

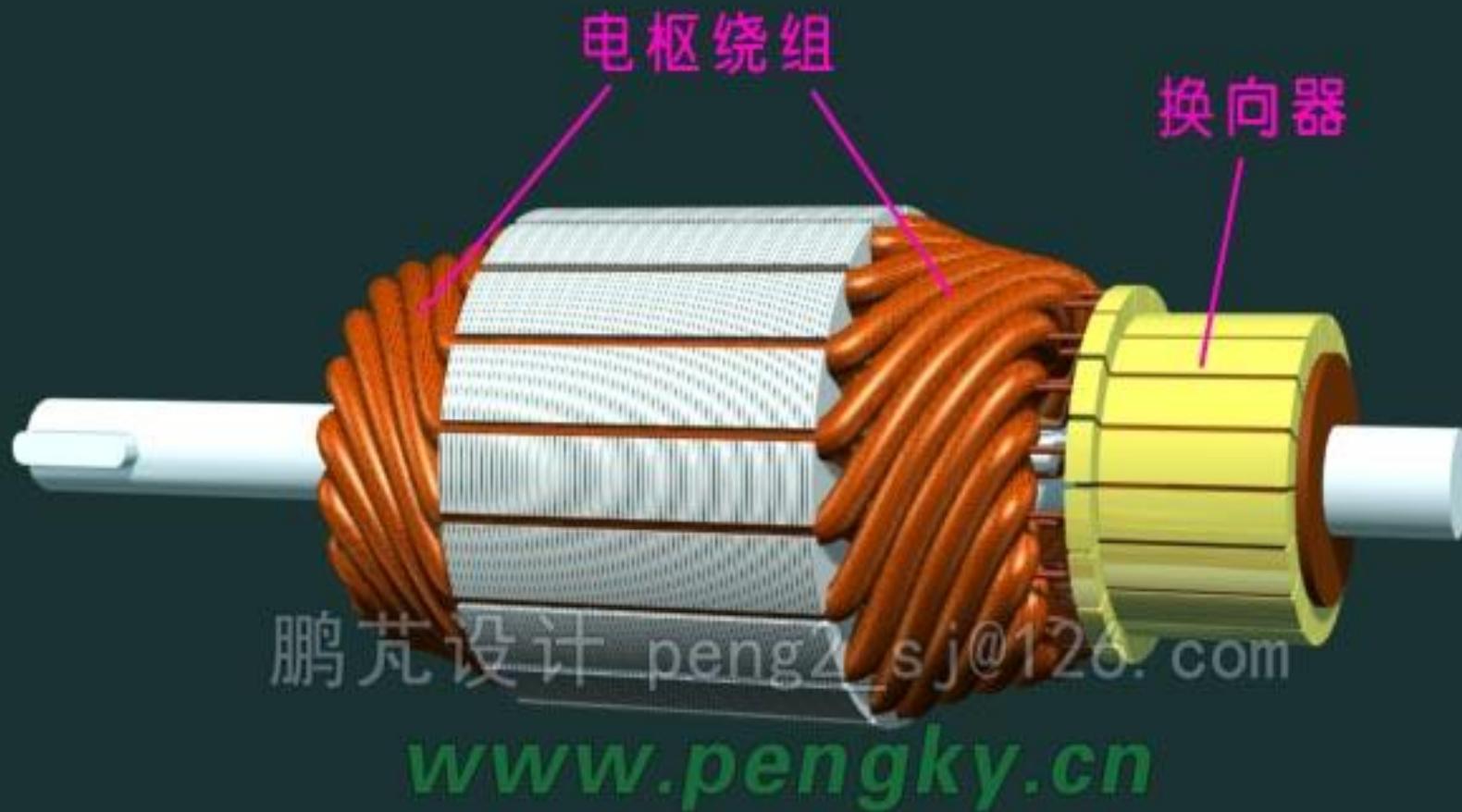
# 第1章 直流电动机

- ❖ 概述
- ❖ 直流电动机的运行原理
- ❖ 直流电动机的工作特性

## 1.2.1 直流电机的电枢绕组和电枢反应

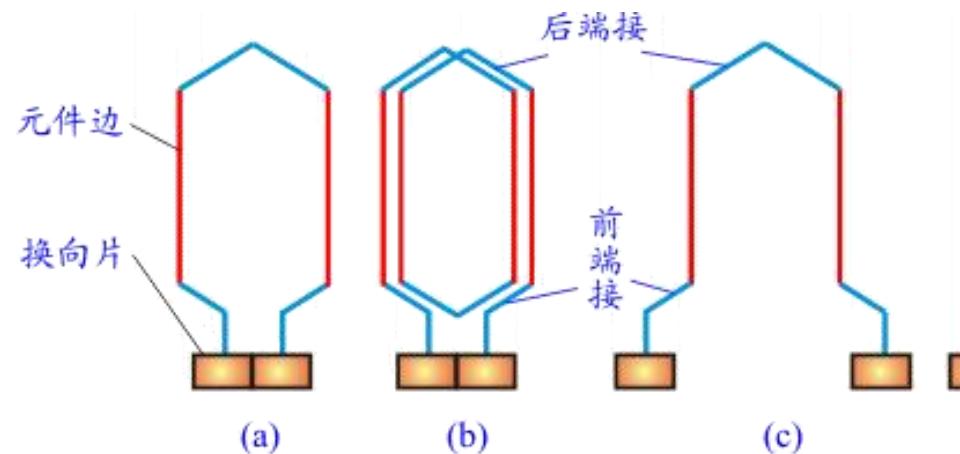
### 直流电机电枢绕组

- 作用  
    旋转电机实现机电能量转换的**枢纽**。
- 构成原则
  - 在一定的导体数下，能够产生尽可能大的感应电动势，承担足够大的电流、电磁转矩和电磁功率；
  - 在承担一定的电流、电磁转矩和电磁功率情况下，导体数尽可能少；
  - 结构简单，运行可靠，便于维护、检修。

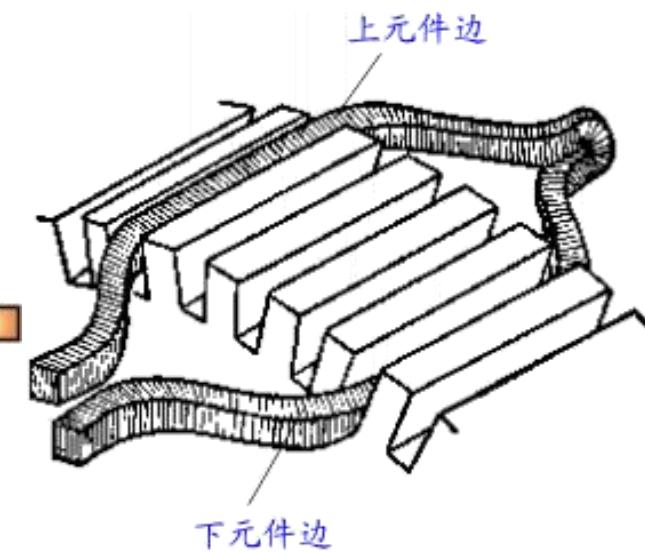


# 电枢绕组基本概念：

- 元件指两端分别与两片换向片连接的单匝或多匝线圈。
- 元件边、端接、上元件边、下元件边



直流电机电枢绕组元件  
(a) 单匝叠绕组元件 (b) 两匝叠绕组元件  
(c) 单匝波绕组元件 (d) 两匝波绕组元件



电枢绕组元件在槽内的放置

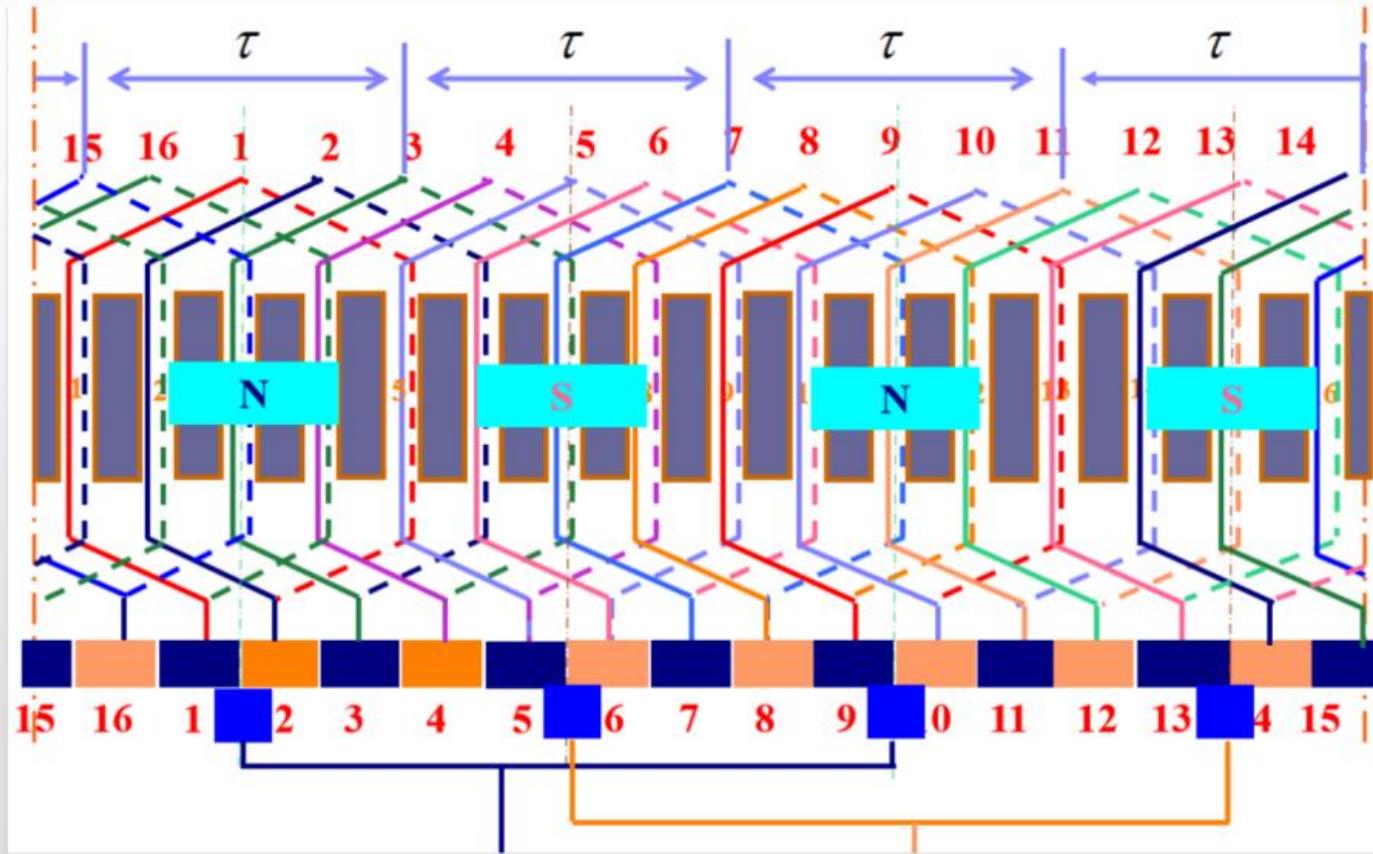
- 电枢绕组的特点常用槽数 $Z$ 、元件数 $S$ 、换向片 $K$ 数及各种节距来表征。  
**槽数=元件数=换向片，故有 $S=K=Z$**
- 极距  $\tau$ ：每个主磁极在电枢表面占据的距离或相邻两主极间的距离。  
设电机的极对数为 $p$ , 电枢外径为 $D$ , 则  
 **$\tau = \pi D / 2p$  (弧长) 或  $\tau = Z / 2p$  (槽数)**

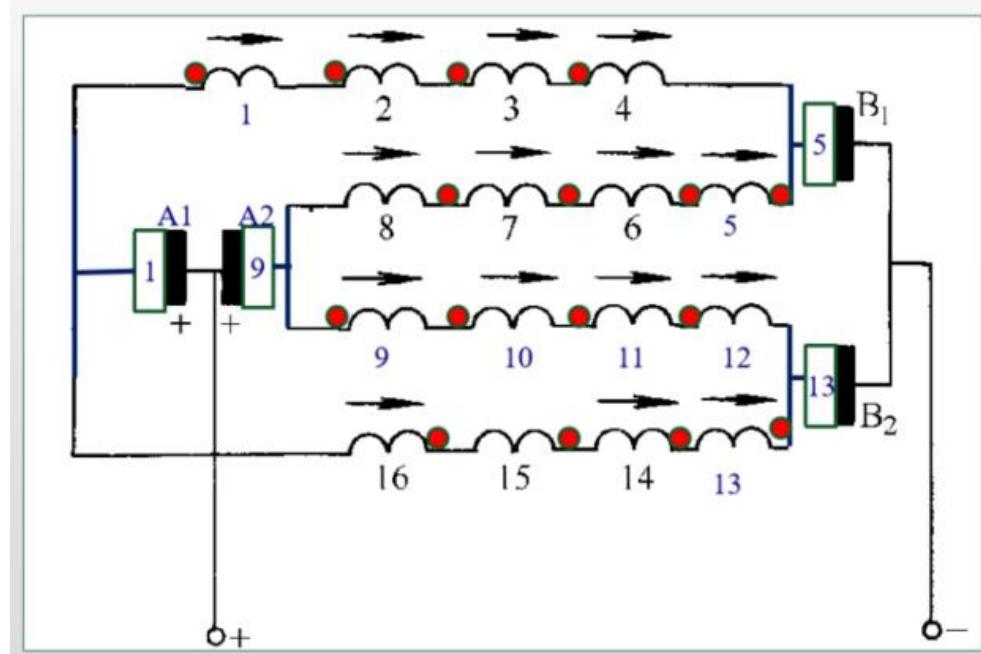
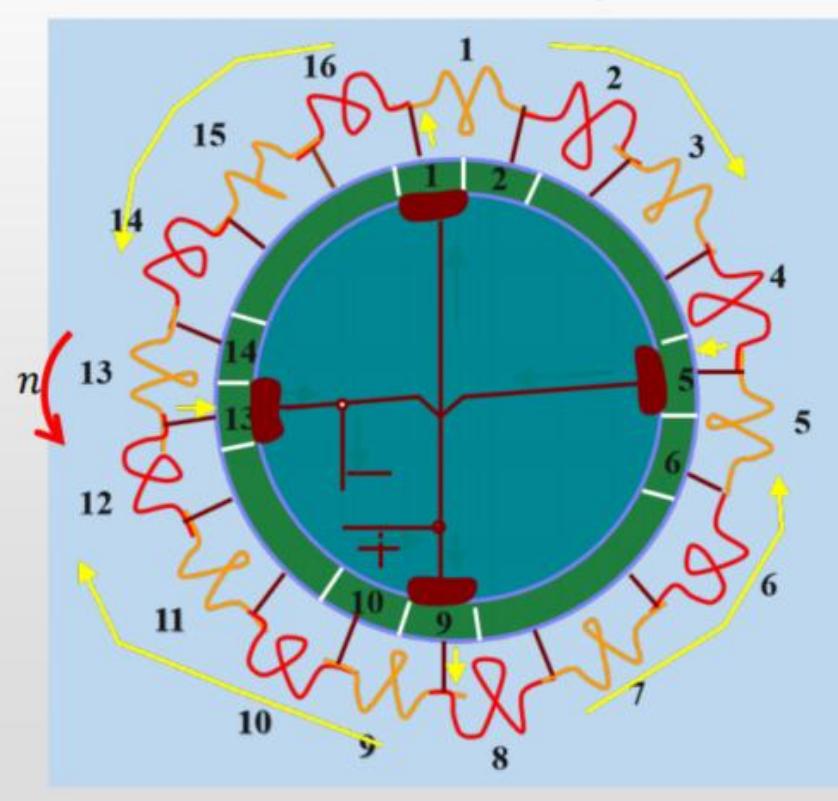
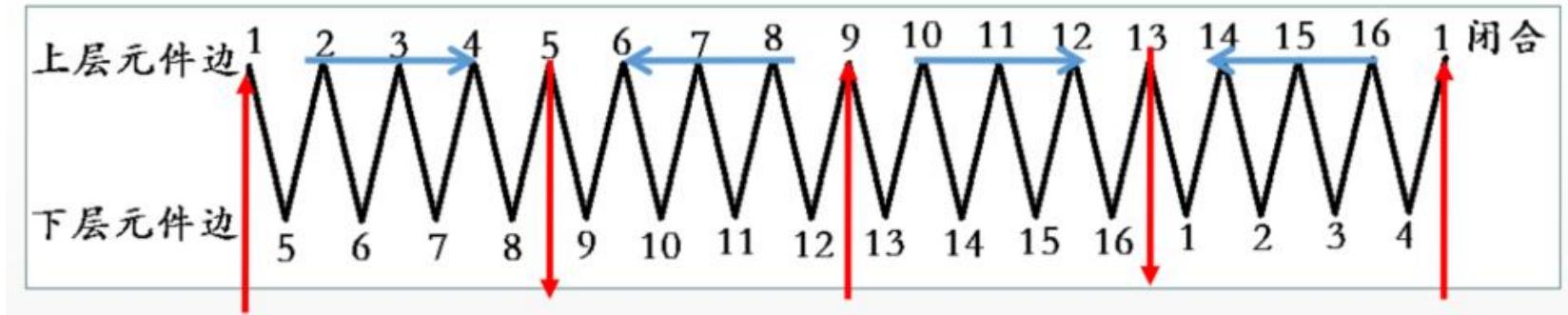
# 单迭绕组展开示意图

某直流电机的极对数  
 $p=2$ , 槽数Z、元件数S  
及换向片数K为  
 $Z=S=K=16$ 。

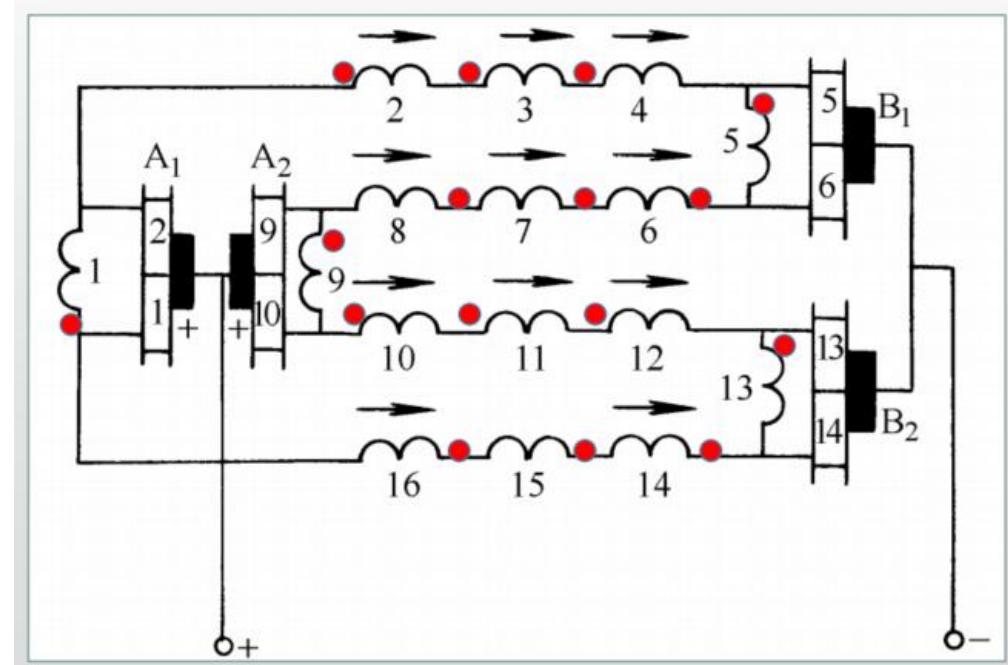
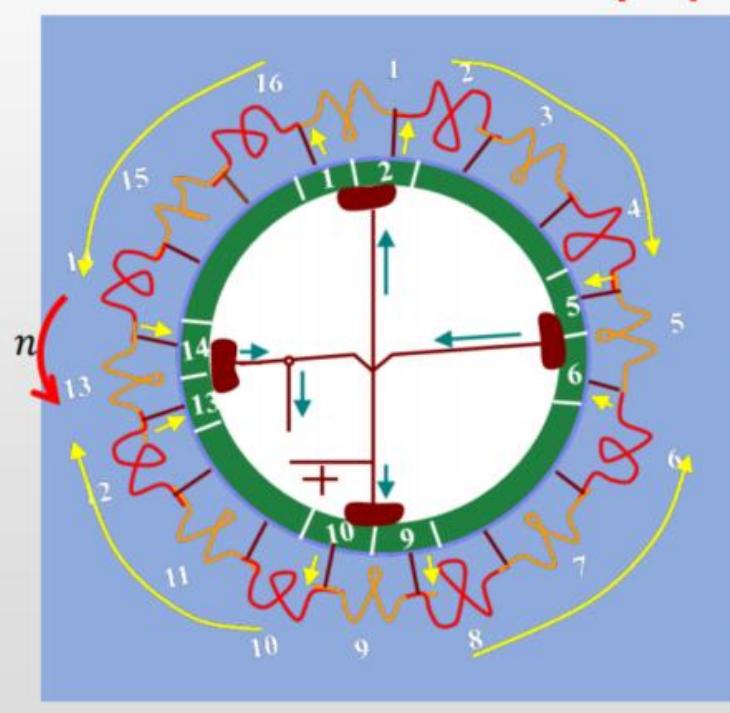
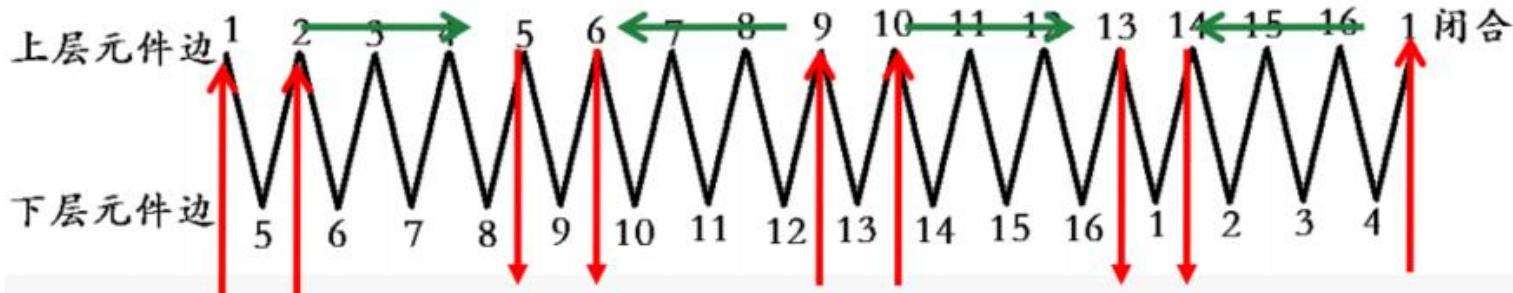
$$\tau = \frac{Z}{2p} = 4$$

$$y_1 = y_k = \tau = 4$$

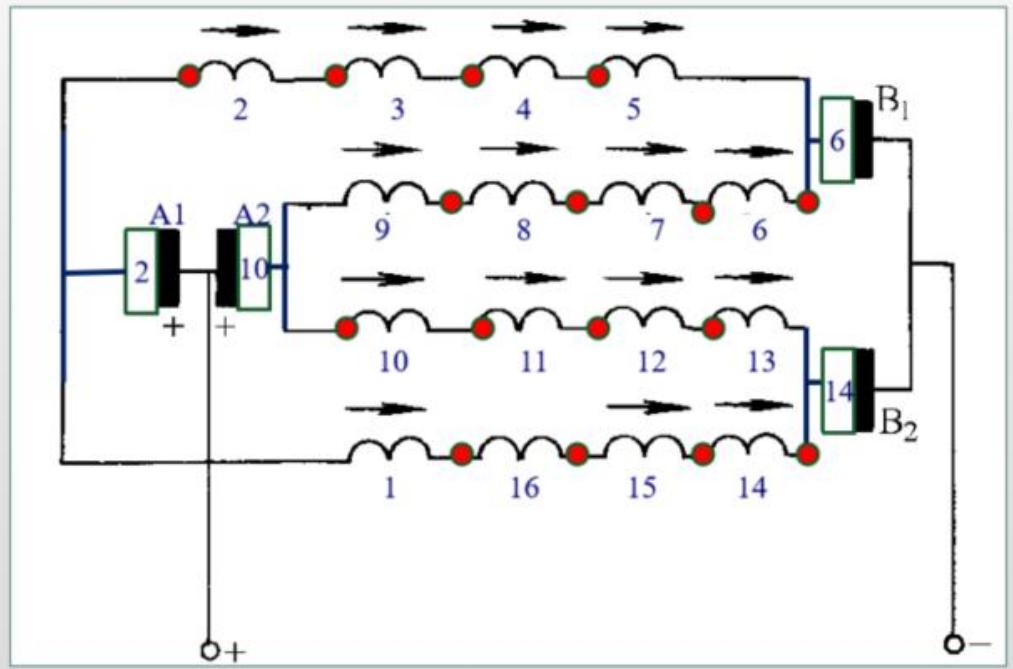
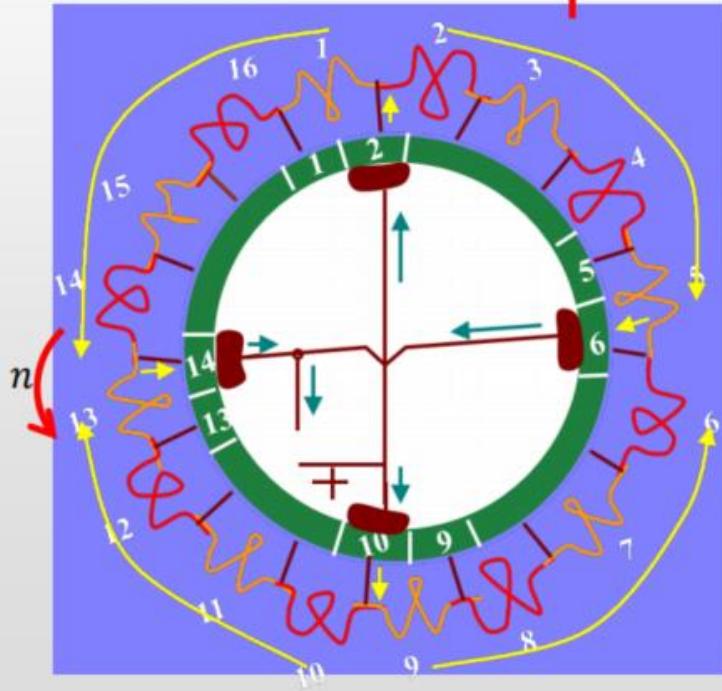
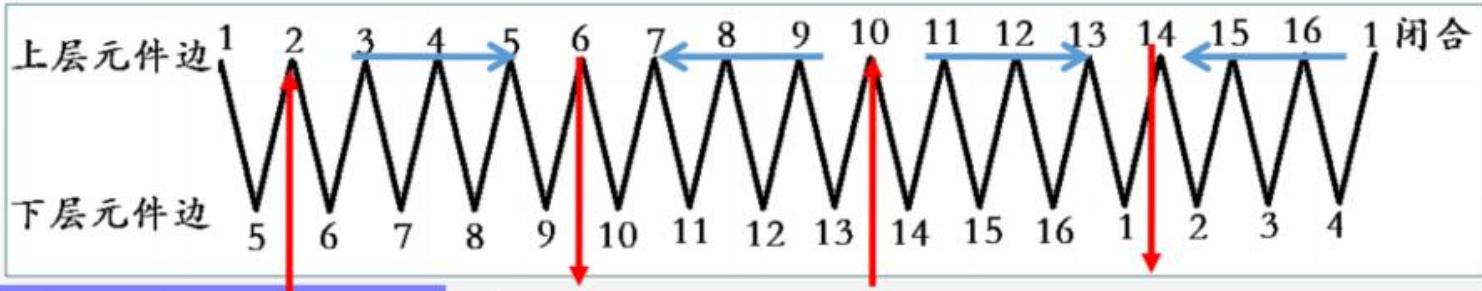




# 换向过程



# 换向结束



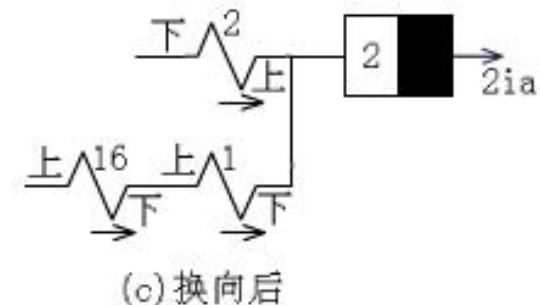
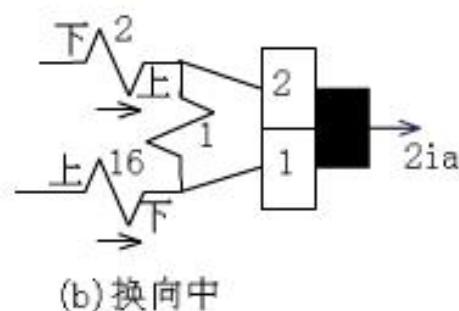
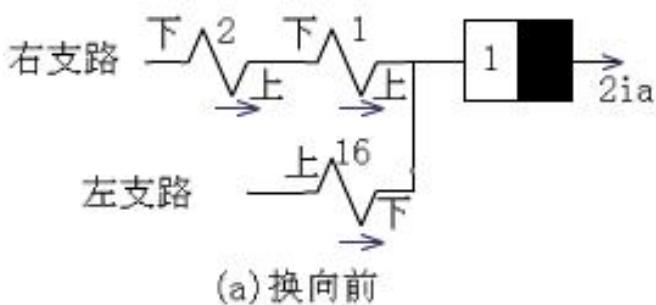
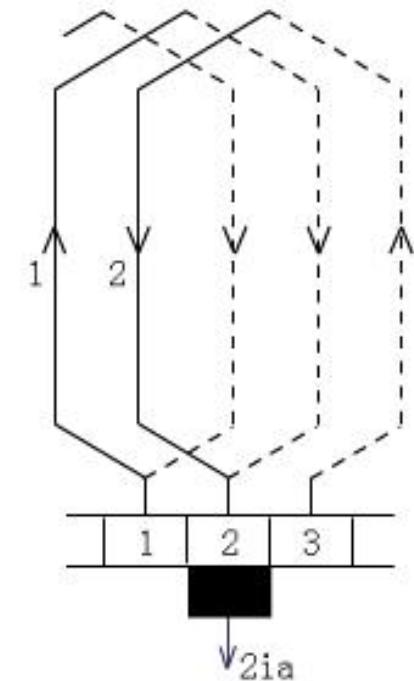
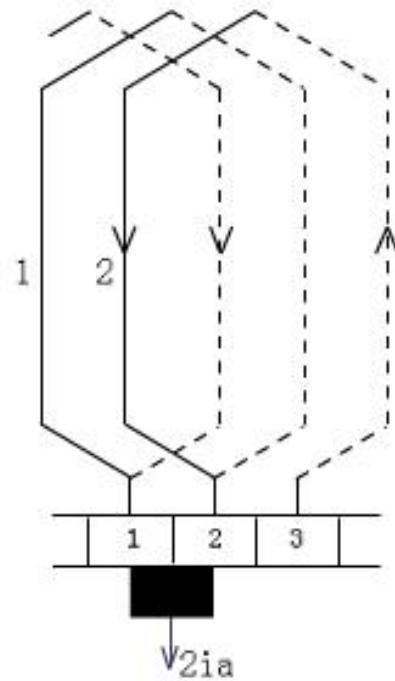
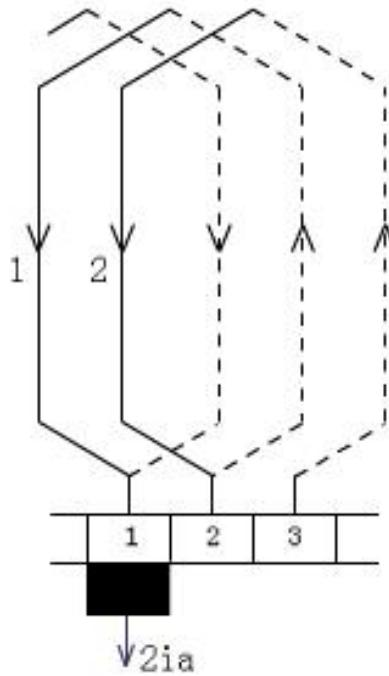
# 直流电机的换向

直流电机的元件经过电刷，从一条支路进入另一条支路时，元件里的电流改变方向。

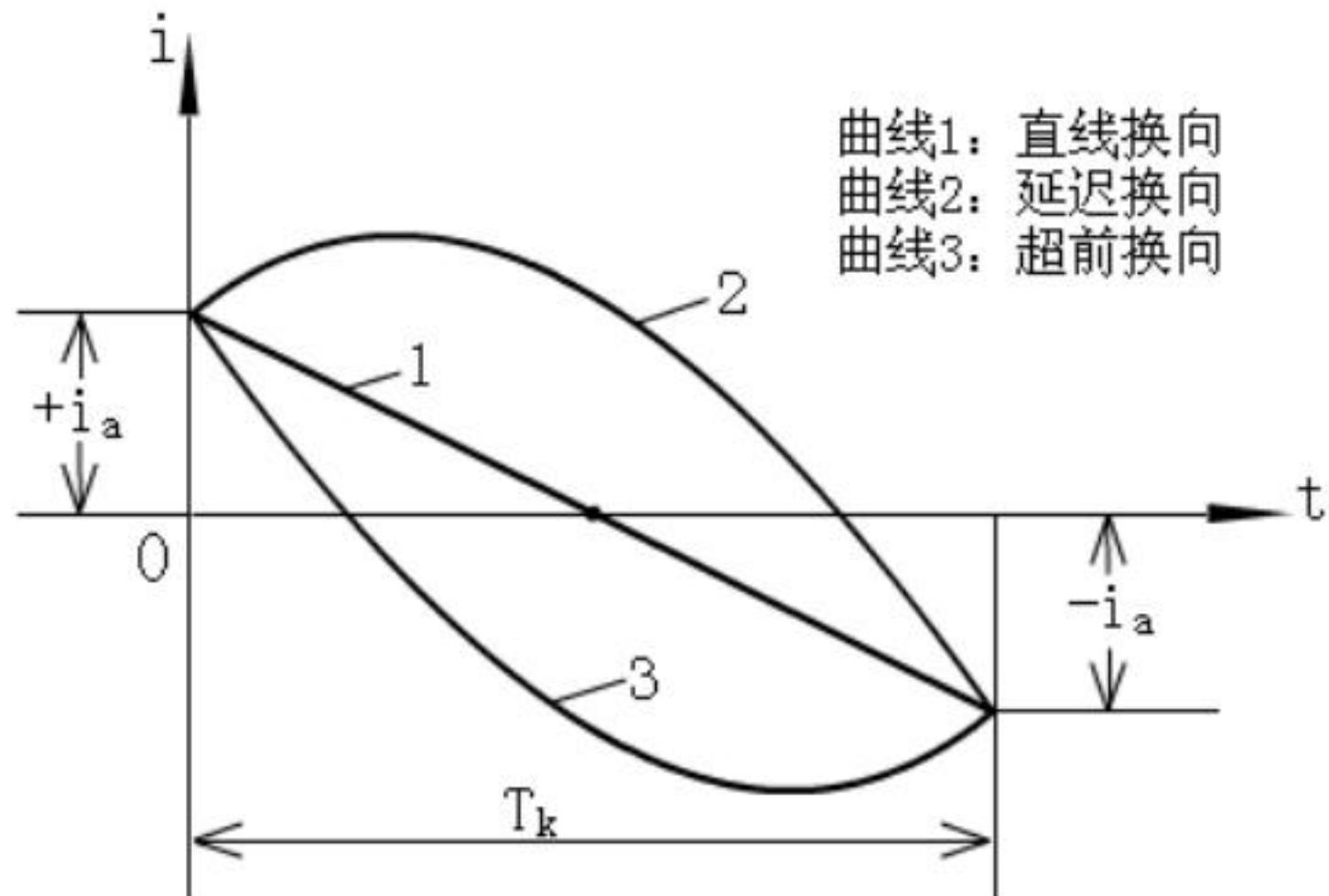
换向的过程即元件被电刷短路的过程。

换向不好会使电刷产生火花，火花严重时会影响电机运行

单叠绕组**1**号元件的换向过程，电刷宽度与换向片宽度相等，电枢以 $v_a$ 的速度从右向左旋转。



# 换向元件中的电流变化



# 换向元件中的电动势

(1) 自感电动势  $e_L = -L \frac{di}{dt}$

(2) 互感电动势  $e_M = -M \frac{di}{dt}$

(3) 电枢反应电动势  $e_a$

二者之和称为电抗电动势  $e_r$ ，反对元件的电流变化。

$e_r$  与  $e_a$  都反对换向元件电流变化，换向电流不随时间线性变化，比直线换向慢，**延迟换向**。

采取措施产生  $e_k$ ，使  $\sum e$  为 0，形成直线换向。如  $e_k$  作用大于  $e_r + e_a$ ，产生**超越换向**。

# 改善换向的方法

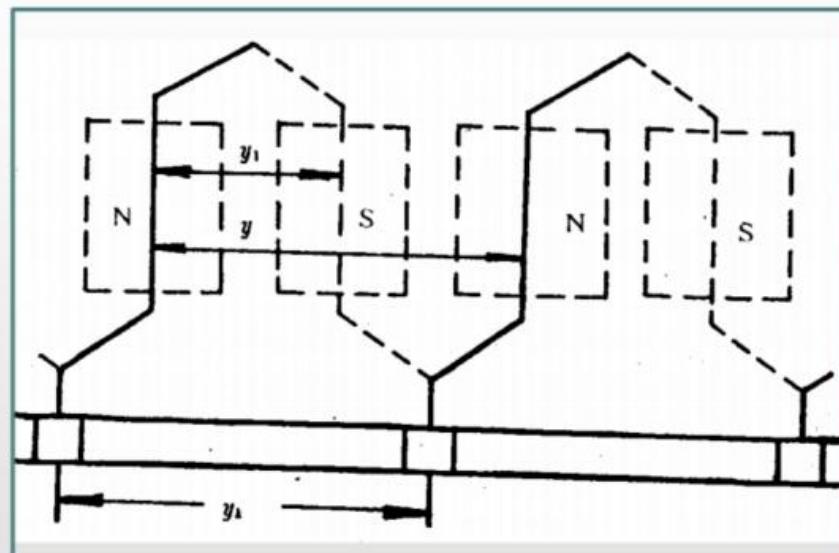
## (1) 加换向磁极

放于几何中心线处，换向绕组与电枢绕组串联，换向磁极的极性与电枢磁场极性相反。

## (2) 移刷改善换向

直流电动机电刷从几何中心线逆转  $\beta$  角，使  $\beta > \alpha$ ，换向元件切割主磁场产生感应电动势，抵消电枢反电动势和电抗电动势。

# 单波绕组



- 将上层边在N极下的全部联接起来
- 将上层边在S极下的全部联接起来

$$a = 1$$

电刷对数 = 1(原理上)

**小电流、大电压**

$$y_k = y = \frac{k-1}{p} = \text{整数}$$

# 小结

- 电刷将闭合的电枢绕组分为若干条并联支路；
- 当电枢绕组旋转时，每条支路的电动势不变；
- 单叠绕组每个主磁极下元件串成一条支路，**并联支路对数** $a$ 等于**磁极对数**，也等于**电刷组数**。
- 单叠绕组输出电动势等于一条支路电动势，输出电流等于各支路电流的总和， $I_a=2ai_a$ ；
- 当元件端接线对称时，电刷的轴线正好位于主极中心线下。

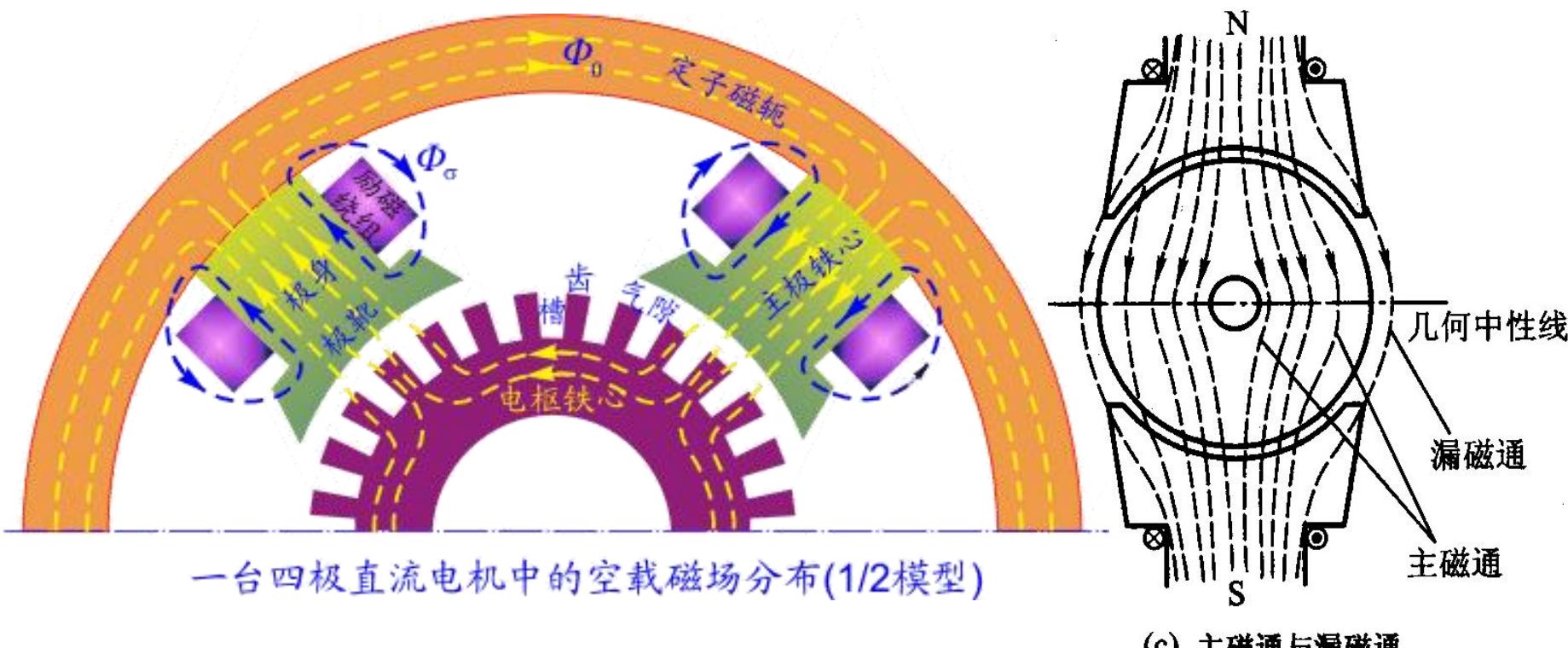
# 直流电机的电枢反应

## 1. 空载磁场（电动机空载，电枢电流为零）

- ❖ **空载磁场：** 主磁极励磁绕组流过励磁电流产生的磁场，主磁极的磁动势为  $F = N_f I_f$ ，式中  $N_f$  是励磁绕组的匝数， $I_f$  是直流励磁电流。
- ❖ **主磁通  $\Phi_0$ ：** 交链励磁绕组和电枢绕组，在电枢绕组中感应电动势，实现机电能量转换。
- ❖ **漏磁通  $\Phi_\sigma$ ：** 不进入电枢铁心，不和电枢绕组交链，因此不感应电动势产生电磁转矩。它只是增加主磁极磁路的饱和程度

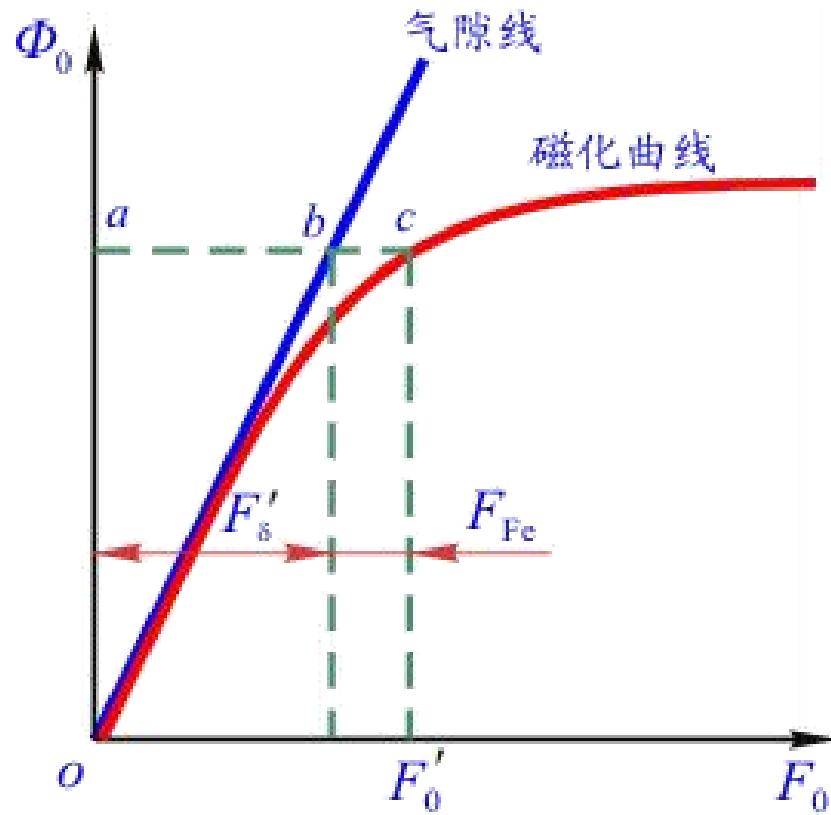
## ❖ 主磁路

主磁极1 — 气隙1—电枢齿1—电枢轭—电枢齿2  
— 气隙2—主磁极2—定子轭—主磁极1



## ❖ 磁化曲线

磁化曲线是指电机的主磁通与励磁磁动势或励磁电流的关系曲线。



直流电机的磁化曲线

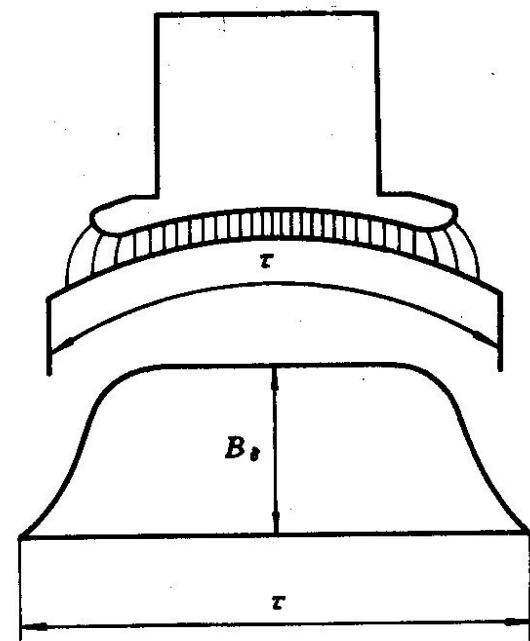
## ❖ 气隙磁通密度沿电枢周围分布

忽略电枢齿槽影响，假定电枢表明光滑，略去铁心磁压降，认为全部磁动势都在气隙上，这样每段气隙磁压降处处相等。

电枢圆周表面各处与气隙长

度  $\delta$  成反比。  $N_f I_f = H_\delta \delta = \frac{B_\delta}{\mu_\delta} \delta$

定义  $B_{av}$  为气隙磁通密度平均值，  
与每极磁通关系为  $\Phi = B_{av} \tau l$



## 2. 电枢反应

- ❖ **电枢磁场**: 当电机**有负载**、电枢绕组中有电流通过(即 $I_a \neq 0$ )时，该电流也会在电机中产生磁场，称之为电枢磁场。
- ❖ **电枢反应**: 电枢磁动势对主磁极所建立的气隙磁场的影响称为电枢反应。不仅与电枢**电流大小**有关，还受电刷位置影响。

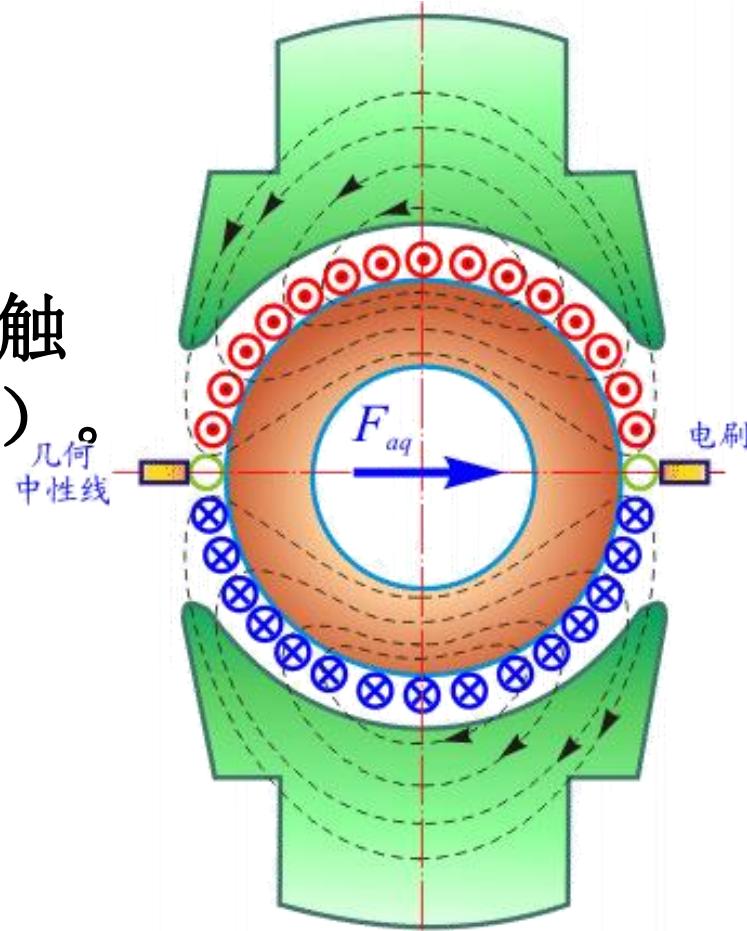
## ❖ 电刷位于几何中心线时电枢磁场

电刷放在几何中性线上。

电枢磁场由右手螺旋法则示意。

电枢磁势的轴线总是与和电刷接触的导体的连线重合（几何中心线）。

与主极轴正交，因此称为交轴  
**(quadrature axis; q-axis)** 电  
枢磁动势。



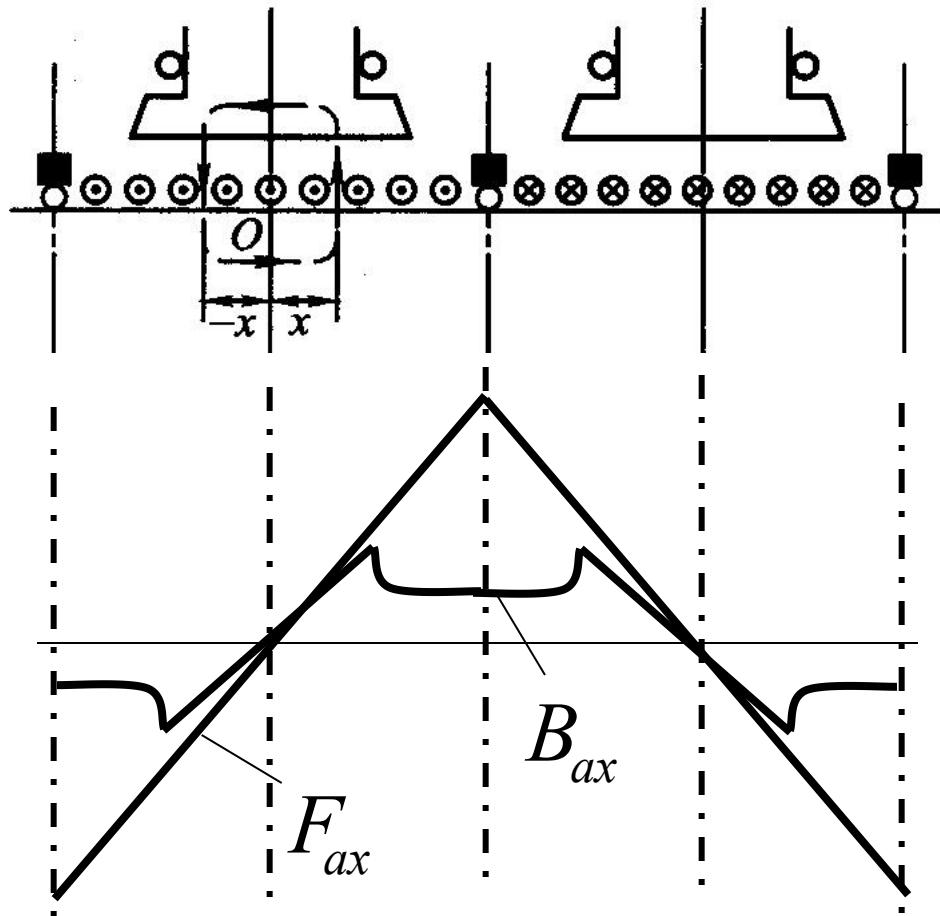
电刷在几何中性线上时的电枢磁场

电枢表面单位长度上的安培导体数称为电机的线负荷A ,  $A=Ni_a/(\pi D_a)$ 。

忽略铁心磁阻，x处闭路上的总磁动势 $2F_{ax}=A*2x$ ，则每个气隙消耗的磁势为 $F_{ax}=Ax$

气隙磁通密度在空间分布为:  $B_{ax}=\mu_0 F_{ax}/\delta$

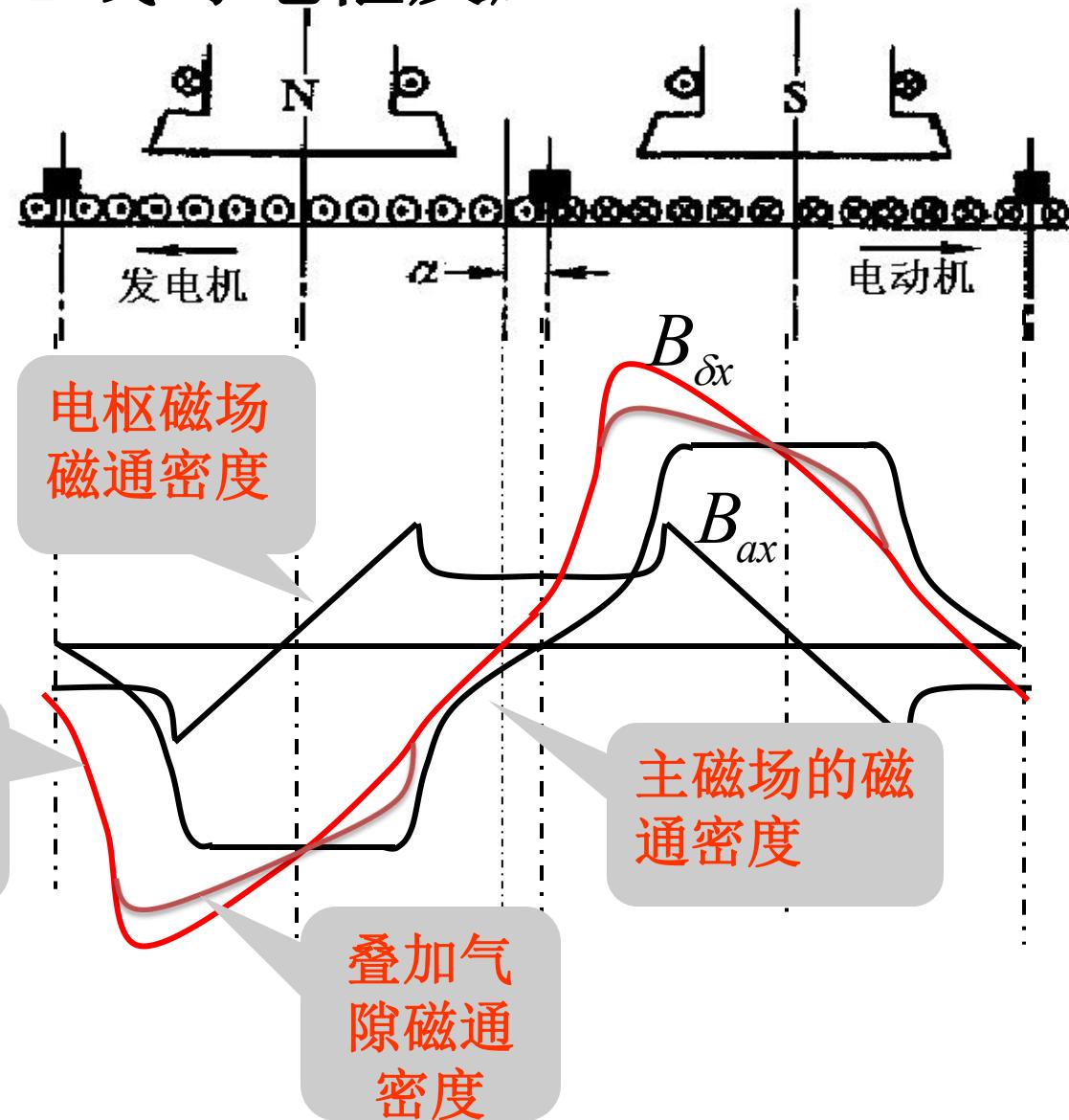
一个周期的磁密波形呈马鞍形。



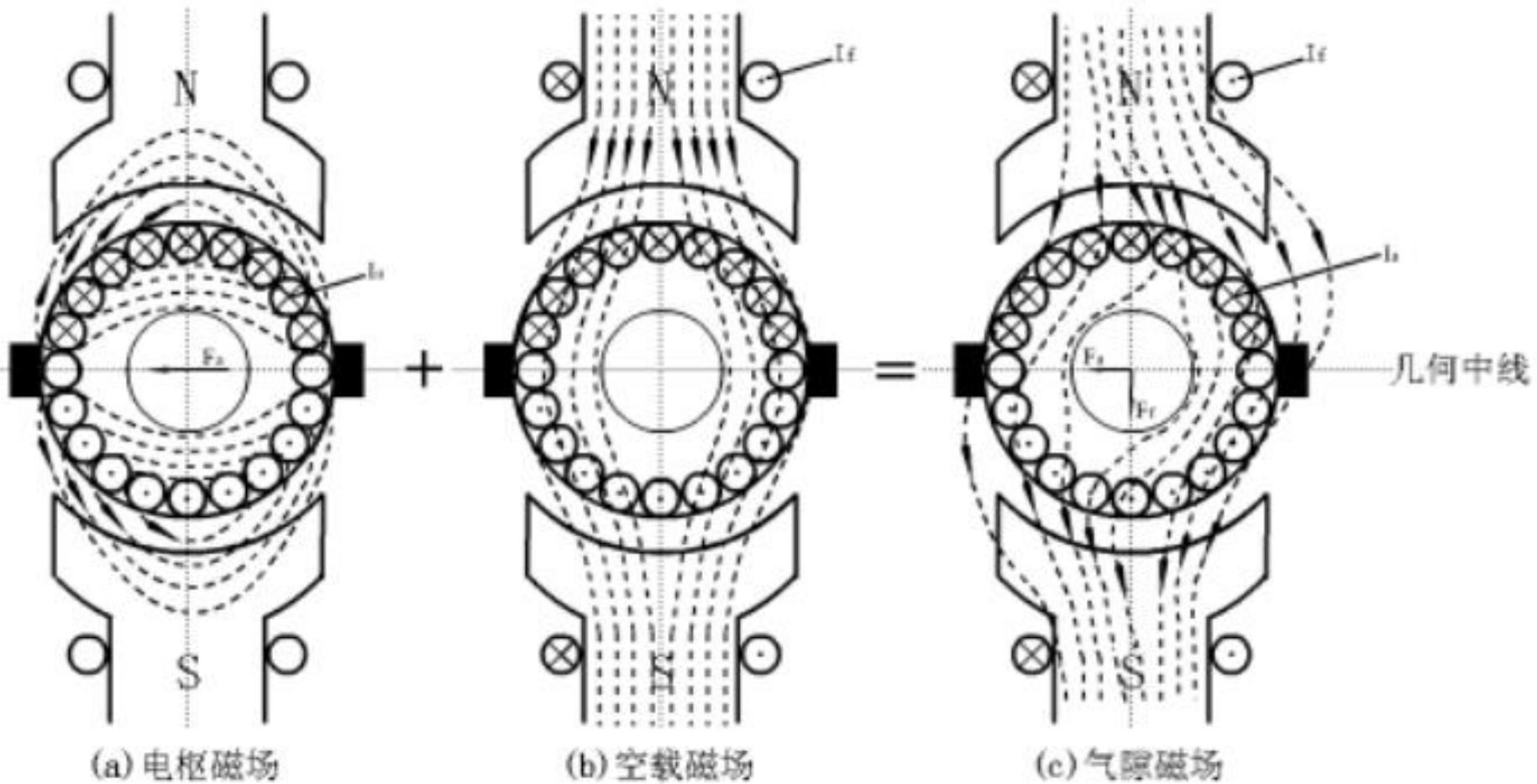
## ❖ 电刷位于几何中心线时电枢反应

磁路不饱和，磁密与磁动势成正比。合成磁密等于主磁密和电枢磁密的直接相加。

磁路饱和，磁阻随磁密增加而增加



## ❖ 电刷位于几何中心线时电枢反应



- ❖ 电刷位于几何中心线时电枢反应

- (1) 气隙磁场发生畸变

每个磁极下，气隙磁场一半被增强，一半被削弱，气隙磁密分布畸变成尖顶波。

- (2) 对主磁场呈去磁作用

磁路不饱和时，主磁场被削弱的数量等于加强的数量，每极磁通量不变。磁路饱和时，磁通加强的数量小于消弱的数量，呈去磁作用。

- (3) 物理中线偏离几何中线一个角度

对电动机，逆电枢转动方向偏移  $\alpha$  角。

## 1.2.2 直流电机的感应电动势和电磁转矩

### 1. 电枢绕组的感应电动势

电枢旋转时，电枢绕组切割气隙磁通产生的刷间电动势。等于电枢绕组里每条并联支路的感应电动势。

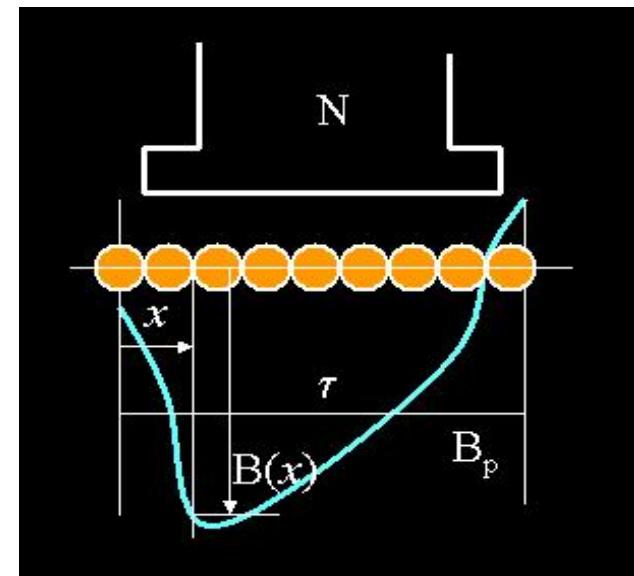
总导体数为 $N$ ，并联支路数为 $2a$ ，每根导体平均电动势为 $e_{av}$ ，则支路刷间电动势为 $E_a$ ：

$$E_a = \frac{N}{2a} e_{av}$$

导体平均电动势为：

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

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



线速度 $v$ 用转速  $n$  ( $r/min$ ) 表示为:  $v = 2p\tau n / 60$

则导体平均电动势为

$$e_{av} = \frac{\Phi}{\tau l} l \times 2p\tau \frac{n}{60} = 2p\Phi \frac{n}{60}$$

刷间电动势为:

$$E_a = \frac{N}{2a} 2p\Phi \frac{n}{60} = \frac{pN}{60a} \Phi n = C_e \Phi n$$

其中:  $C_e = pN / 60a$  称为电动势常数, 决定于电机结构。

## 2. 直流电机的电磁转矩

电机运行时，电枢绕组流过电流，载流导体受力形成的总转矩。

每根导体平均电磁力为  $f_{av}$  :

$$f_{av} = B_{av}li_a$$

导体平均受转矩为:

$$T_{av} = \frac{D}{2}B_{av}li_a$$

则电机总电磁转矩为:  $T = NT_{av} = N \frac{D}{2}B_{av}li_a$

考虑  $D = 2p\tau/\pi$  ,  $B_{av} = \Phi/(l\tau)$  及  $i_a = I_a/(2a)$

则总电磁转矩为:

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

其中:  $C_T = pN/2\pi a$  称为转矩常数, 决定于电机结构, 单位为  $N \cdot m$ 。

电动势常数与转矩常数的关系:

$$C_T = \frac{60}{2\pi} C_e = 9.55 C_e$$

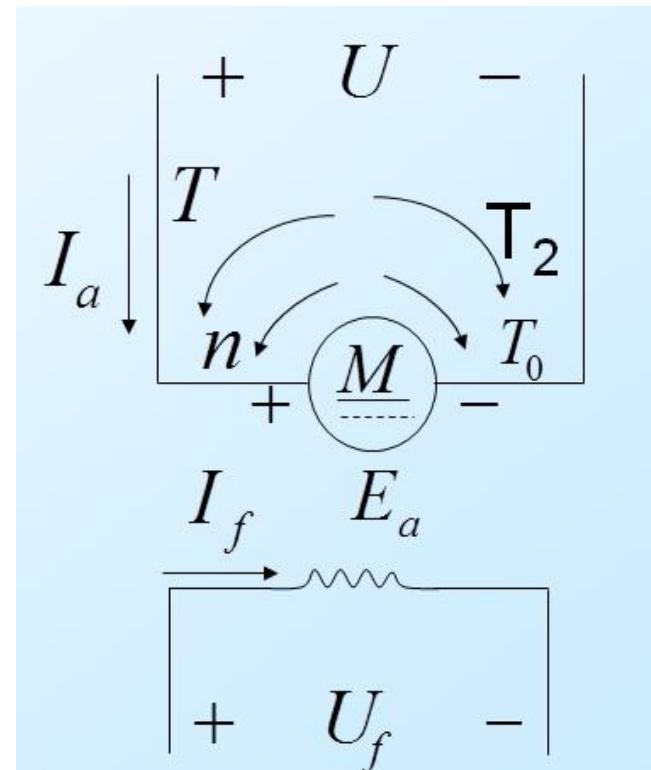
例1. 1  
P22

## 1.2.2 直流电机运行的基本方程式

### (1) 电压平衡方程式

外加电压作用下，电枢回路顺电压方向流过电流  $I_a$ ，受力产生电磁转矩  $T$ ，在此作用下电机旋转，电枢绕组切割磁场产生反电动势  $E_a = C_e \Phi n$

$$U = E_a + I_a R_a$$



(他励)

## (2) 转矩平衡方程

直流电机通电后，电枢电流在磁场中受力产生电磁转矩

$$T = C_T \Phi I_a$$

在克服机械摩擦空载转矩  $T_0$  后，转换为输出的机械转矩  $T_2$ ，拖动生产机械做功，当  $T$  与负载转矩  $T_L$  平衡时，电机以稳定转速运行。

$$T = T_0 + T_2$$

不同描述：

$$T_2 = T_m$$

$$T_L = T_m$$

### (3) 功率平衡方程

电压平衡方程两边乘以  $I_a$  有：

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

$$P_1 = P_M + P_{Cu}$$

转矩平衡方程两边乘以  $\Omega$  有

$$T\Omega = T_2\Omega + T_0\Omega$$

$$P_M = P_2 + p_0$$

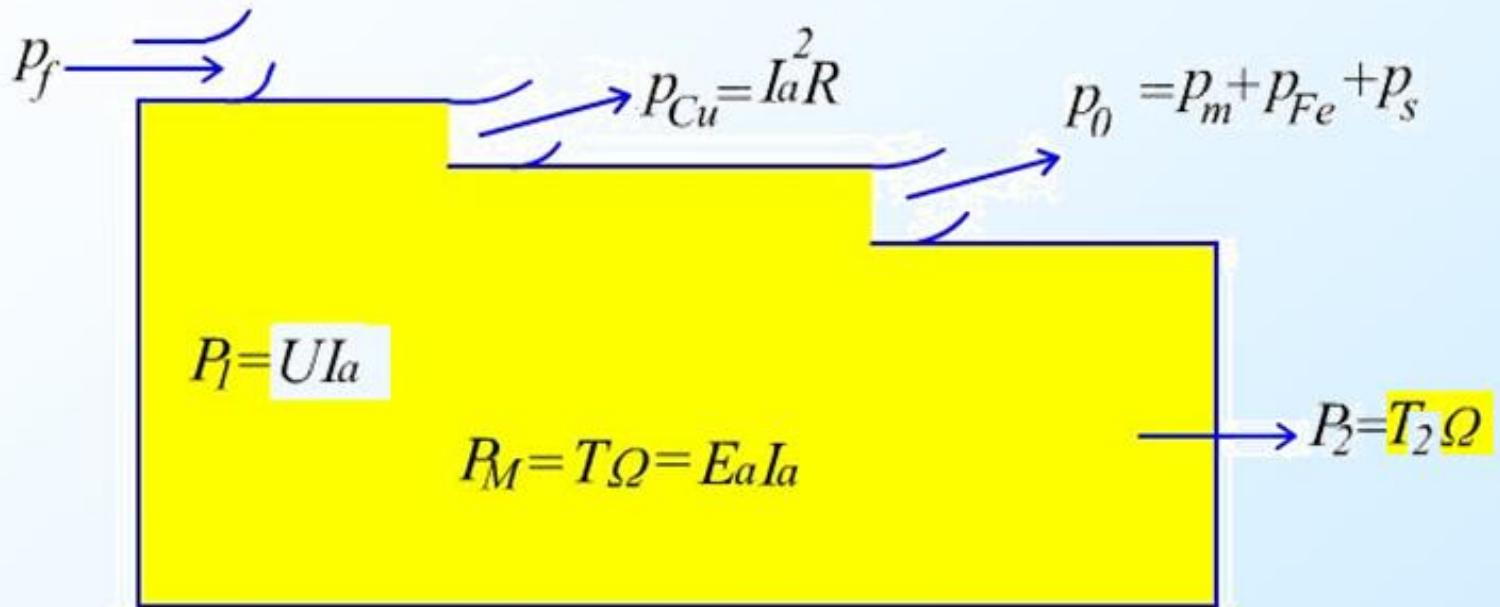
$$p_0 = p_m + p_{Fe} + p_s \text{ 为空载损耗}$$

$$P_1 = P_2 + p_0 + P_{Cu}$$

#### (4) 直流电机功率损耗

- ❖ 机械损耗  $P_m$ : 轴与轴承摩擦、电刷与换向器摩擦、通风损耗等。
- ❖ 铁心损耗  $P_{Fe}$ : 电枢铁心中磁场交变，会产生涡流损耗和磁滞损耗。
- ❖ 励磁损耗  $p_f$ : 
$$p_f = I_f^2 R_f$$
- ❖ 负载损耗  $P_{Cu}$ : 
$$p_f = I_a^2 R_a$$
- ❖ 附加损耗  $p_s$ : 齿槽引起磁场脉动引起的铁耗，机械部件切割磁通产生的铁耗等。

## (5) 直流电动机功率流程图



电磁功率:  $P_M = E_a \cdot I_a = T \cdot \Omega$

电机效率:  $\eta = P_2 / P_1 = 1 - (\sum p) / P_1$

## (6) 直流电机的电磁功率

直流电机中机械能转换为电能或电能转换为机械能的那部分功率，是由于电和磁的相互作用产生的。

$$P_M = E_a \cdot I_a = C_e \cdot \Phi \cdot n \cdot I_a$$

$$= \frac{2\pi}{60} \cdot C_T \cdot \Phi \cdot n \cdot I_a = T \cdot \Omega \quad \Omega = \frac{2\pi n}{60}$$

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

例1.2  
P24

## 1.2.4 电机的可逆性原理

在外界不同条件下既可以作为电动机运行，也可以作为发电机运行。

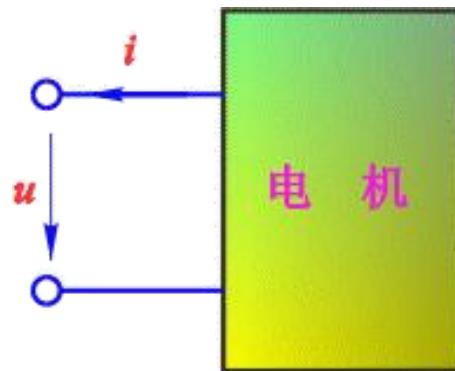
如果用原动机拖动电枢恒速旋转，就可以从电刷端引出直流电动势而作为直流发电机。

如果在电刷端外加直流电压，则就可以带动轴上的机械负载旋转，从而把电能转变成机械能，成为电动机。

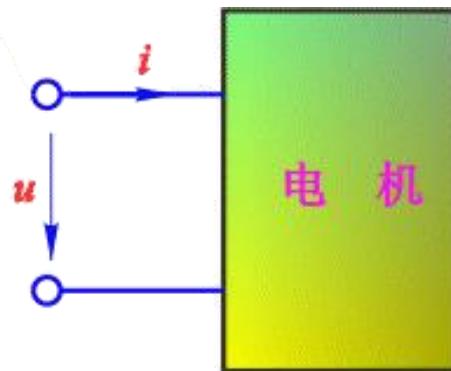
# 直流电机正方向规定：

从电机的电端口看，电流自端口正极流出时为发电机，流入则为电动机。

与上述发电机端口电压及电流方向一致的正方向称为发电机惯例，而与电动机端口电压及电流方向一致的正方向称为电动机惯例。



发电机惯例



电动机惯例

电压和电流正方向