

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

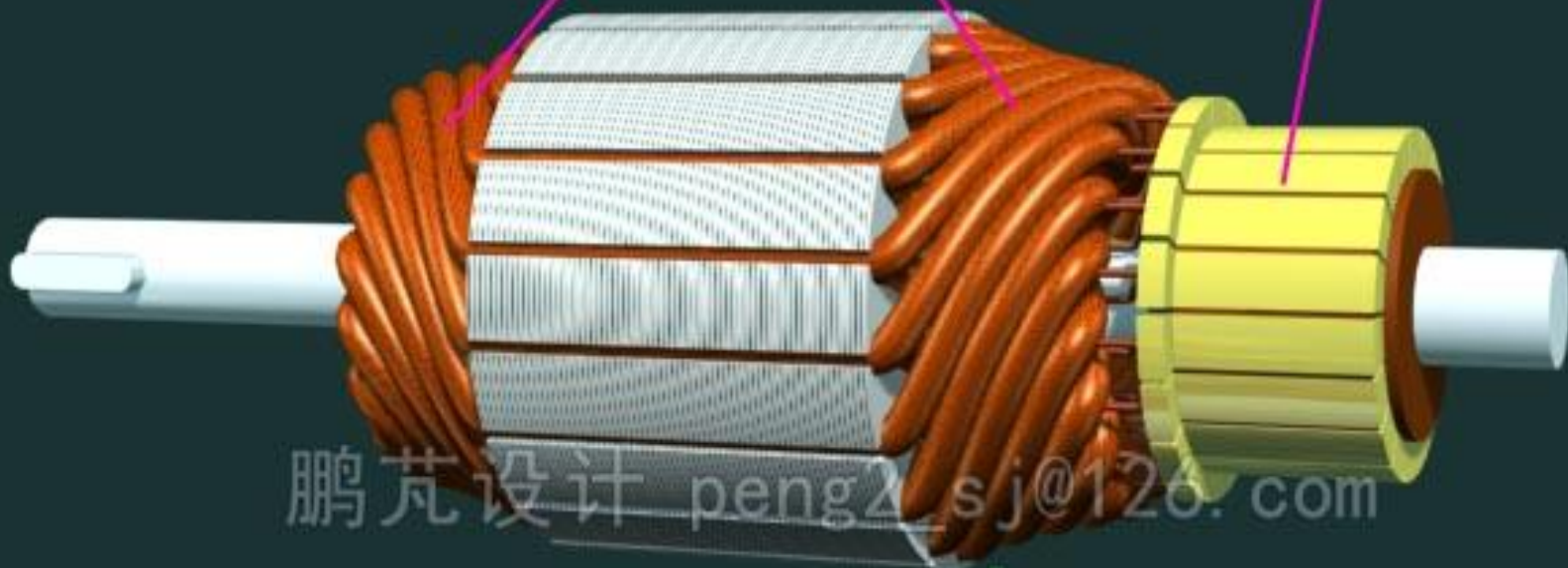
- 在一定的导体数下，能够产生尽可能大的感应电动势，承担足够大的电流、电磁转矩和电磁功率；

- 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

换向器

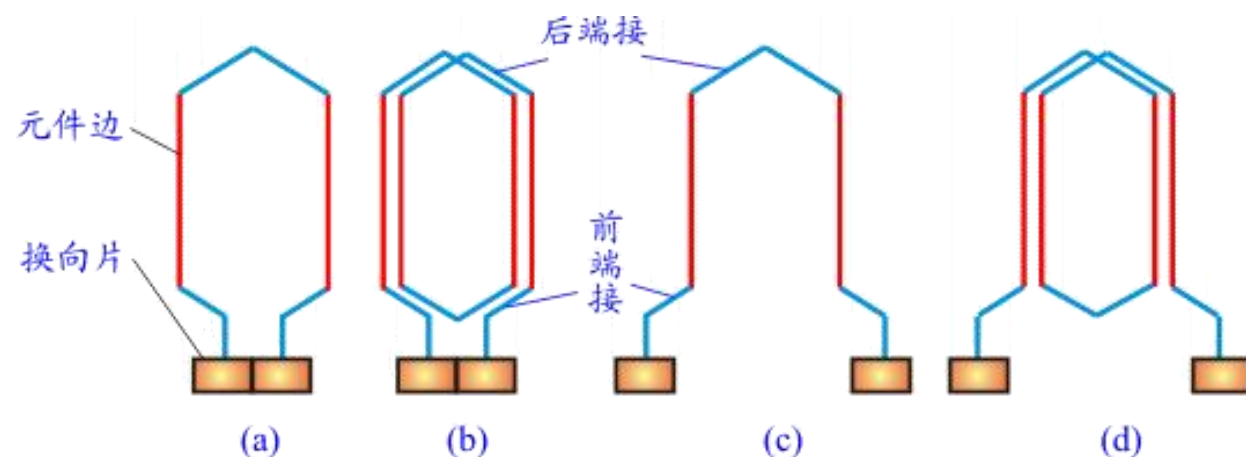


鹏芑设计 pengqisj@126.com

www.pengky.cn

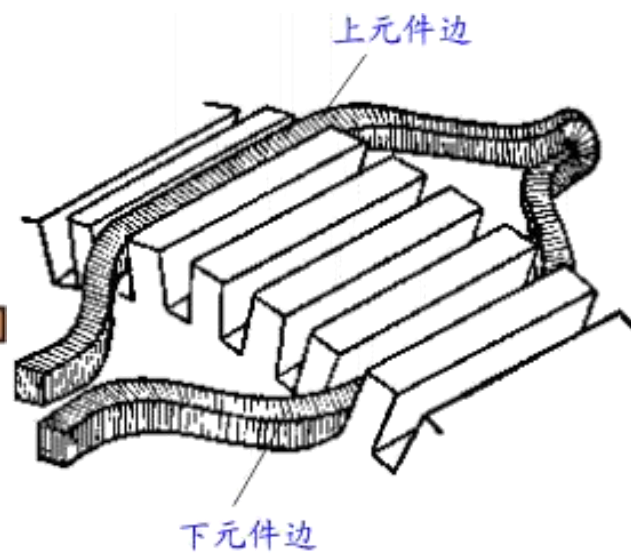
电枢绕组基本概念：

- **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 τ ：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

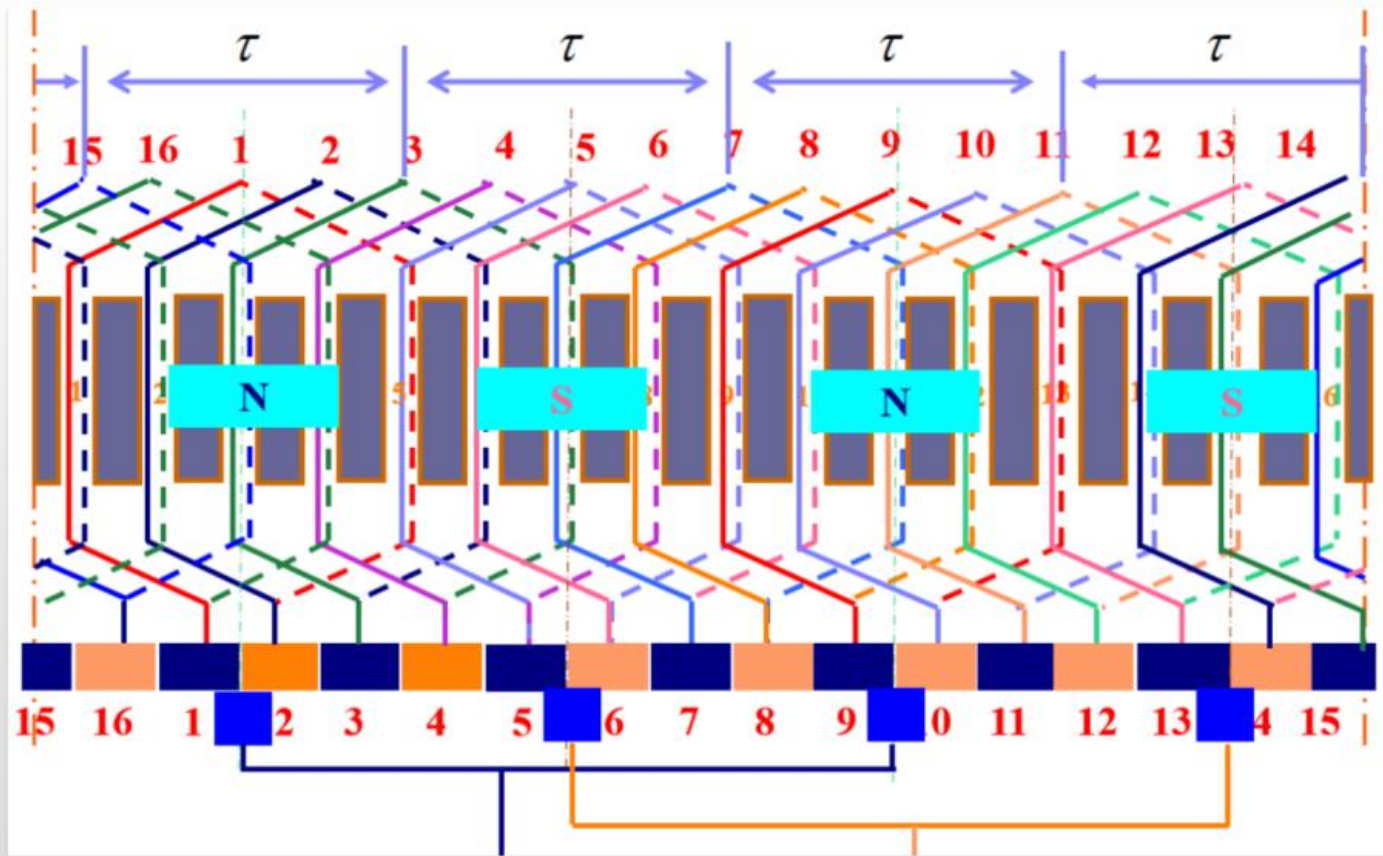
$\tau = \pi D / 2p$ (弧长) 或 $\tau = Z / 2p$ (槽数)

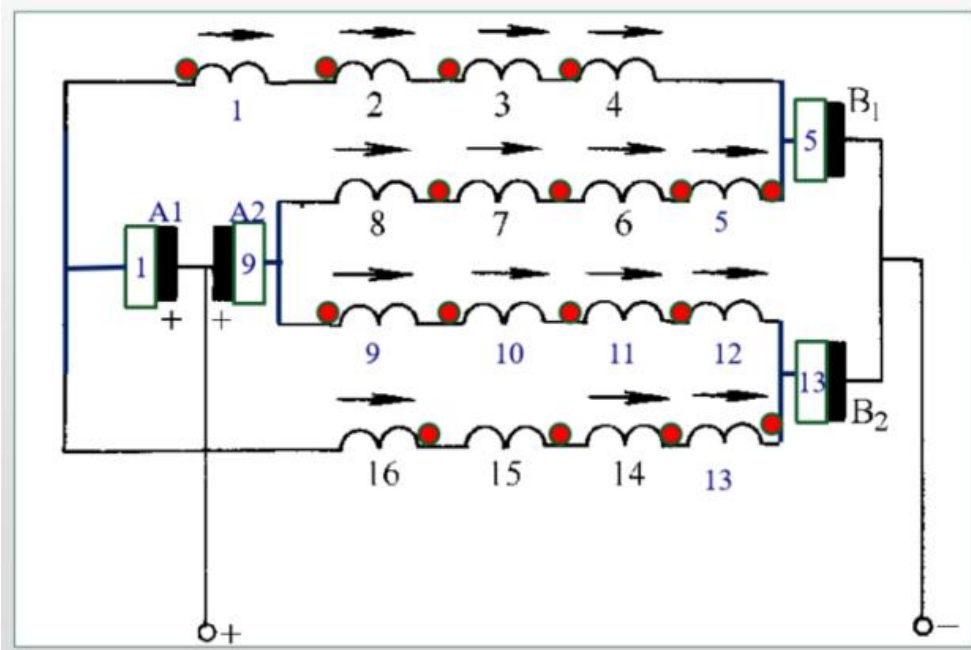
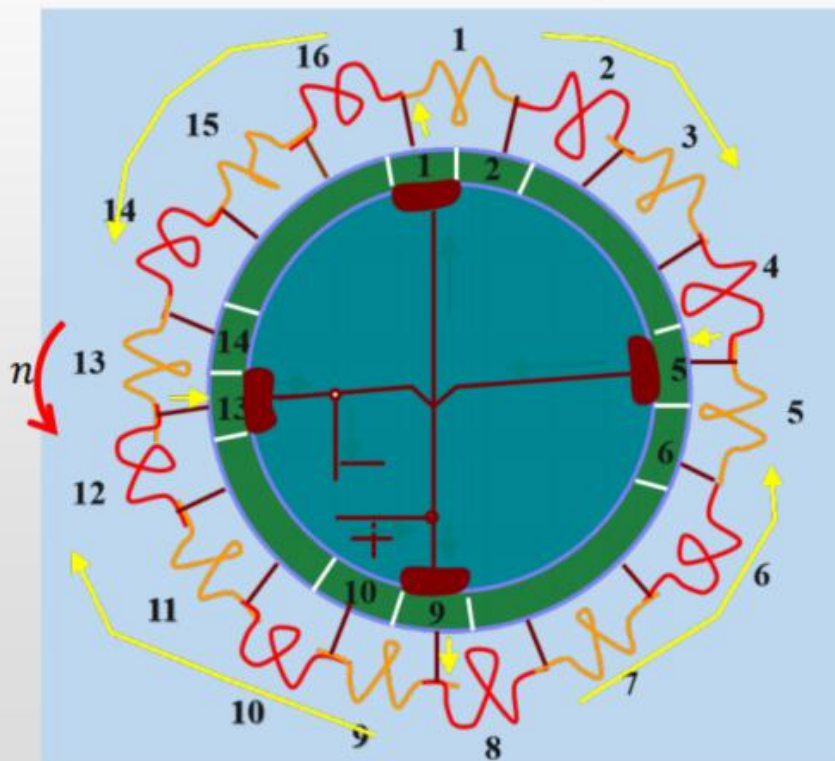
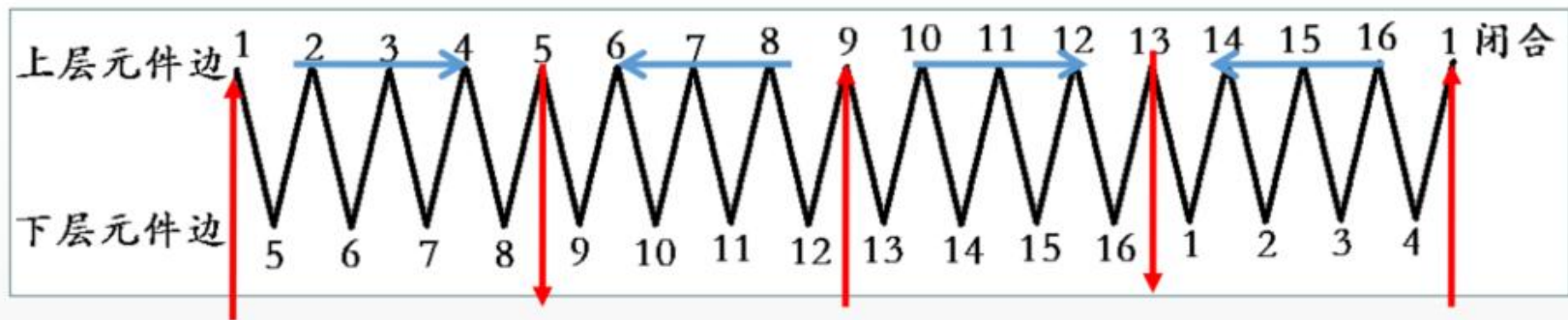
单迭绕组展开示意图

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
 $Z=S=K=16$ 。

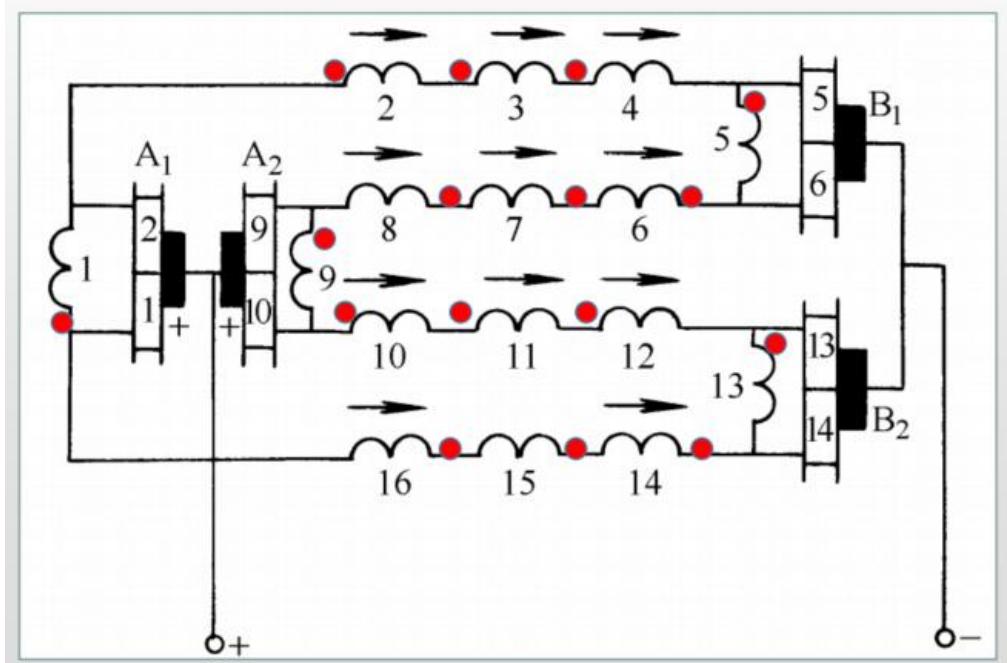
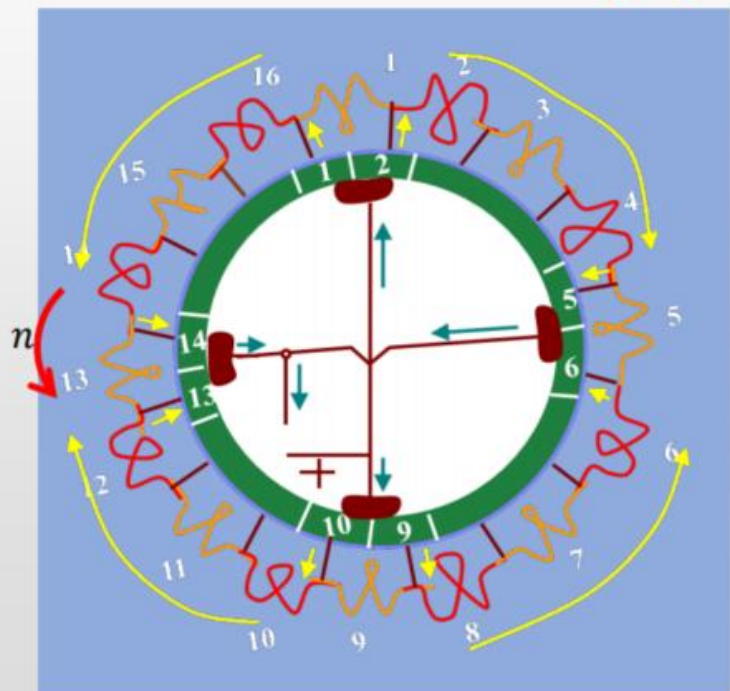
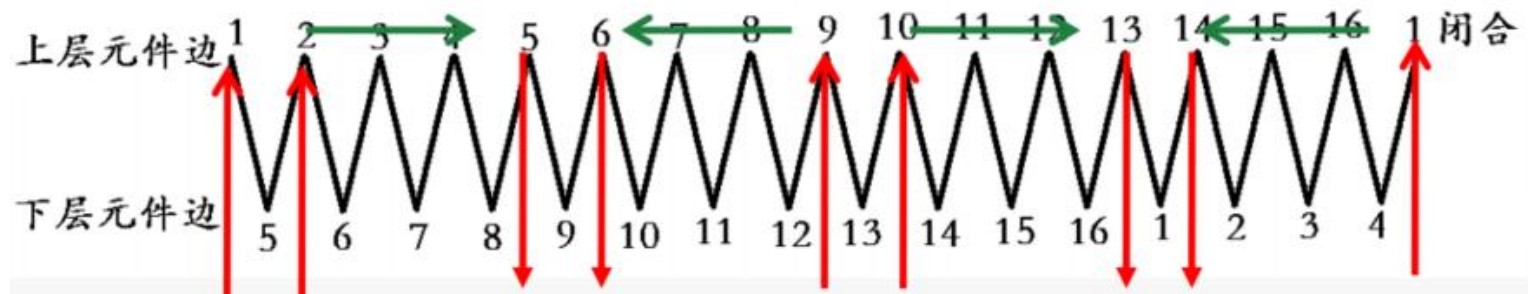
$$\tau = \frac{Z}{2p} = 4$$

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

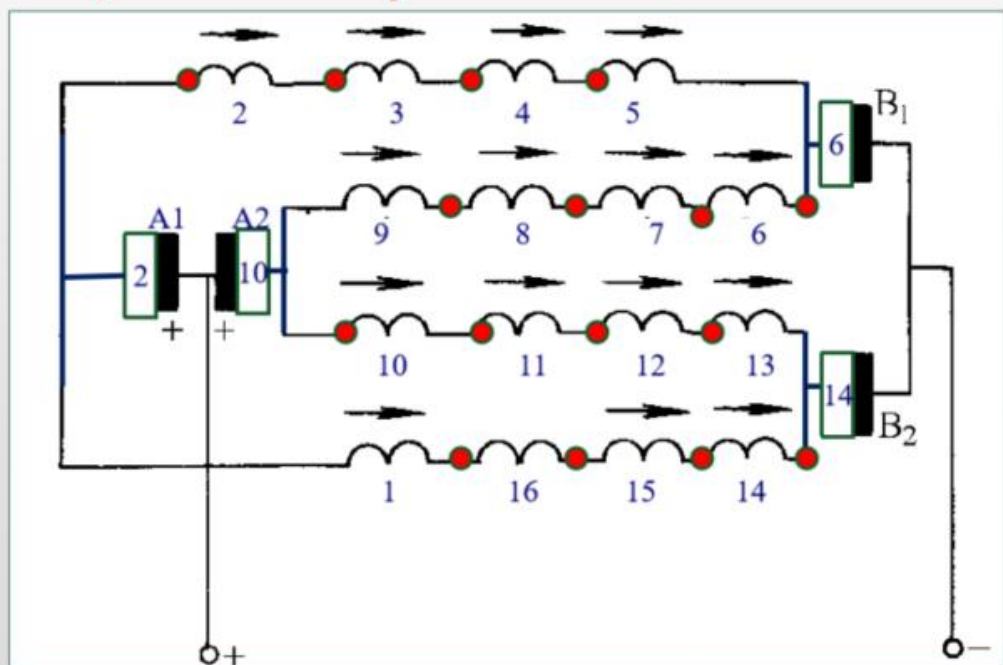
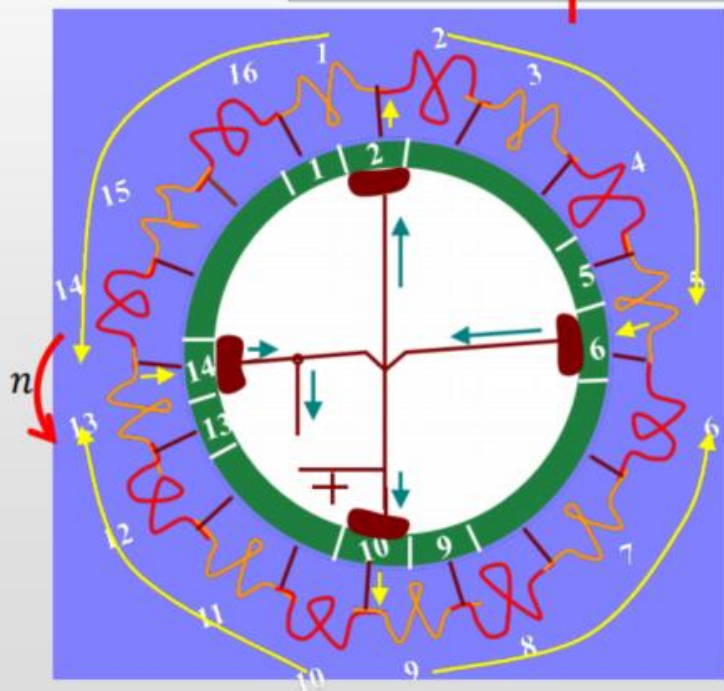
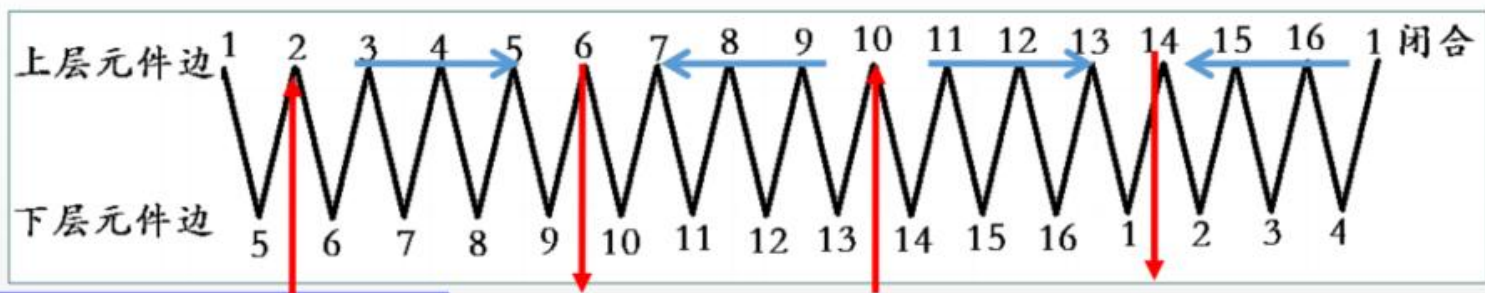




换向过程



换向结束



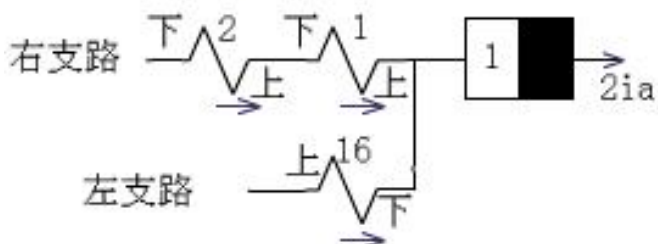
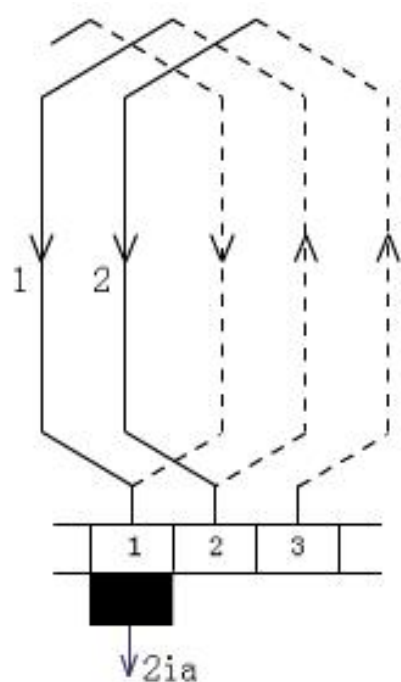
直流电机的换向

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。

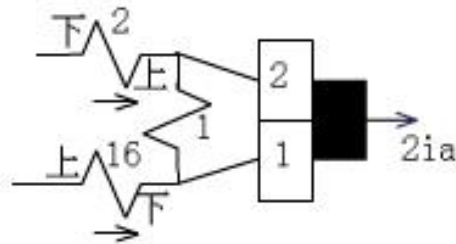
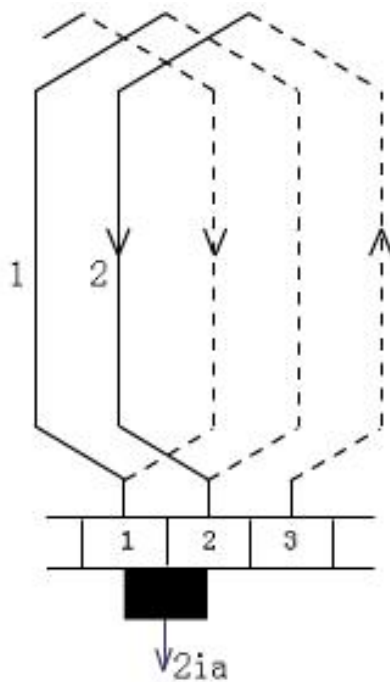
换向的过程即元件被电刷短路的过程。

换向不好会使电刷产生火花，火花严重时会影响电机运行

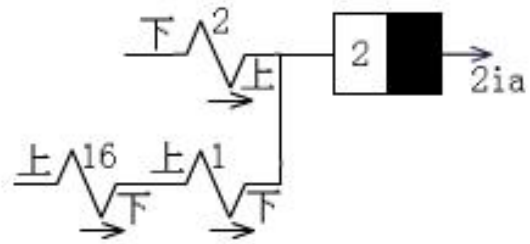
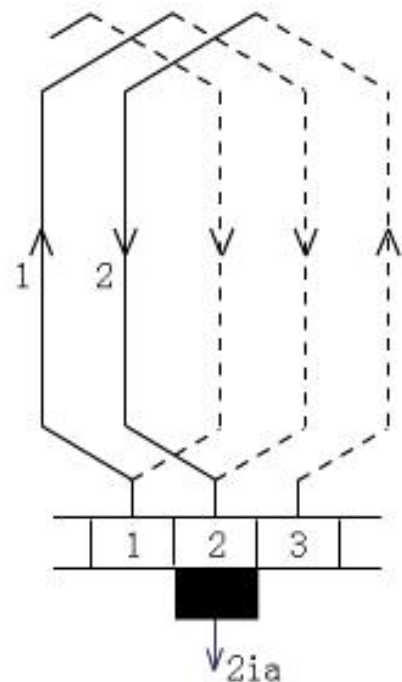
单叠绕组**1**号元件的换向过程，电刷宽度与换向片宽度相等，电枢以 v_a 的速度从右向左旋转。



(a) 换向前

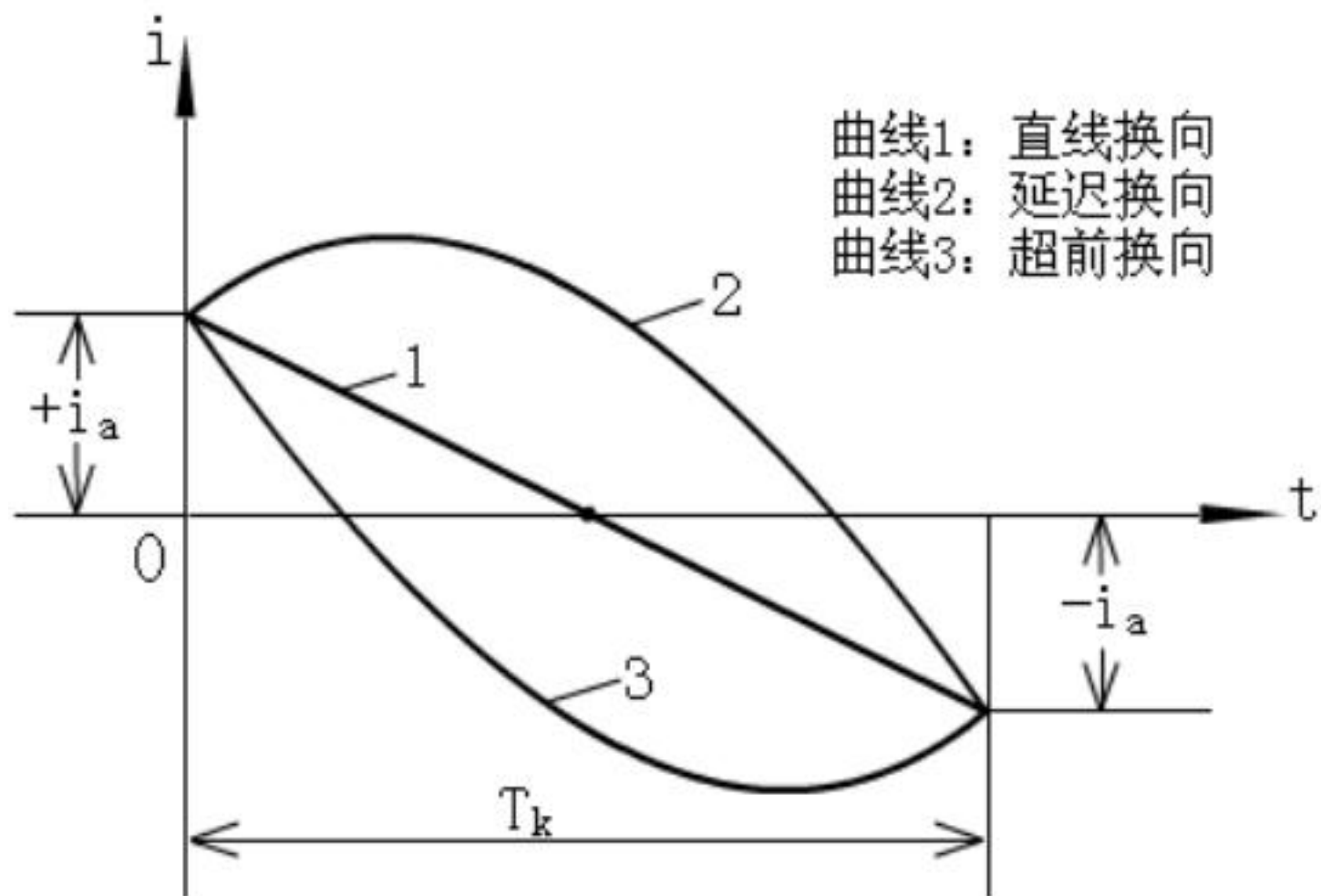


(b) 换向中



(c) 换向后

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

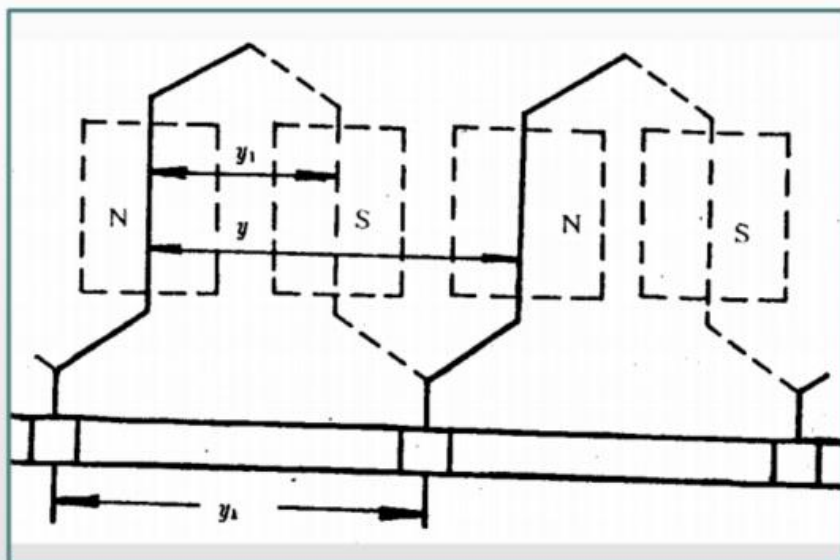
(1) 加换向磁极

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 β 角，使 $\beta > \alpha$ ，换向元件切割主磁场产生感应电动势，抵消电枢反应电动势和电抗电动势。

单波绕组



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

- 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

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。

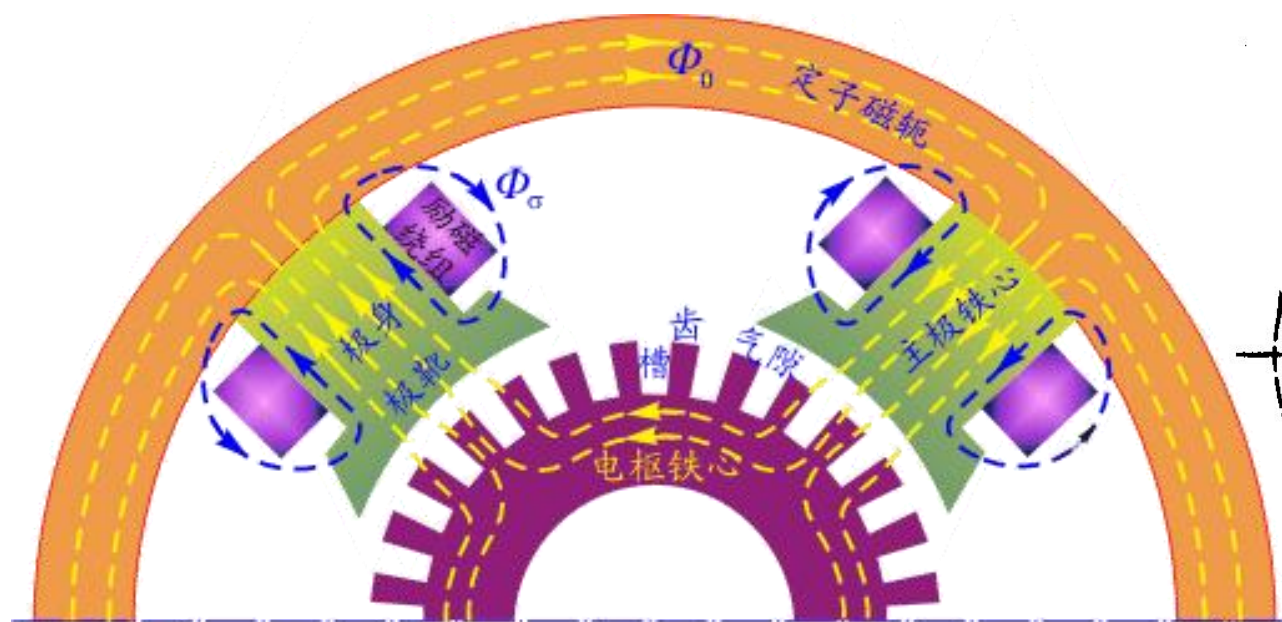
直流电机的电枢反应

1. 空载磁场（电动机空载，电枢电流为零）

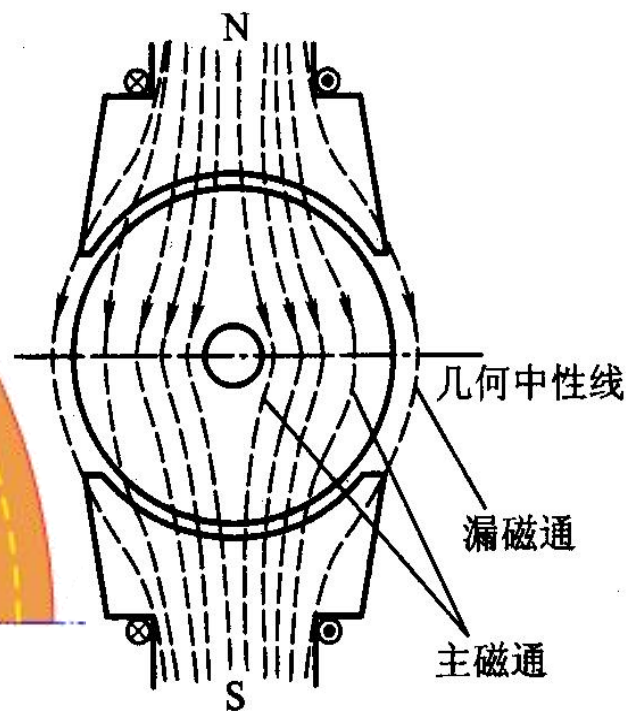
- ❖ **空载磁场：** 主磁极励磁绕组流过励磁电流产生的磁场，主磁极的磁动势为 $F = N_f I_f$ ，式中 N_f 是励磁绕组的匝数， I_f 是直流励磁电流。
- ❖ **主磁通 Φ_0 ：** 交链励磁绕组和电枢绕组，在电枢绕组中感应电动势，实现机电能量转换。
- ❖ **漏磁通 Φ_σ ：** 不进入电枢铁心，不和电枢绕组交链，因此不感应电动势产生电磁转矩。它只是增加主磁极磁路的饱和程度

❖ 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



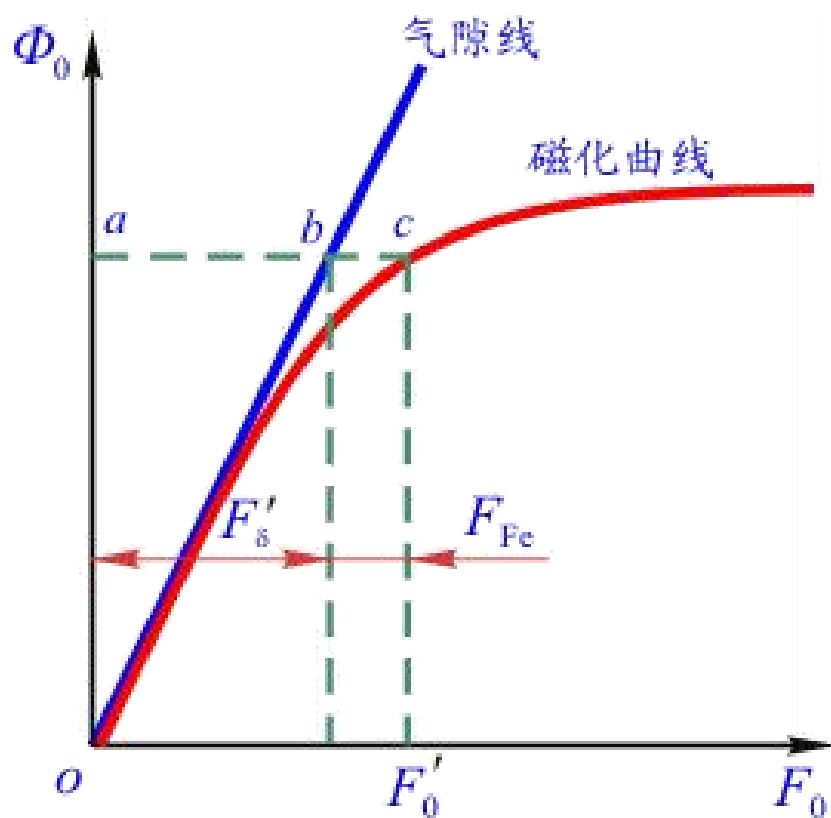
一台四极直流电机中的空载磁场分布(1/2模型)



(c) 主磁通与漏磁通

❖ 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。



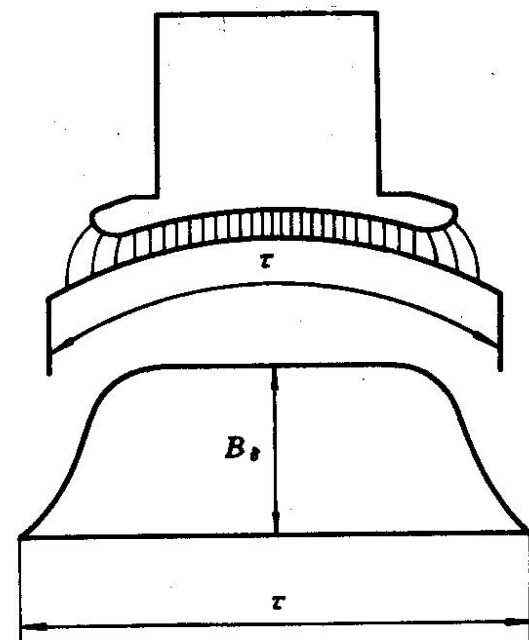
直流电机的磁化曲线

❖ 气隙磁通密度沿电枢周围分布

忽略电枢齿槽影响，假定电枢表面光滑，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 δ 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。

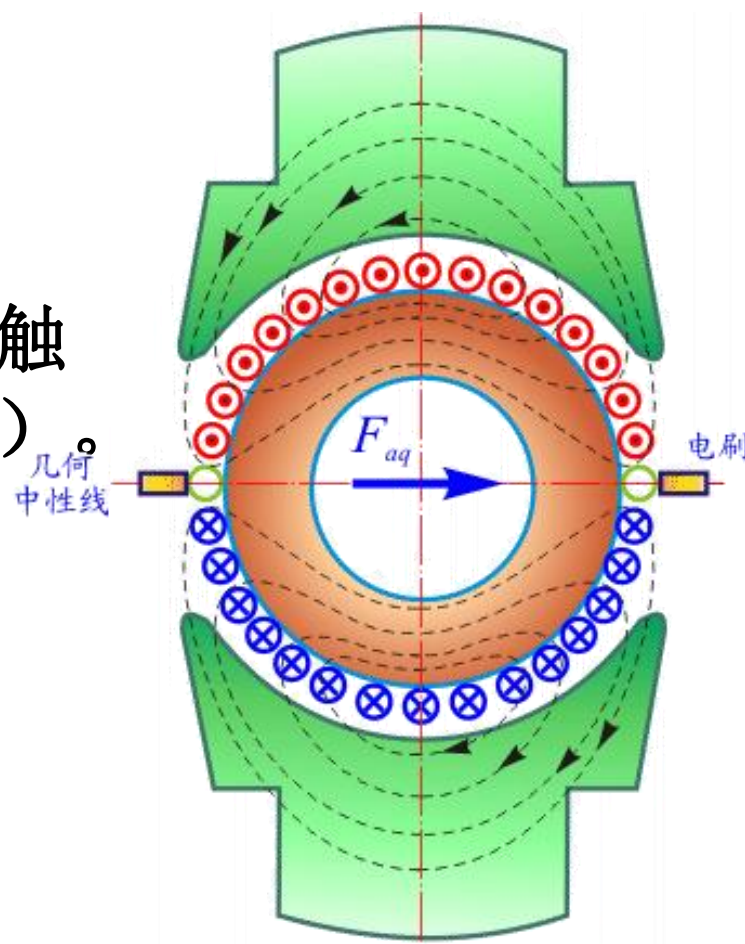
❖ 电刷位于几何中心线时电枢磁场

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。



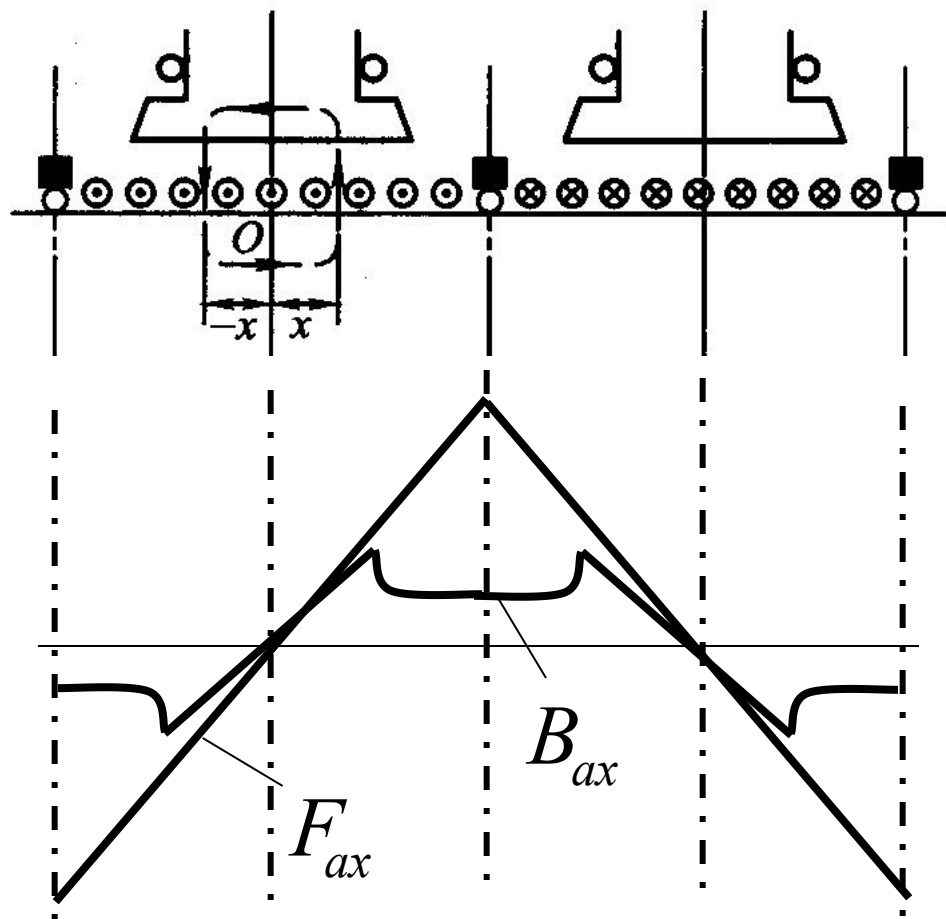
电刷在几何中性线上的电枢磁场

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: $B_{ax}=\mu_0 F_{ax}/\delta$

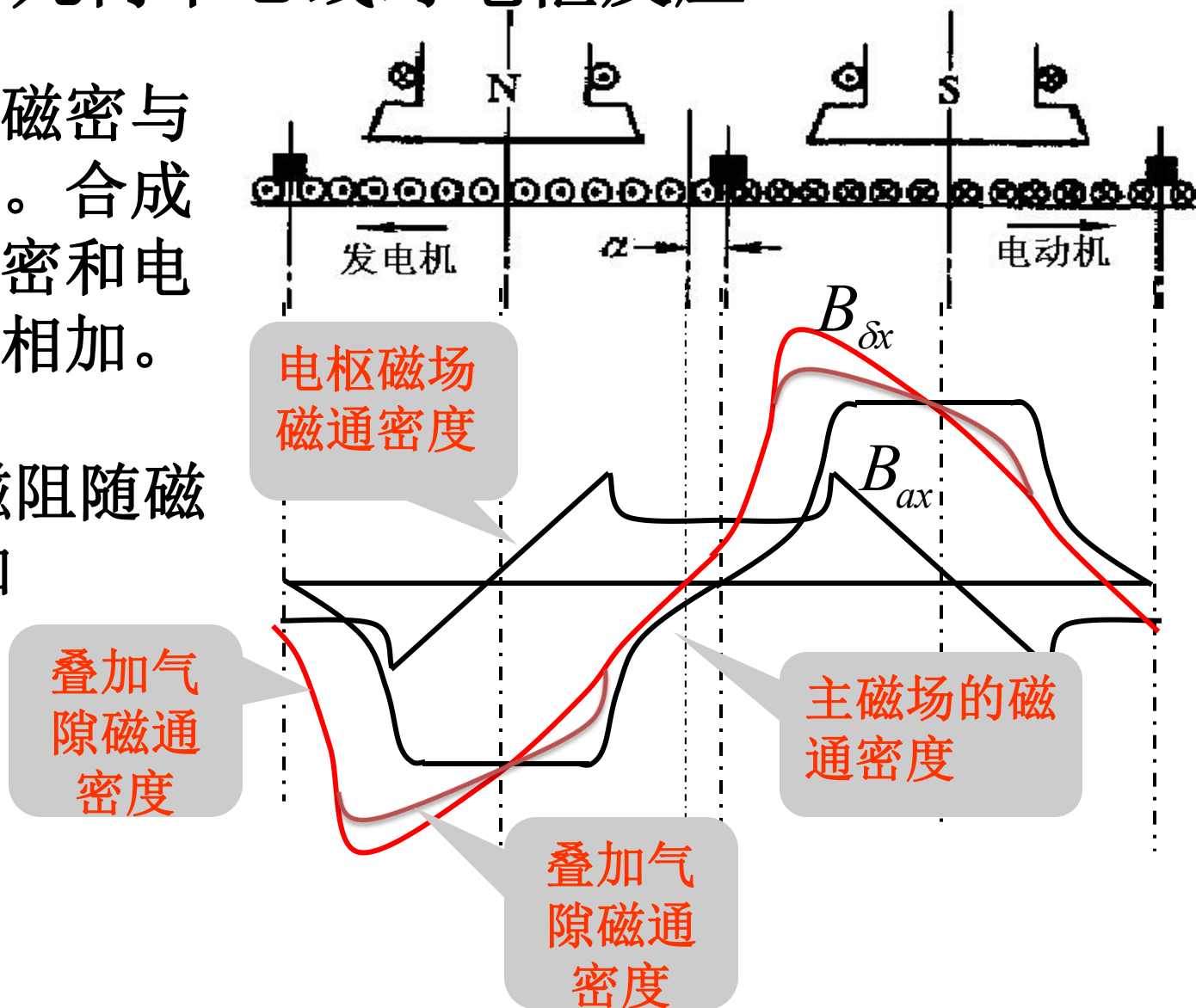
一个周期的磁密波形呈马鞍形。



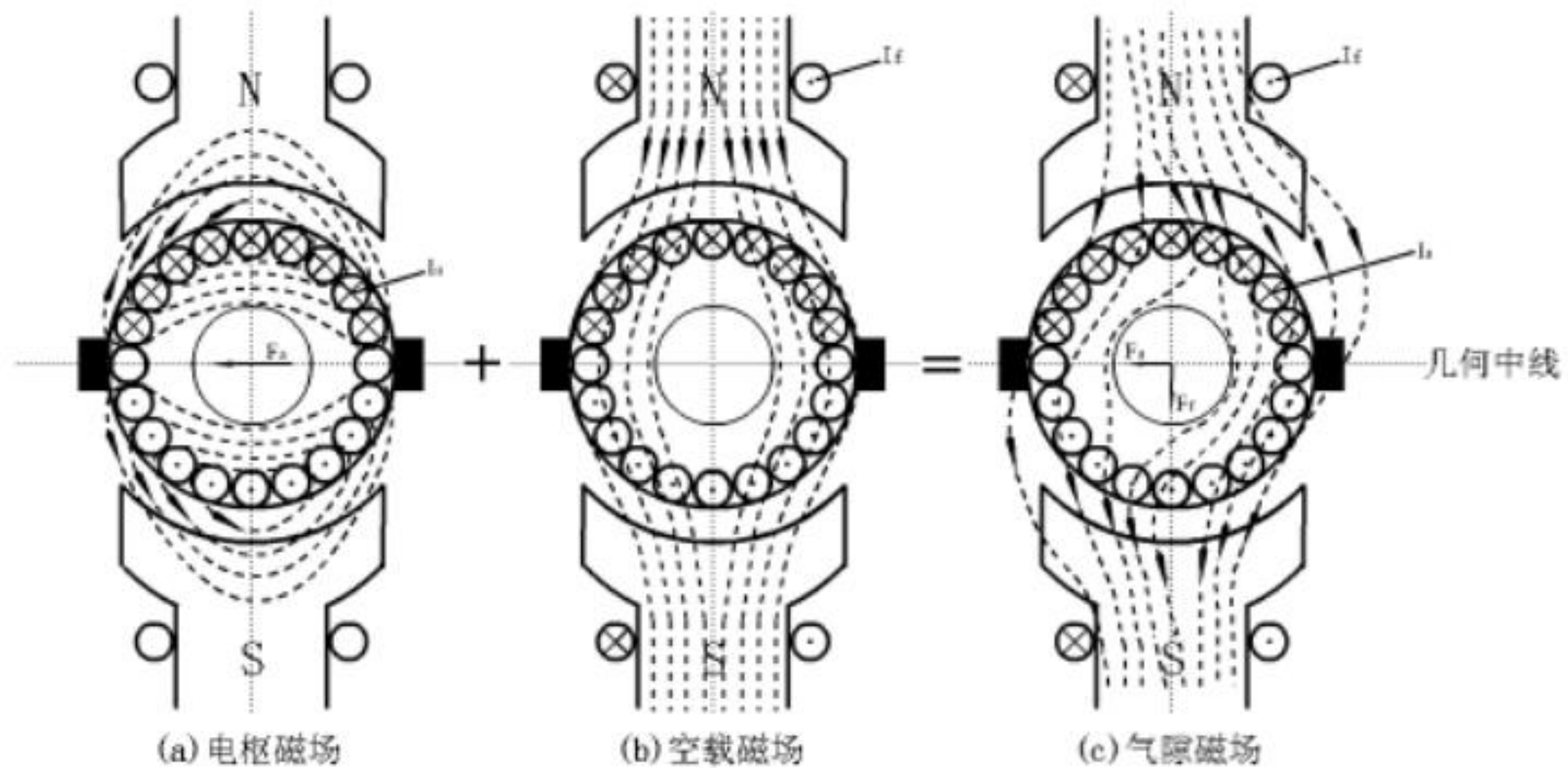
❖ 电刷位于几何中心线时电枢反应

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削弱的数量，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 α 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。

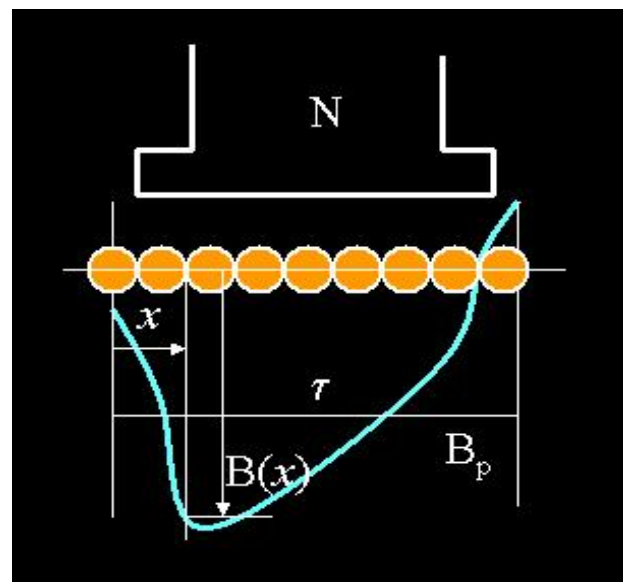
总导体数为 N ，并联支路数为 $2a$ ，每根导体平均电动势为 e_{av} ，则支路刷间电动势为 E_a ：

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

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

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

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} ：

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

导体平均受转矩为：

$$T_{av} = \frac{D}{2} B_{av} l i_a$$

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

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:

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

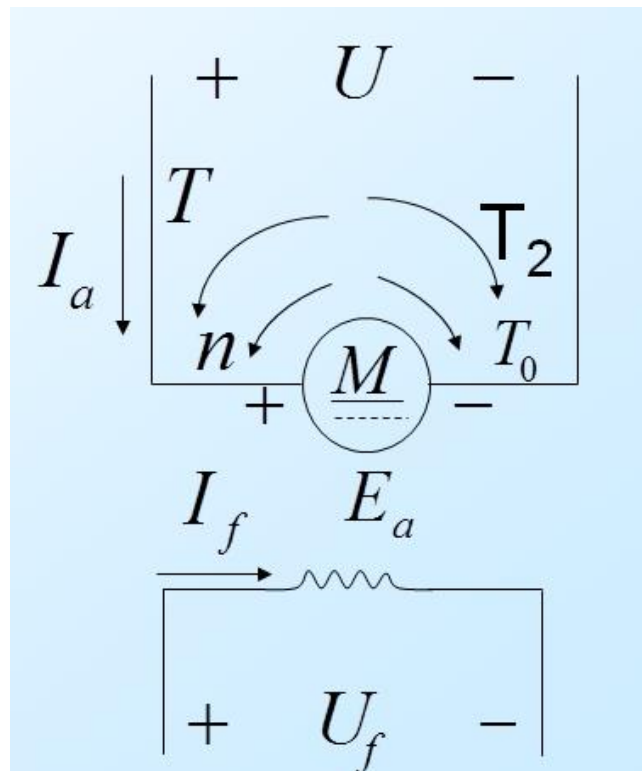
例1. 1
P22

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 Ω 有

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

$$P_M = P_2 + p_0$$

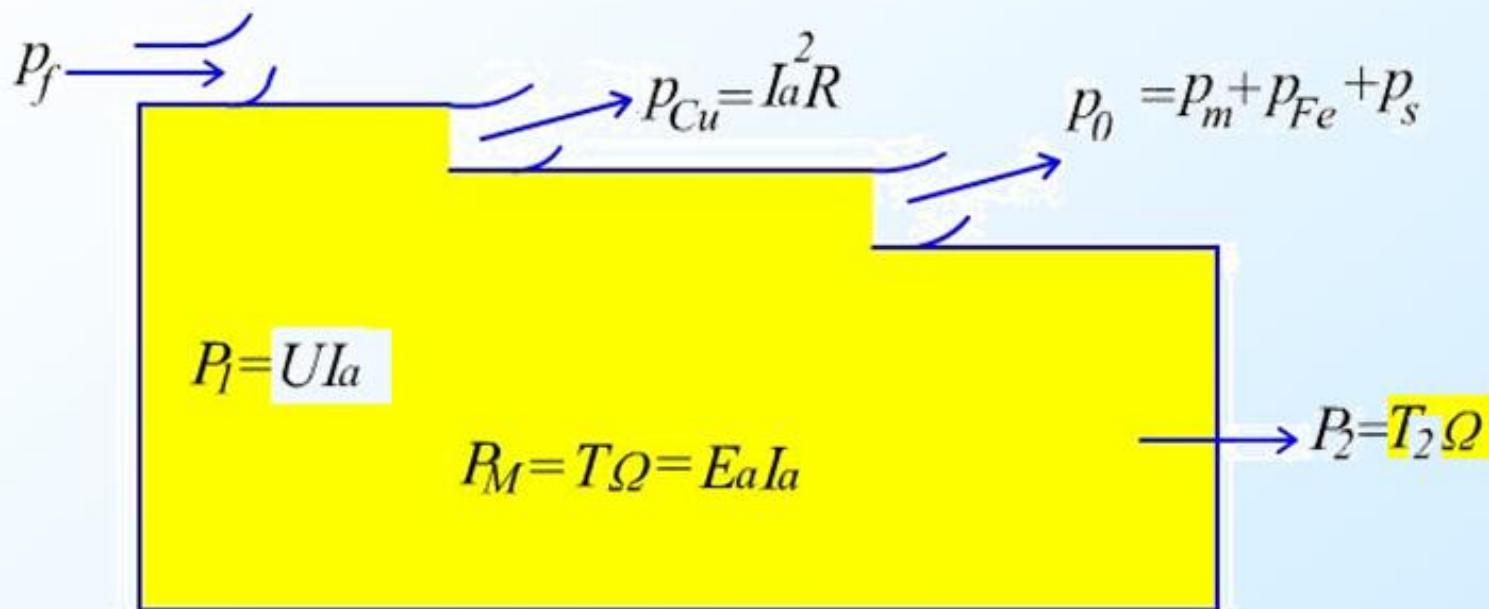
$p_0 = p_m + p_{Fe} + p_s$ 为空
载损耗

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

(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。

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

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

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

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

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。

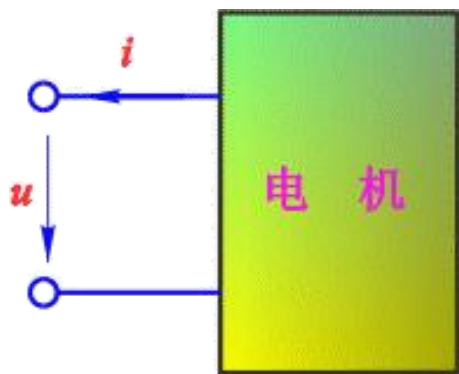
如果用原动机拖动电枢恒速旋转，就可以从电刷端引出直流电动势而作为直流发电机。

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。

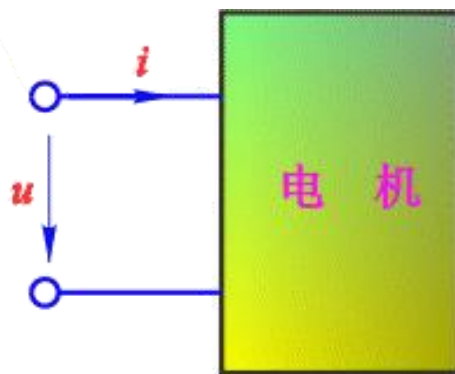
直流电机正方向规定：

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