



- 一、直流电机的用途及基本工作原理
- 二、直流电机的主要结构和型号
- 三、直流电机的磁路、空载时的气隙磁密与空载磁化特性
- 四、直流电机的电枢绕组**
- 五、电枢电动势与电磁转矩
- 六、直流发电机
- 七、直流电动机运行原理
- 八、他励直流电动机的机械特性
- 九、串励和复励直流电动机
- 一〇、直流电机的换向



四. 直流电机的电枢绕组

本节学习要点：

1. 掌握直流电机电枢绕组的基本数据
2. 了解单叠绕组和单波绕组的绕制规律*
3. 了解单叠绕组和单波绕组的特点



概述

■ 直流绕组设计的**基本要求及类型**

基本要求

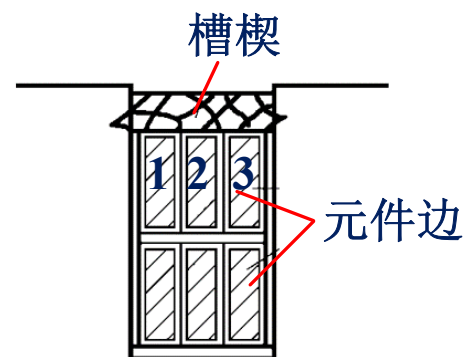
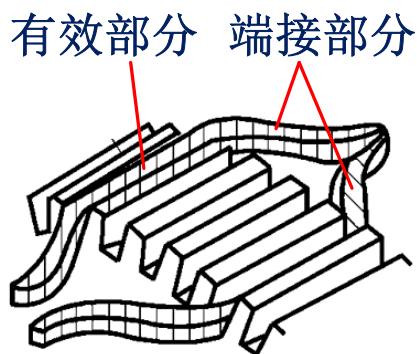
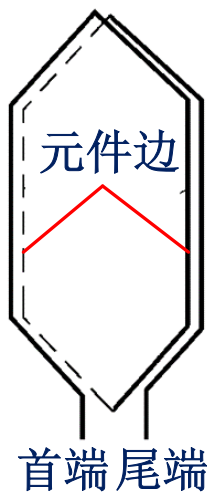
- ☞ 一定的导体数下能产生足够大的电势，并具有良好的波形。
- ☞ 结构简单，下线方便，便于维护和检修。
- ☞ 强度（机械、电气、热）高，运行可靠。
- ☞ 能通过规定的电流。能产生足够大的电磁转矩。

基本类型

- ☞ 叠绕组
- ☞ 波绕组

直流电机电枢绕组的几个术语

绕组元件：首、末端分别与一片换向片相连的**单匝** ($N_y = 1$) 或**多匝**线圈。



☞ **元件数 (线圈数) S** = 换向片数 K

☞ **全部导体数 z** = $2uN_yZ = 2N_yZ_e$,

Z : 电枢的总**实槽数**, Z_e : 电枢的**总虚槽数**

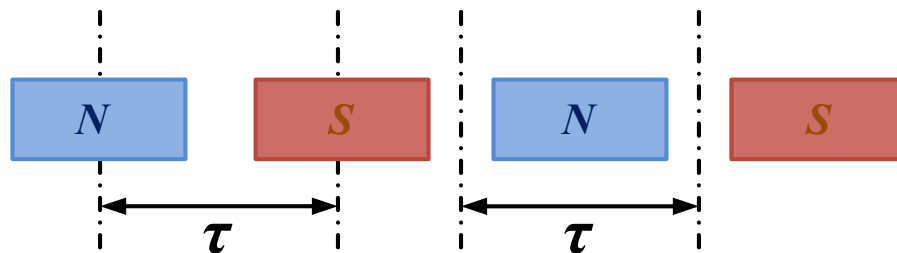
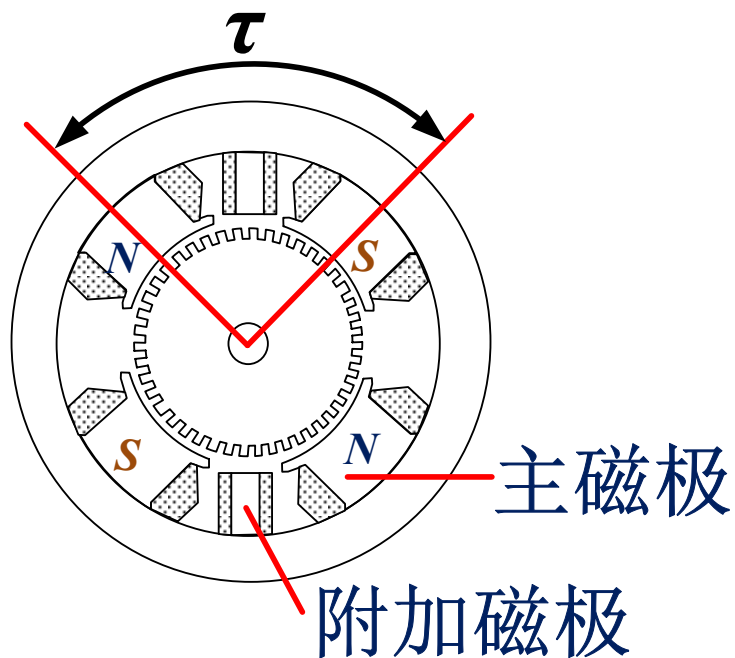
N_y : 元件的匝数, u : 一个实槽中的**虚槽数**

极距 τ : 相邻两个**主磁极**轴线间的距离。用**槽数**表示:

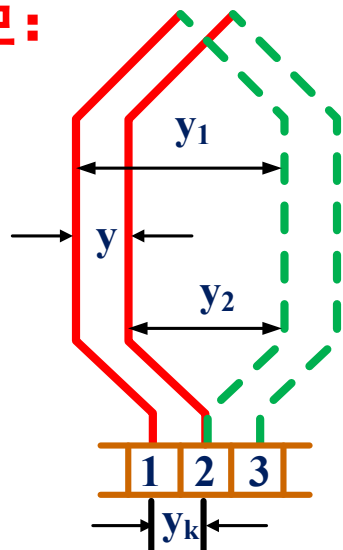
$$\tau = \frac{Z}{2p}$$

Z : 电枢的**总槽数**

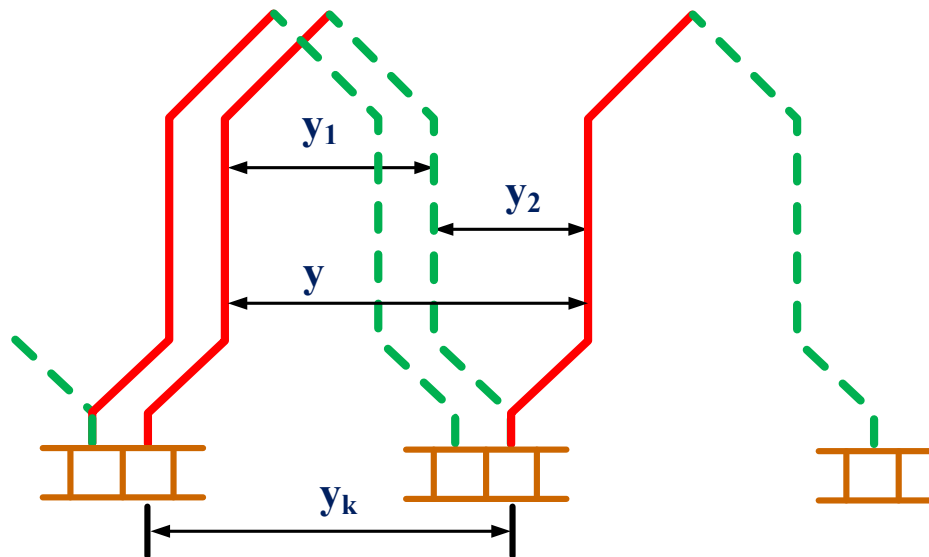
p : 主磁极的**极对数**



几个节距：



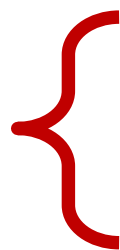
叠绕组



波绕组

第一节距（跨距） y_1 ：同一线圈的两边在电枢表面跨过的槽数。

$$y_1 = \frac{Z}{2p} + \varepsilon = \text{整数}$$



$$\varepsilon=0, y_1 = \tau$$

整距绕组

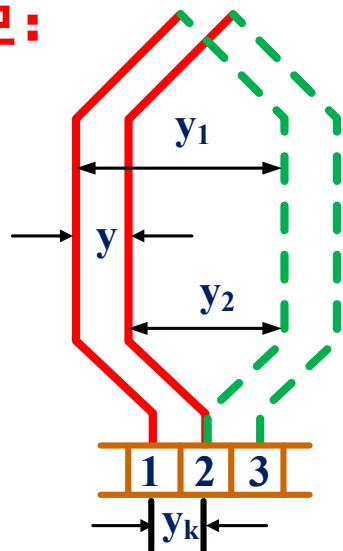
$$\varepsilon<0, y_1 < \tau$$

短距绕组（常采用）

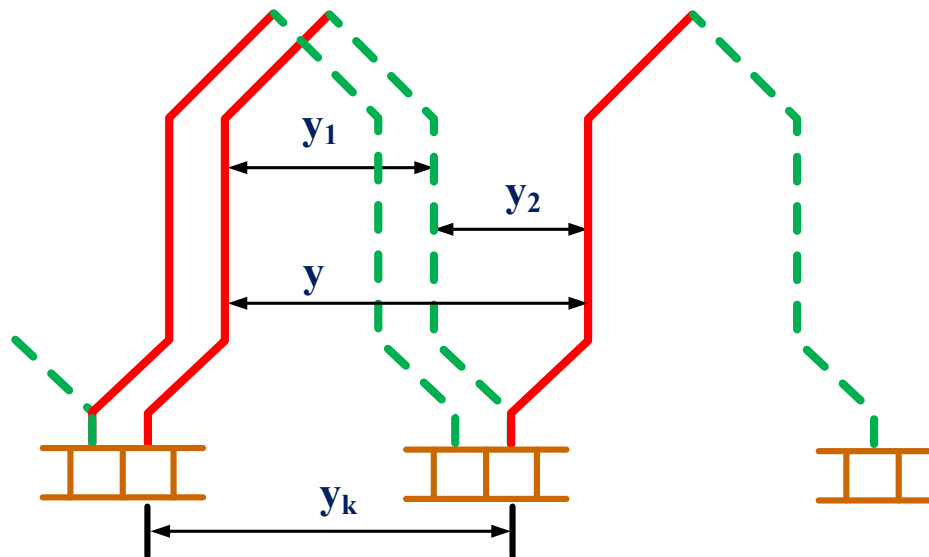
$$\varepsilon>0, y_1 > \tau$$

长距绕组

几个节距：



叠绕组



波绕组

- ❏ 第二节距 y_2 ：接在同一换向片上的两个线圈中，第一线圈的下层边到第二线圈的上层边跨过的槽数。
- ❏ 合成节距 y ：直接连接的两个线圈的对应线圈边所跨过的槽数。
- ❏ 换向器节距 y_k ：用换向片数表示的每个线圈的首、末端所连接的换向片在换向器表面的距离。



1、单叠绕组

① 绕组数据计算

② 绕组连接表

③ 绕组展开图

④ 并联支路数



已知直流电机极数 $2p=4$, $Z=S=K=16$, 试画 右行 单叠绕组展开图。

① 绕组数据计算

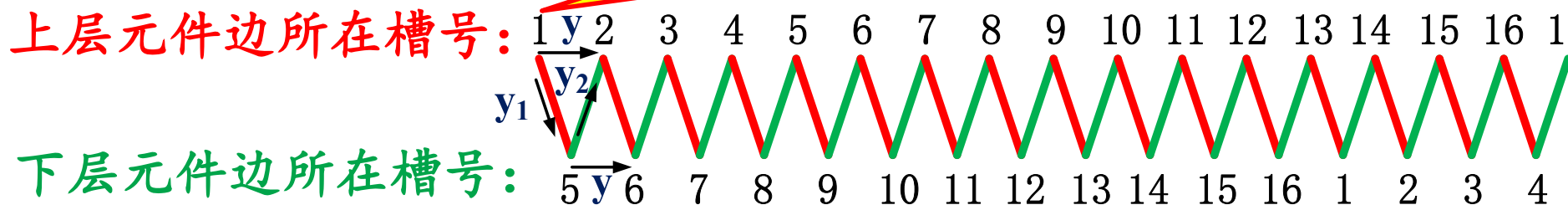
$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{16}{4} = 4 \quad \text{单叠:} \quad y = y_k = 1$$

$$y_1 = \frac{Z}{2p} = 4 \quad (\text{整距})$$

$$y_2 = y - y_1 = 1 - 4 = -3$$

② 绕组连接表

绕电枢一周后，所有元件互相串联构成闭合回路。



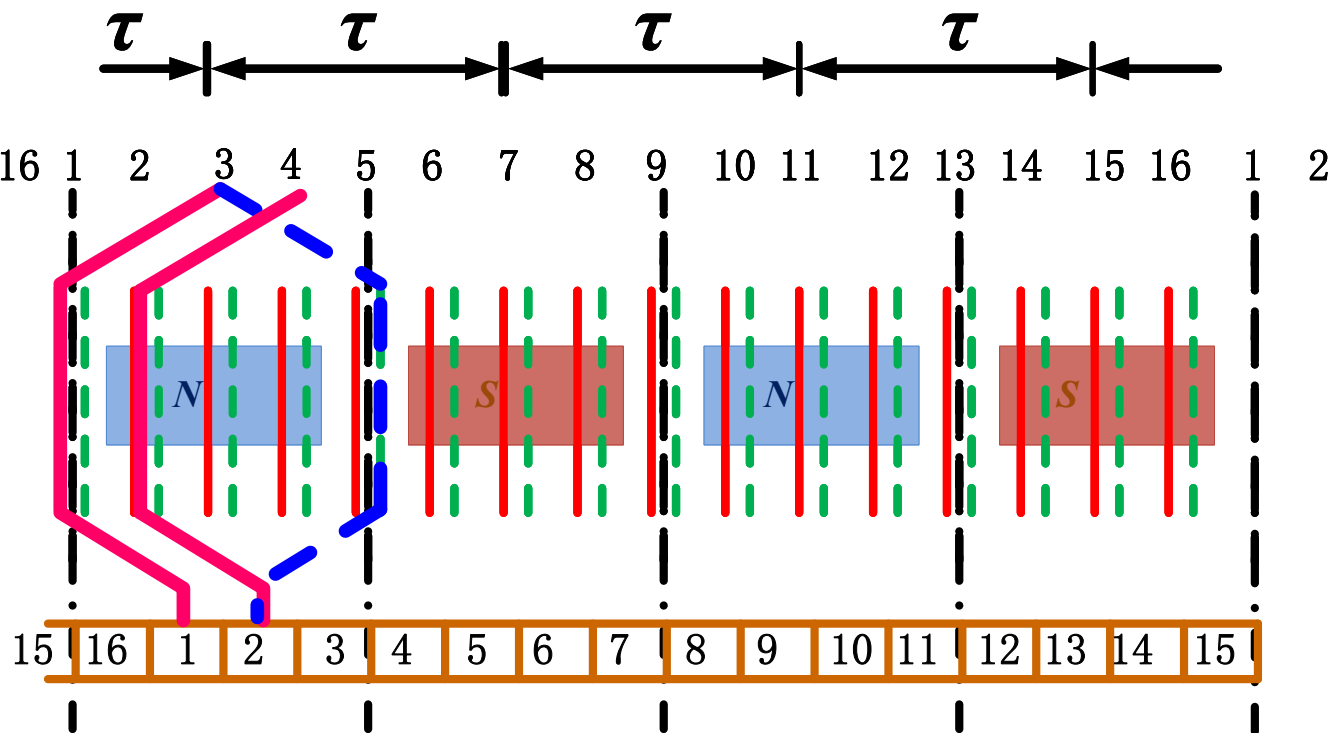
③ 绕组展开图 (六步骤)



单叠绕组展开图 ($2p=4$ $S=K=Z=16$)

第一步：画槽。

画16根绕组边，上层边用实线，下层边用虚线，标出槽编号。



第二步：放磁极。标明 N, S 极性， τ 表示极距。

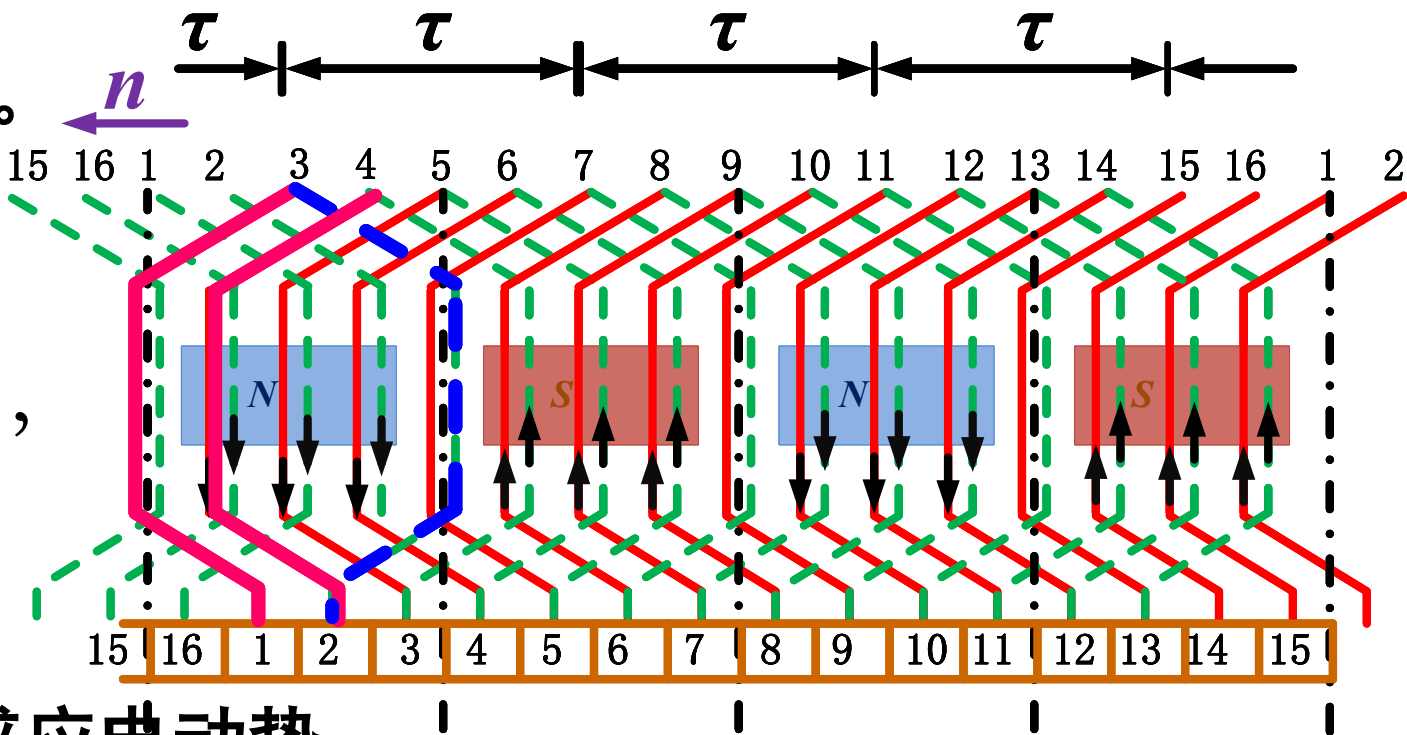
第三步：画换向片。画16个并标上号码。

$$y_1 = 4, y = 1, y_2 = -3$$

单叠绕组展开图 ($2p=4$ $S=K=Z=16$)

第四步：连线。

画第一换向片、第一槽上层边开始，按第一节距右行连接。



第五步：画感应电动势。

根据电枢转向，按照右手定则确定每个元件边导体感应电动势的方向。

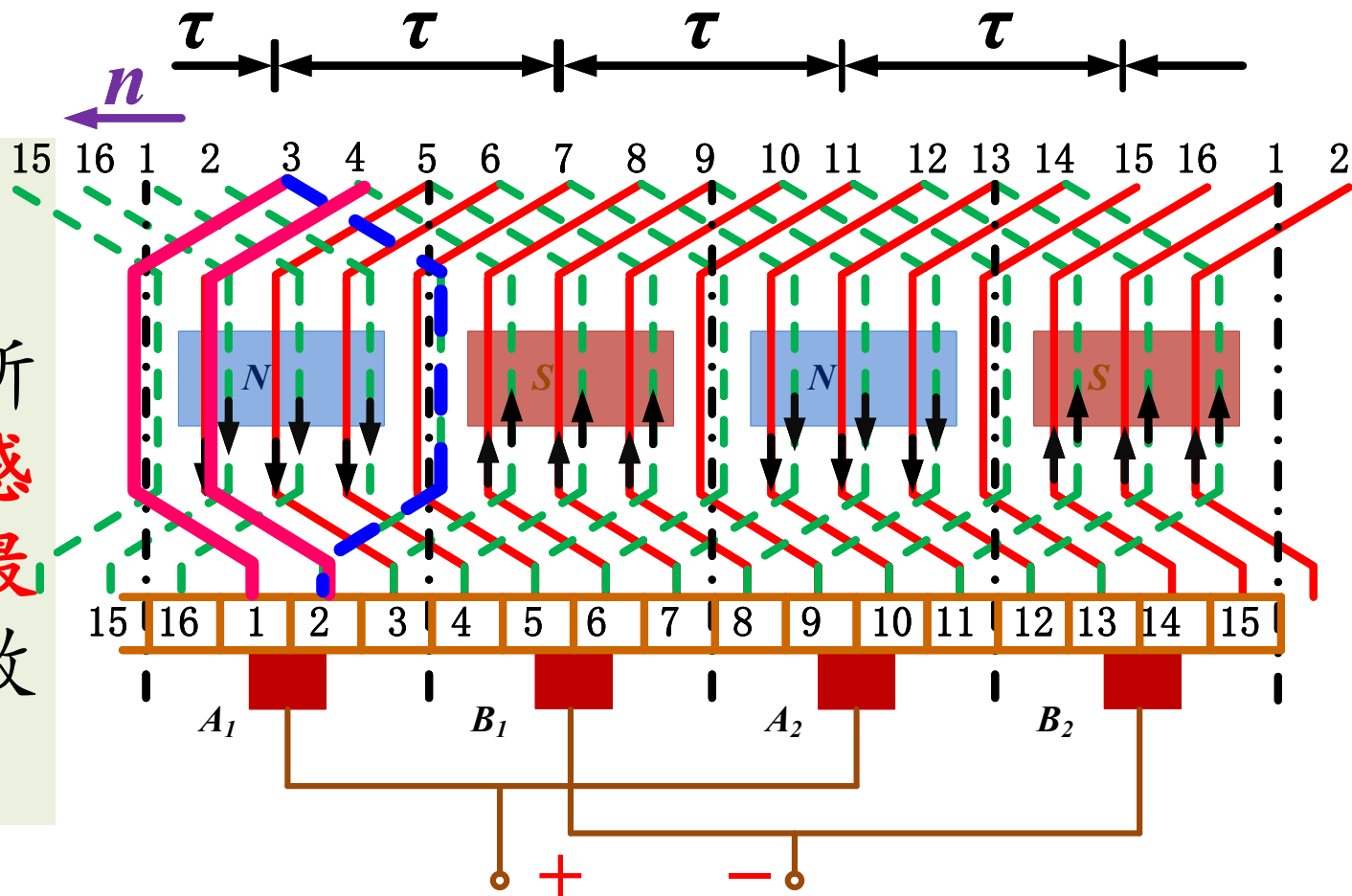
$$y_1 = 4, y = 1, y_2 = -3$$



单叠绕组展开图 ($2p=4$ $S=K=Z=16$)

第六步：放电

按被电刷所
短路元件感
应电动势最
小的原则放
电刷。

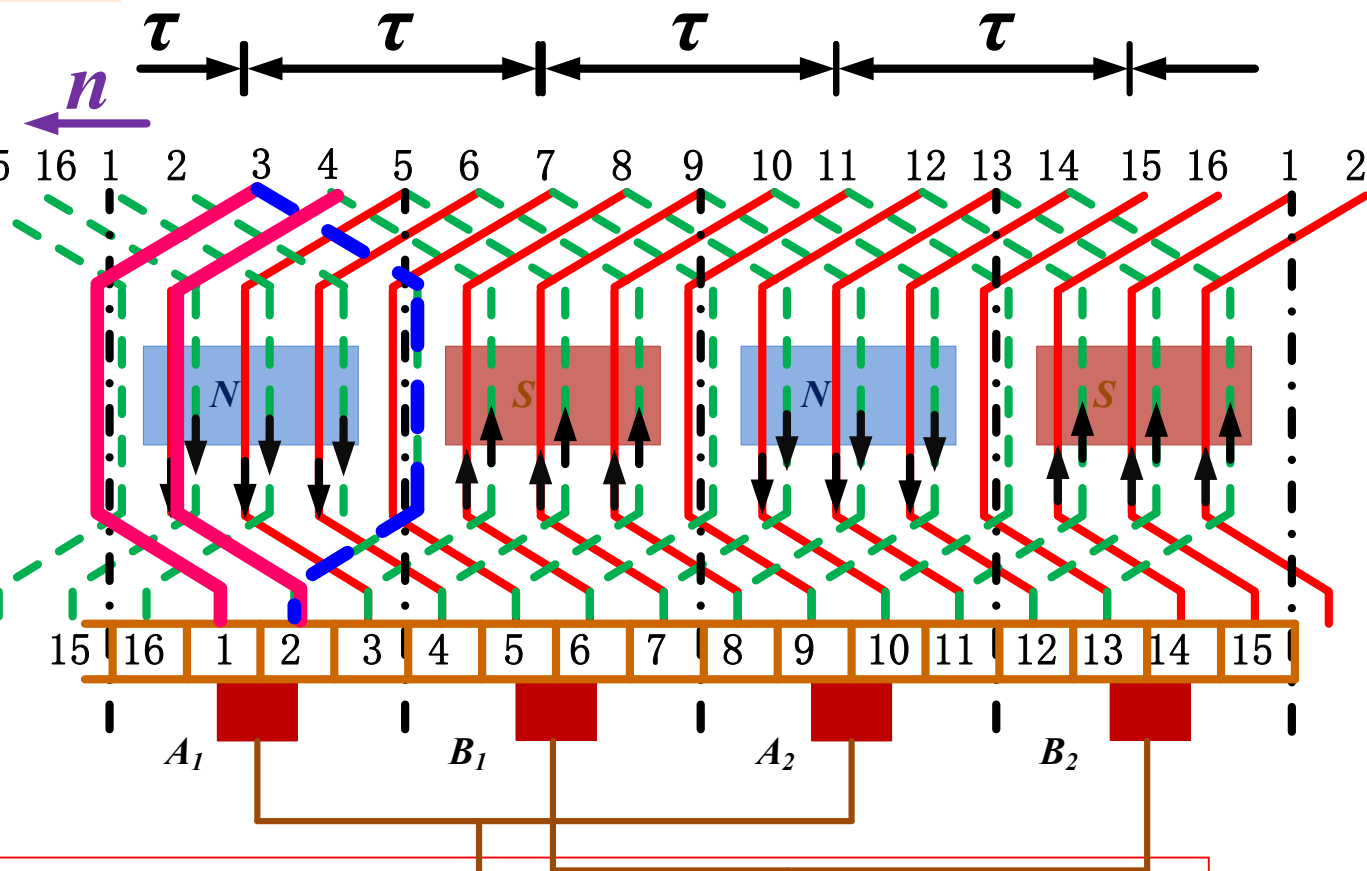


$$y_1 = 4, y = 1, y_2 = -3$$

④ 并联支路数

$$a \text{ (并联支路对数)} = p \text{ (极对数)}$$

上元件边在同一个主极下的各元件(具有方向相同的电动势), 依次串成一条支路, 故一个主极对应一条支路, 共 $2p$ 条并联支路。

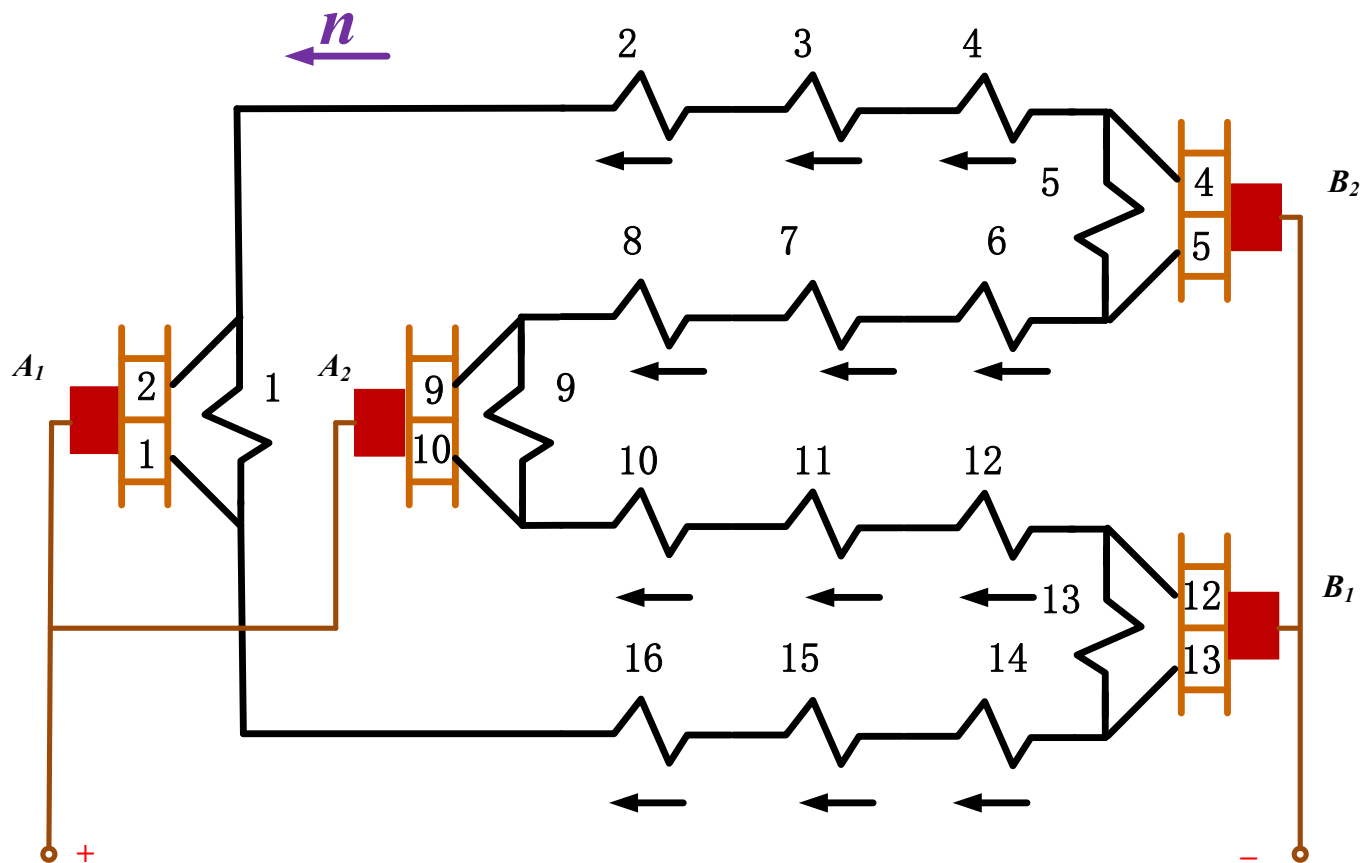


被电刷短路元件: 1, 5, 9, 13

四条并联支路: 2-3-4, 6-7-8, 10-11-12, 14-15-16

被电刷短路元件：1,5,9,13

四条并联支路：2-3-4, 6-7-8, 10-11-12, 14-15-16



单叠绕组并联支路图



2、单波绕组

① 绕组数据计算

② 绕组连接表

③ 绕组展开图

④ 并联支路数



已知直流电机极数 $2p=4$, $Z=S=K=15$, 试画左行单波绕组展开图。

① 绕组数据计算

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{15}{4} = 3\frac{3}{4}$$

单波:

$$y = y_k = \frac{K \pm 1}{p} = \text{整数}$$

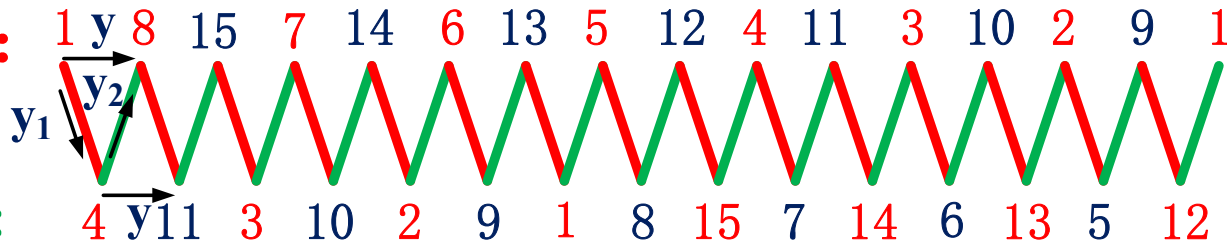
$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon = \frac{15}{4} - \frac{3}{4} = 3 \quad (\text{短距})$$

$$y = y_k = \frac{15 - 1}{2} = 7$$

$$y_2 = y - y_1 = 7 - 3 = 4$$

② 绕组连接表

上层元件边所在槽号:



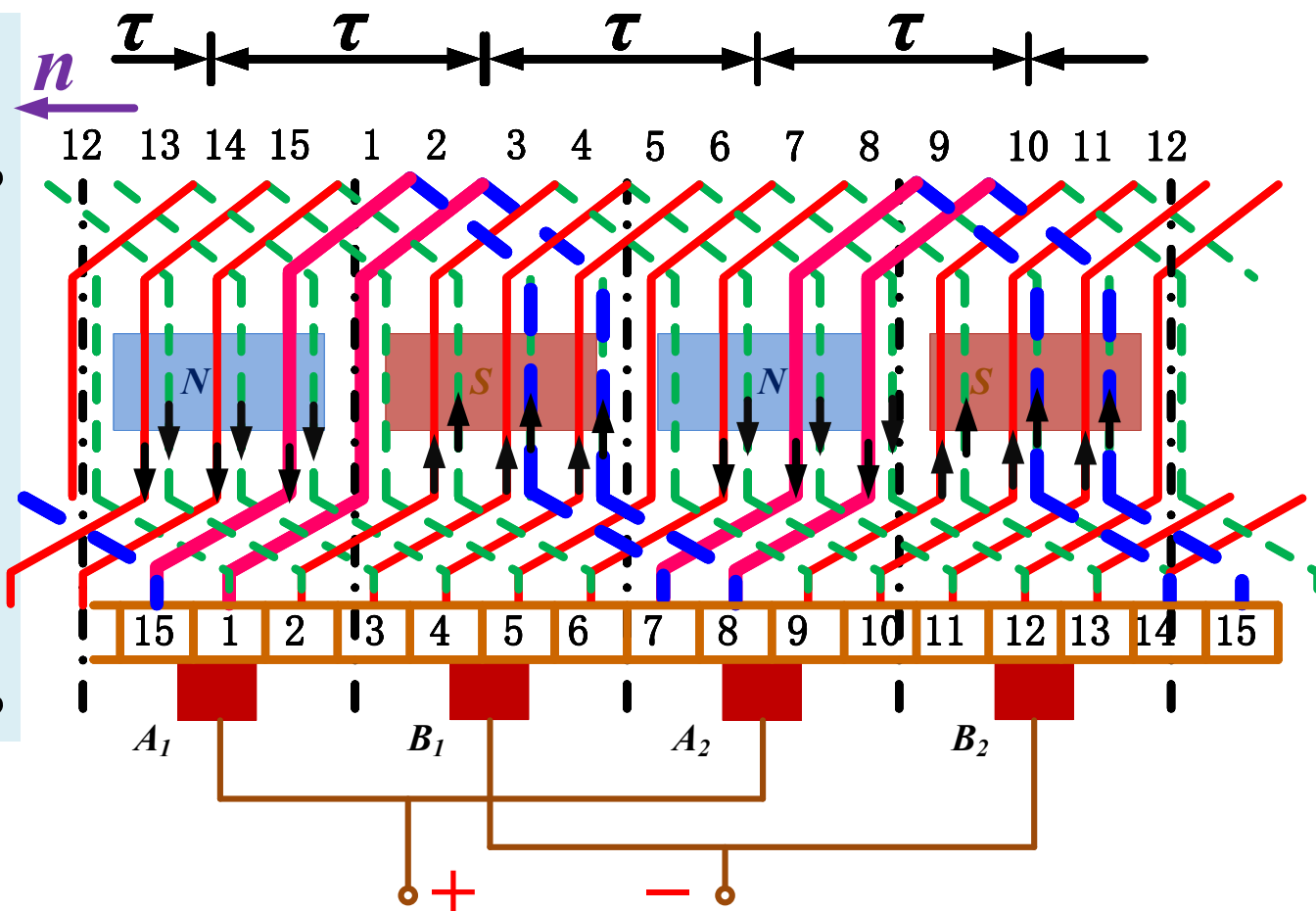
下层元件边所在槽号:

③ 绕组展开图 (六步骤)

单波绕组展开图 ($2p=4$ $S=K=Z=15$)

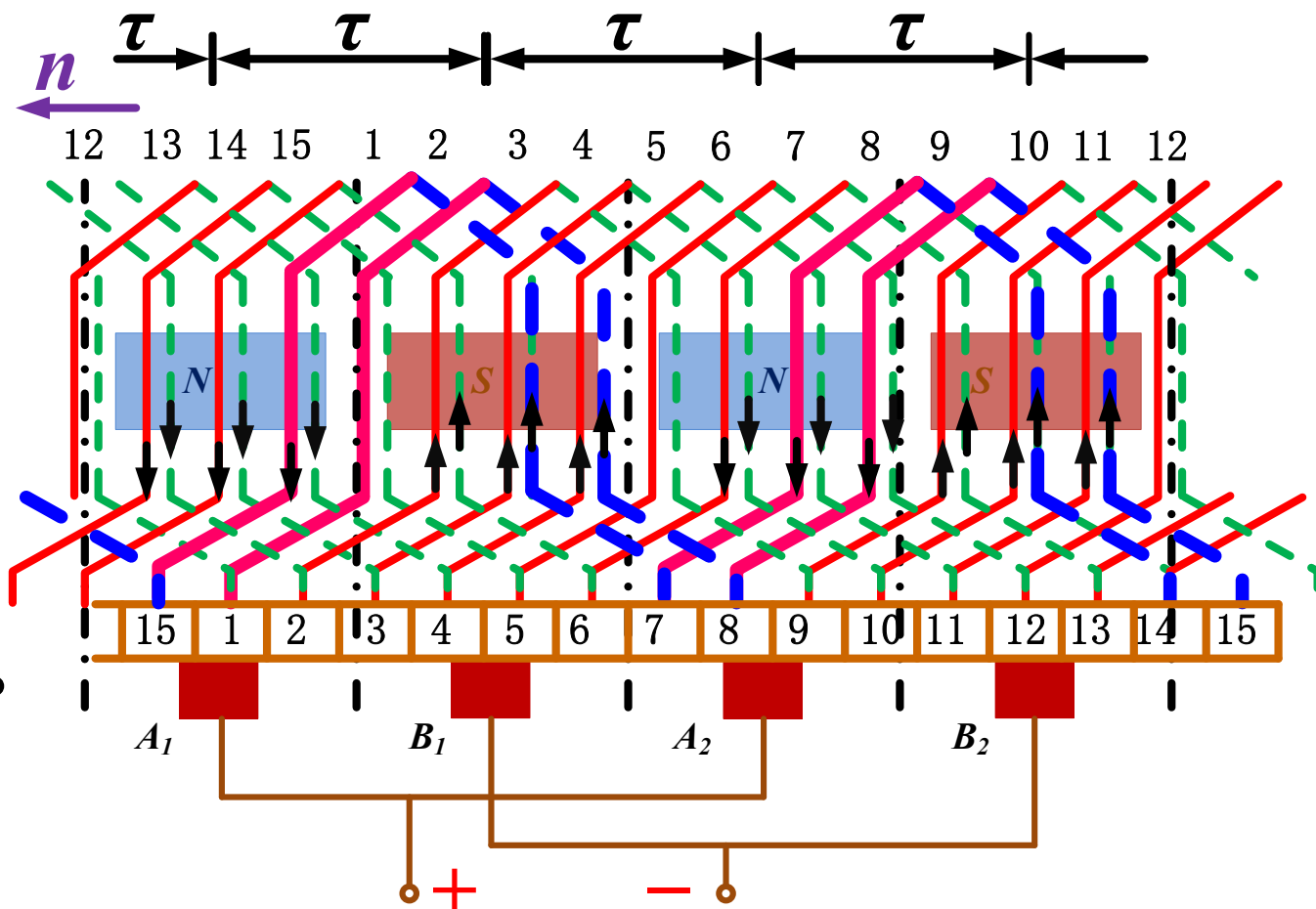
$$y_1 = 3, \quad y = 7, \quad y_2 = 4。$$

- 第一步：画槽。
- 第二步：放磁极。
- 第三步：画换向片。
- 第四步：连线。
- 第五步：标感应电动势。
- 第六步：放电刷。



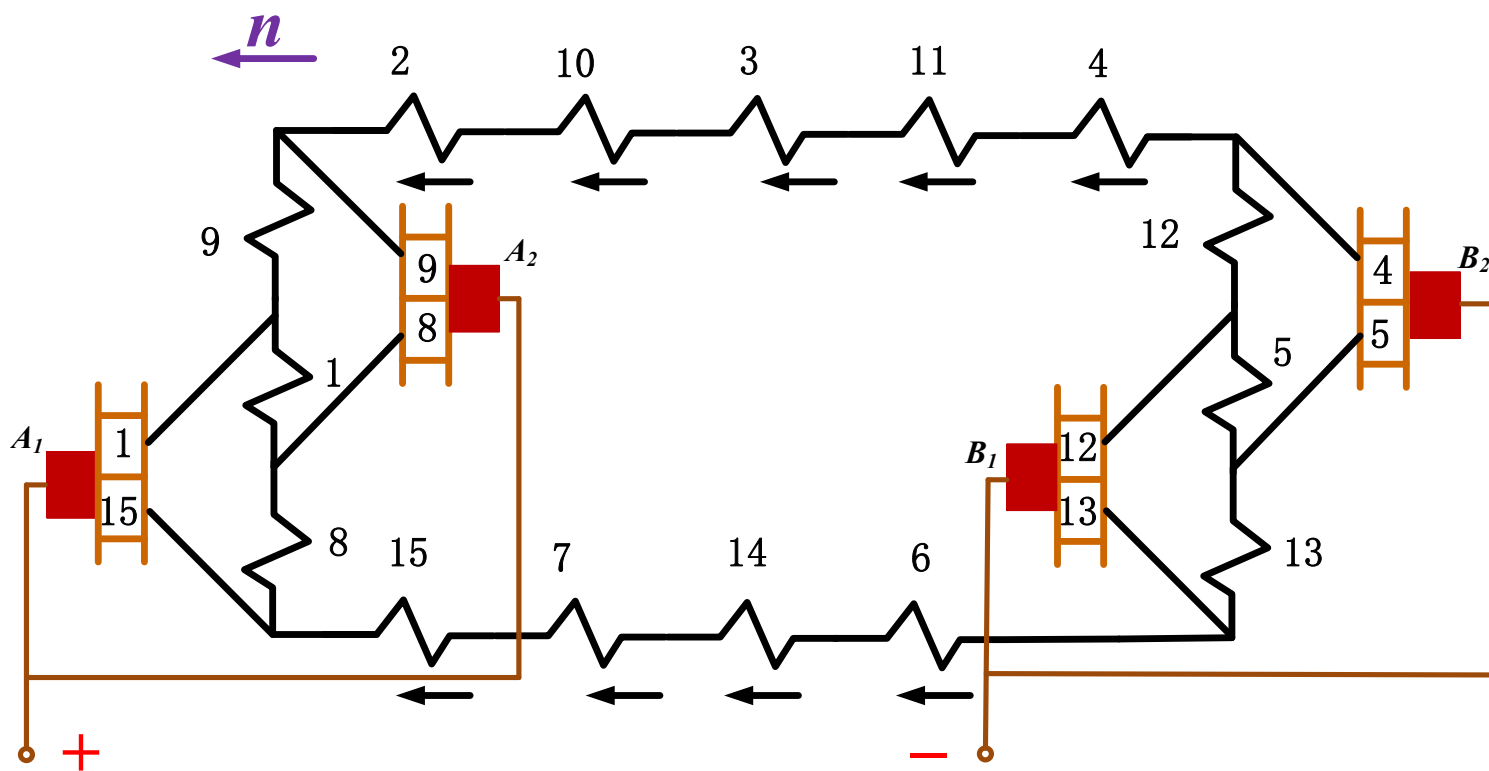
④ 并联支路数

单波绕组将所有 N 极下的元件串成一条支路，将所有 S 极下的元件串成另一支路，故支路对数恒为1，即 $a = 1$ 。



被电刷短路元件：8,1,9,12,5,13

四条并联支路：2-10-3-11-4, 6-14-7-15



单波绕组并联支路图



★单叠绕组和单波绕组的特点

单叠绕组

并联支路对数

$$a = p$$

电枢电流

$$I_{\text{电枢}} = 2ai_{\text{支路}}$$

电刷放置

元件几何形状对称时
电刷应放在与主极中心线对准位置，此时正、负刷间感应电势最大，被电刷短路的元件感应电势最小。

电刷杆数

需 $2p$ 个电刷

适用场合

中等容量，低电压
大电流。

单波绕组

$$a = 1 \quad (\text{与 } p \text{ 无关})$$

$$I_{\text{电枢}} = 2i_{\text{支路}}$$

元件几何形状对称时
电刷应放在与主极中心线对准位置，此时正、负刷间感应电势最大，被电刷短路的元件感应电势最小。

理论上只需2只，实际仍用 $2p$ 只。（减小电刷表面电流密度；减少换向器用铜量）

小容量，高电压小电流



- 一、直流电机的用途及基本工作原理
- 二、直流电机的主要结构和型号
- 三、直流电机的磁路、空载时的气隙磁密与空载磁化特性
- 四、直流电机的电枢绕组
- 五、电枢电动势与电磁转矩**
- 六、直流发电机
- 七、直流电动机运行原理
- 八、他励直流电动机的机械特性
- 九、串励和复励直流电动机
- 一〇、直流电机的换向



五. 电枢电动势与电磁转矩

本节学习要点：

1. 掌握直流电机的**电枢电动势**的概念和计算
2. 掌握直流电机的**电磁转矩**的概念和计算
3. 理解直流电机的**电枢反应**

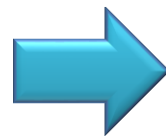


1、电枢电动势

定义：电机正、负电刷之间的直流电动势，其大小为一条支路内**所有串联导体感应电动势之和**，故也是**支路电动势**。

推导思路：

串联导体
总感应电
动势 E_a



单个导体
平均感应
电动势 e_{av}



平均感应电动势
 $e_{av} = B_{av} l_i v$



已知条件：

$$B_{av} = \frac{\Phi}{S}$$
$$l_i$$
$$v = 2p\tau \frac{n}{60}$$



1、电枢电动势

一个磁极极距范围内的平均磁密 B_{av} :

$$B_{av} = \frac{\Phi}{\tau l_i}$$

$\tau \rightarrow$ 极距

$l_i \rightarrow$ 电枢轴向有效长度

$\Phi \rightarrow$ 每极磁通

一根导体的平均感应电动势 e_{av} :

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

线速度: $v = 2p\tau \frac{n}{60}$

$n \rightarrow$ 转速

$p \rightarrow$ 极对数

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



当电刷放在几何中心线上，电枢感应电动势 E_a ：

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

$z \rightarrow$ 总导体数
 $a \rightarrow$ 支路对数

结论

式中， $C_e = \frac{pz}{60a}$ 称为 电动势常数。

当直流电机的电枢绕组在磁场中旋转时（不管是原动机还是电动机），在电枢绕组中都将感应出与电枢转速成正比的电枢电势；

电枢绕组的感应电势与每极磁通量有关，但与磁极下磁通密度的分布无关。因而当电刷位于几何中心线上时，电刷间所有元件感应电势方向相同，输出的刷间电势最大，如果电刷从中心线上移开，电刷间各元件电势有所抵消，输出的刷间电势也有所减小。



例题 3-3 已知一台10kW、4极、2850r/min的直流发电机，电枢绕组是单波绕组，整个电枢总导体数为372。当发电发出的电动势 $E_a = 250V$ 时，求这时气隙每极磁通量 Φ ？

解：额定已知极对数 $p=2$ ，单波绕组的并联支路对数 $a=1$ ，于是可以计算出电动势常数：

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

根据感应电动势公式，气隙每极磁通量 Φ 为：

$$\Phi = \frac{E_a}{C_e n} = \frac{250}{12.4 \times 2850} = 70.7 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

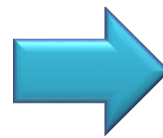


2、电磁转矩

定义：电枢上所有导体产生的电磁转矩之和。

推导思路：

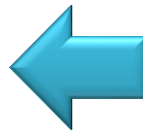
所有导体
总电磁转
矩 T



单个导体
平均电磁
转矩 T_1



平均电磁力
 $B_{av} l_i i_a$



已知条件：

$$B_{av} = \frac{\Phi}{S}$$

l_i

$$i_a = \frac{I_a}{2a}$$



一根导体所受的平均电磁力 f_{av} :

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

式中, $i_a = \frac{I_a}{2a}$ 为导体电流。

$I_a \rightarrow$ 电枢电流, $a \rightarrow$ 支路对数

一根导体所受力产生的转矩 T_1 :

$$T_1 = f_{av} \frac{D}{2}$$

式中, $D = \frac{2p\tau}{\pi}$ 为电枢直径。

总电磁转矩 T :

$$T = z T_1$$

平均磁密 B_{av} :

$$B_{av} = \frac{\Phi}{\tau l_i}$$

$$T = B_{av} l_i \frac{I_a}{2a} \frac{D}{2} z$$

$$\begin{aligned} T &= \frac{\Phi}{\tau l_i} l_i \frac{I_a}{2a} \frac{D}{2} z \\ &= \frac{pz}{2a\pi} \Phi I_a = C_t \Phi I_a \end{aligned}$$

$$C_t = \frac{pz}{2a\pi}$$

称为转矩常数。



注意

对于一台已制成的电机， C_e 、 C_t 为常数，决定于电机结构。

$$\frac{C_t}{C_e} = \frac{\frac{pz}{2a\pi}}{\frac{pz}{60a}} = \frac{60}{2\pi} \approx 9.55$$

结论

$$T = C_t \Phi I_a$$

直流电机的电磁转矩与电枢绕组中流过的**电流成正比**，但与电枢电流产生的方式无关，即不管是由于电机向外电路输出电流（发电机），还是由直流电源向电枢绕组输入电流（电动机），只要电枢绕组中有电流流过，就会产生电磁转矩。



例题 3-4 已知一台四极直流电动机额定功率100kW，额定电压330V，额定转速730r/min，额定效率0.915，单波绕组，电枢总导体数为186，额定每极磁通 $6.98 \times 10^{-2} \text{ Wb}$ ，求额定电磁转矩？

解：额定已知极对数 $p=2$ ，单波绕组的并联支路对数 $a=1$ ，于是可以计算出转矩常数：

$$C_t = \frac{pz}{2a\pi} = \frac{2 \times 186}{2 \times 1 \times 3.1416} = 59.2$$

额定电流：

$$I_N = \frac{P_N}{\eta_N U_N} = \frac{100 \times 10^3}{0.915 \times 330} = 331 \text{ A}$$

额定电磁转矩：

$$T_N = C_t \Phi I_N = 59.2 \times 6.98 \times 10^{-2} \times 331 = 1367.7 \text{ N} \cdot \text{m}$$

3、直流电机的电枢反应

直流电机负载时的磁场

励磁电流 I_f

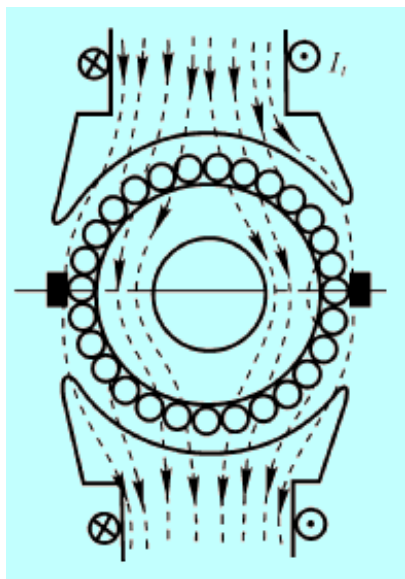
$\rightarrow F_f$

电枢电流 $I_a \neq 0$

$\rightarrow F_a$

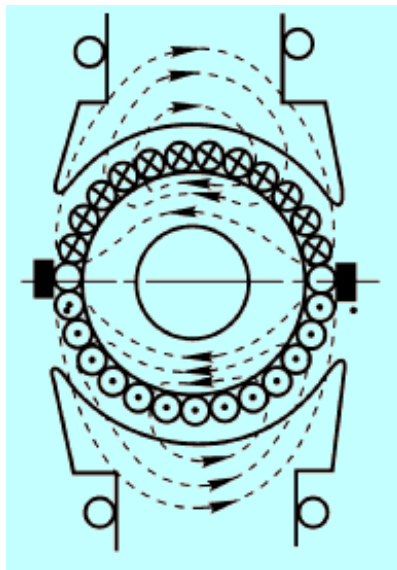
F_δ

Φ_m 气隙磁场



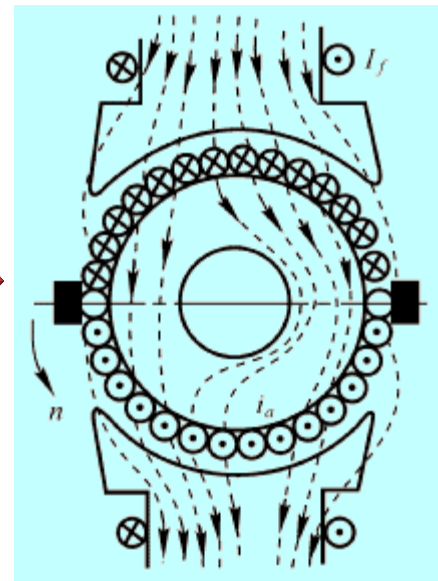
空载磁场

+



电枢磁场

$\rightarrow$



负载磁场



直流电机的电枢反应

负载时电枢电流产生的磁动势 F_a 对气隙中的主磁场产生的影响称为电枢反应。

电刷位于几何中心线上

交轴电枢反应

电刷不在几何中心线上

交轴电枢反应

+ 直轴电枢反应

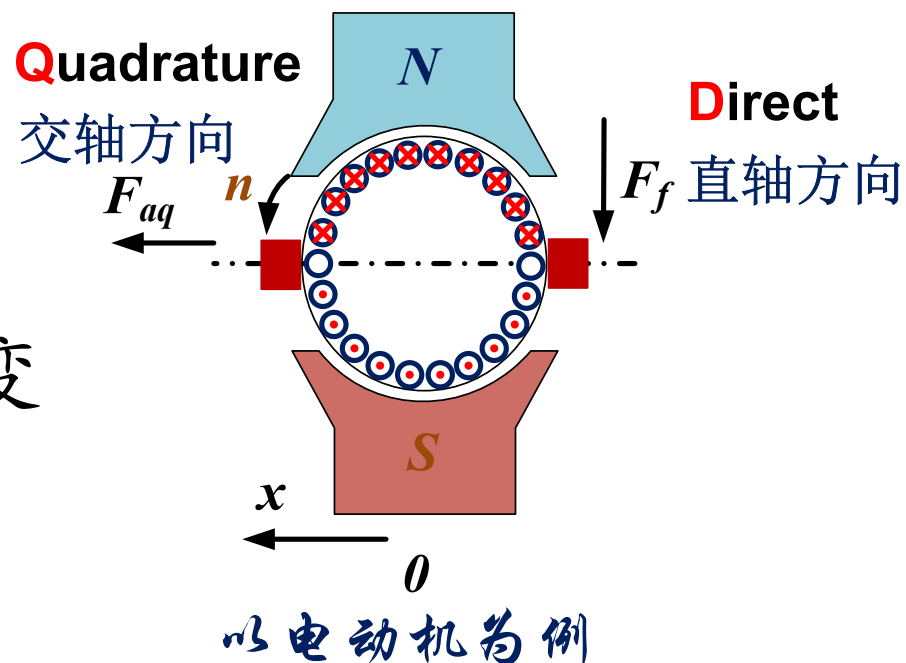
交轴电枢反应

影响：

- ✓ 使气隙磁场发生畸变
- ✓ 使物理中心线偏移
- ✓ 对每极磁通有影响

注意

“电刷放在几何中心线上”是一种习惯的讲法和画法，并不代表电刷的实际位置，而是指被电刷短路的元件的两边位于几何中心线上。



结论

畸变

每个主极下的磁场一半被削弱，一半被加强。

偏移

物理中心线 $\delta(x)=0$ 的连线) 偏离几何中心线 α 角。

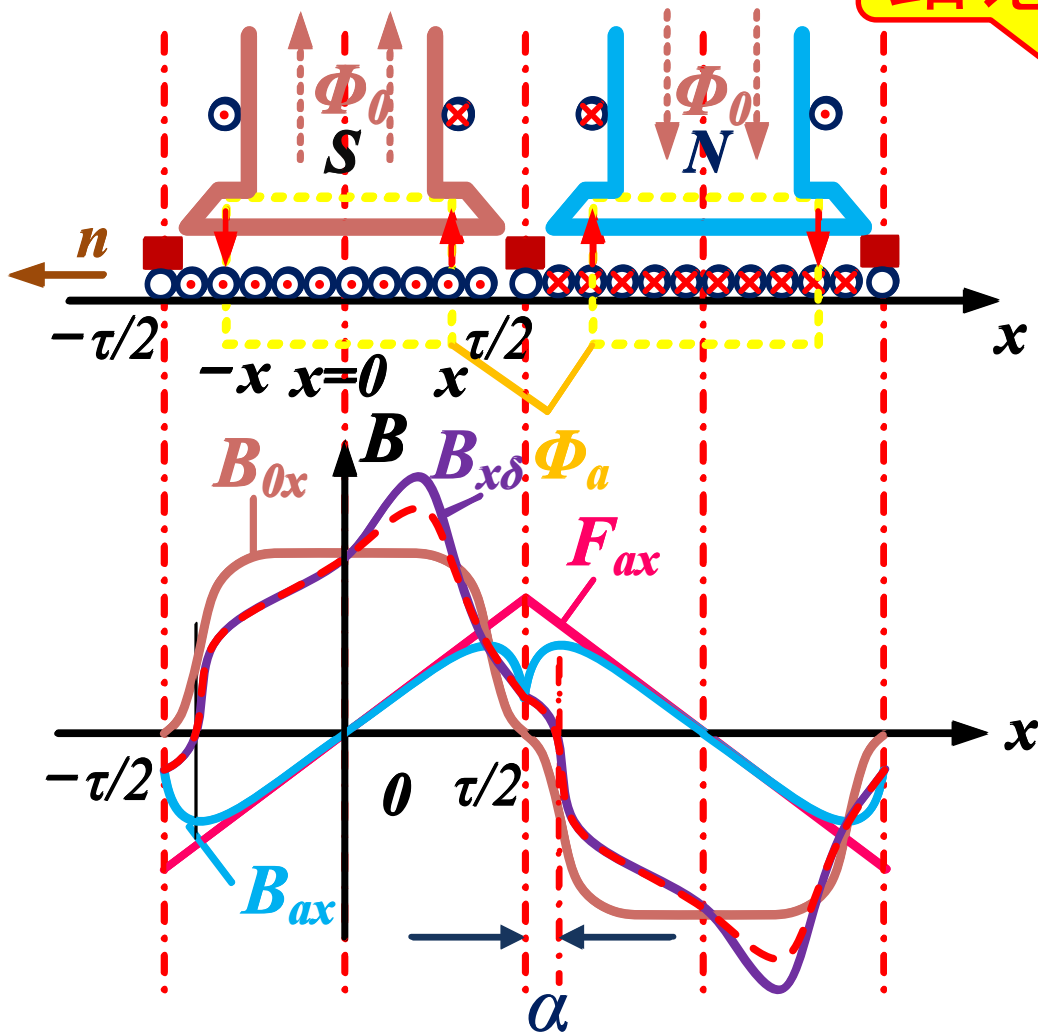
磁通

不计饱和:

$\Phi = \Phi_0$ 不变

考虑饱和:

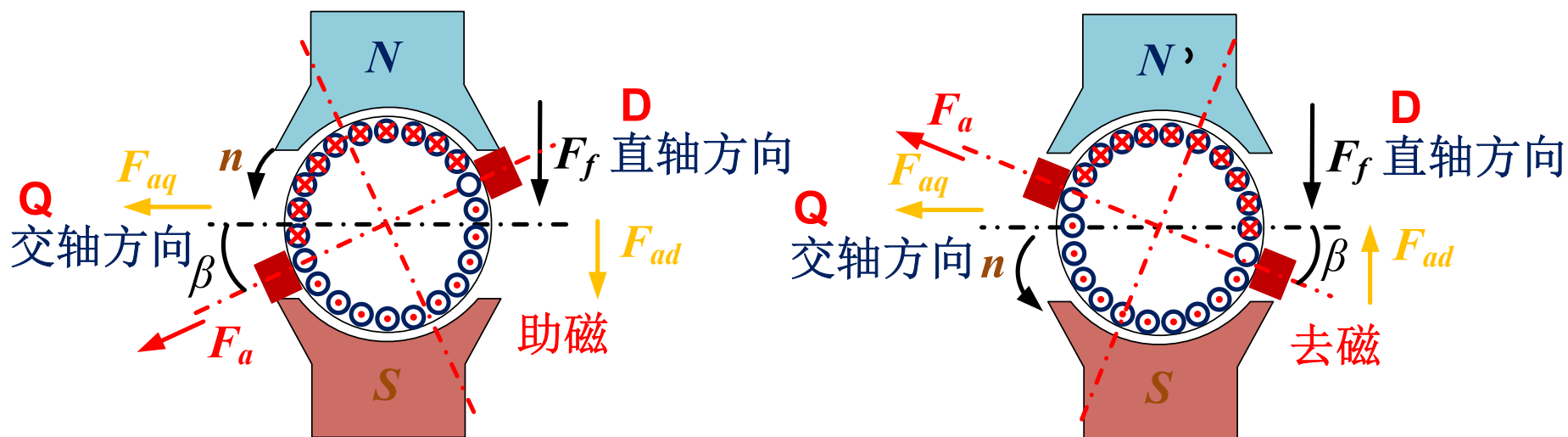
$\Phi < \Phi_0$ 去磁



交轴电枢反应

+

直轴电枢反应

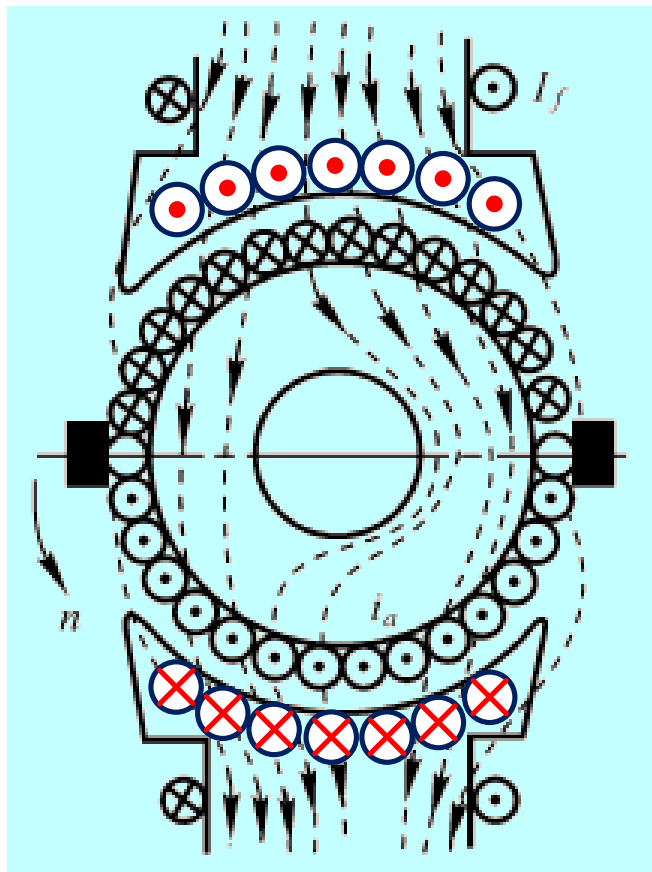


结论

以电动机为例

当电动机的电刷**顺转向**移过 β 角时， F_{ad} 起**助磁**作用；**逆转向**移过 β 角时， F_{ad} 起**去磁**作用。

电枢反应的补偿



方法：

在主磁极极靴上装置补偿绕组。

补偿绕组与电枢绕组串联，其中电流与电枢电流方向相反，则补偿绕组在任何负载下产生的磁动势都与电枢磁动势大小相等，方向相反，从而消除电枢反应的影响。

以电动机为例



本章结束

作业：3.3