$$

$$E_a = U + I_a R_a \Rightarrow I_a < 0$$

$$P_1 = U I_a < 0$$

$$T = C_t \Phi I_a < 0$$



4) 但  $T_0$  存在

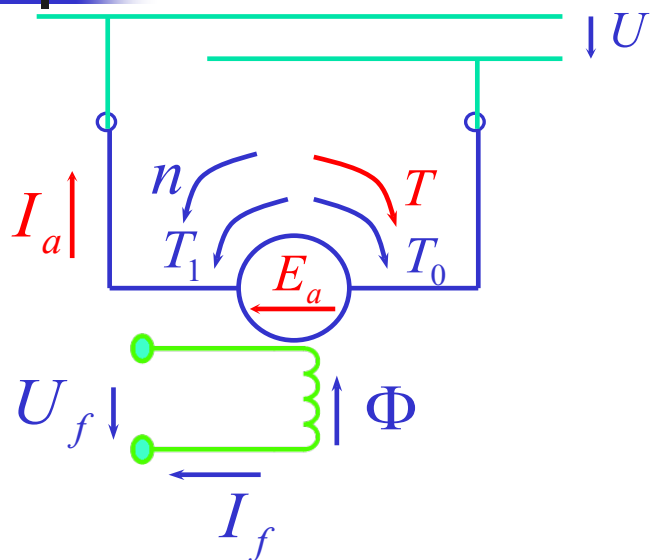
$$-T_0 = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$$

$$\frac{dn}{dt} < 0 \Rightarrow n \downarrow$$

6) 当  $T < T_0$  时

$$T - T_0 = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} < 0$$

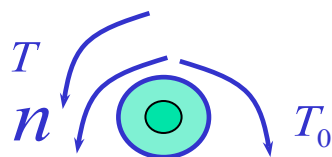
继续减速



7) 当  $T = T_0$  时

$$T - T_0 = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = 0$$

$$\frac{dn}{dt} = 0$$



达到新的稳态

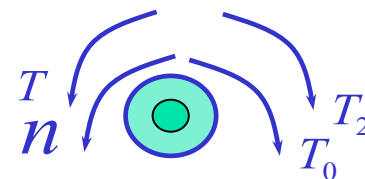
8) 增加负载  $T_2$  瞬间

$$T - T_0 - T_2 = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} < 0$$

$$\Rightarrow n \downarrow$$

$$T_0 + T_2 = T_L \uparrow$$

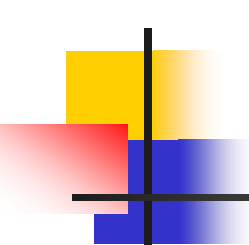
$$\Rightarrow I_a \uparrow \Rightarrow T \uparrow$$



9) 当  $T - T_L = T - (T_0 + T_2) = 0$  时

$$T - T_L = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = 0$$

达到又一个新的稳态



**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  $\Phi = 0.011Wb$ ， $p_m = 204W$ ， $p_{Fe} = 362W$ ，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

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

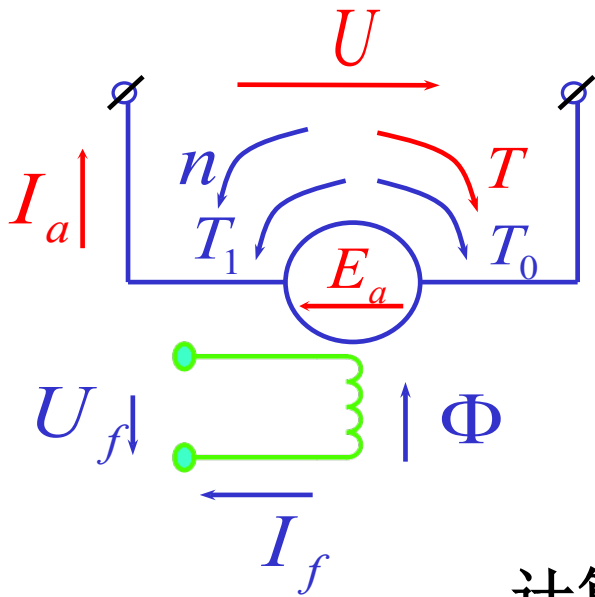
$$UI_a < 0$$

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：

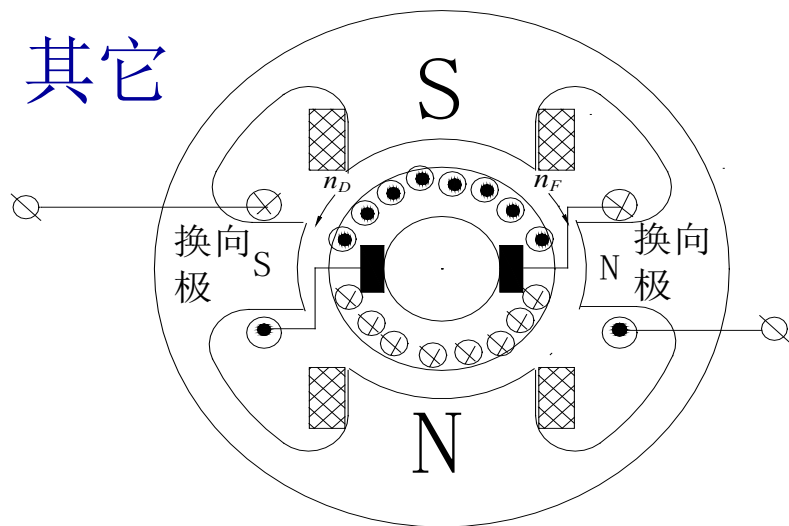
装置换向磁极

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。



## 第三章小结

---

- ❖1、用途和基本原理：重点工作原理
- ❖2、结构和铭牌数据：注意额定功率的含义
- ❖3、电机磁场：磁路、励磁方式、电枢反应
- ❖4、电枢绕组：单叠绕组
- ❖5、电枢电势、电磁转矩和电磁功率
- ❖6、直流发电机：基本方程、功率关系
- ❖7、直流电动机：基本方程、功率关系
- ❖8、直流电机的换向



# 作业

---

第**67**页，习题**3.1, 3.3, 3.4**