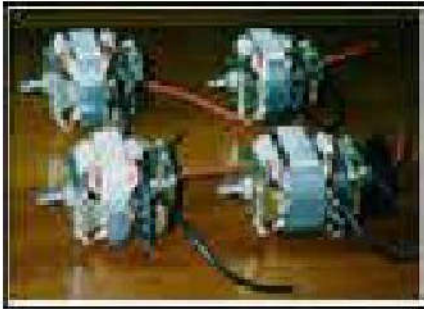
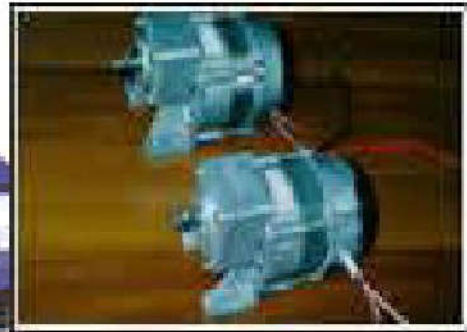


第三章 直流电机的稳态分析

直流电机的用途



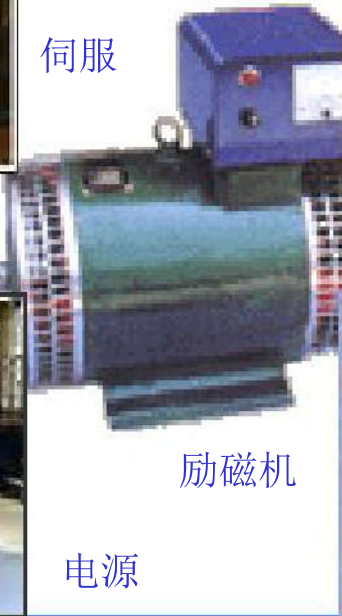
测速



伺服



电源



励磁机





直流电机的特点

- ❖ 直流发电机的电势波形较好，对电磁干扰的影响小。
- ❖ 直流电动机的调速范围宽广，调速特性平滑。
直流电动机过载能力较强，起动和制动转矩较大。
- ❖ 由于存在换向器，其制造复杂，价格较高

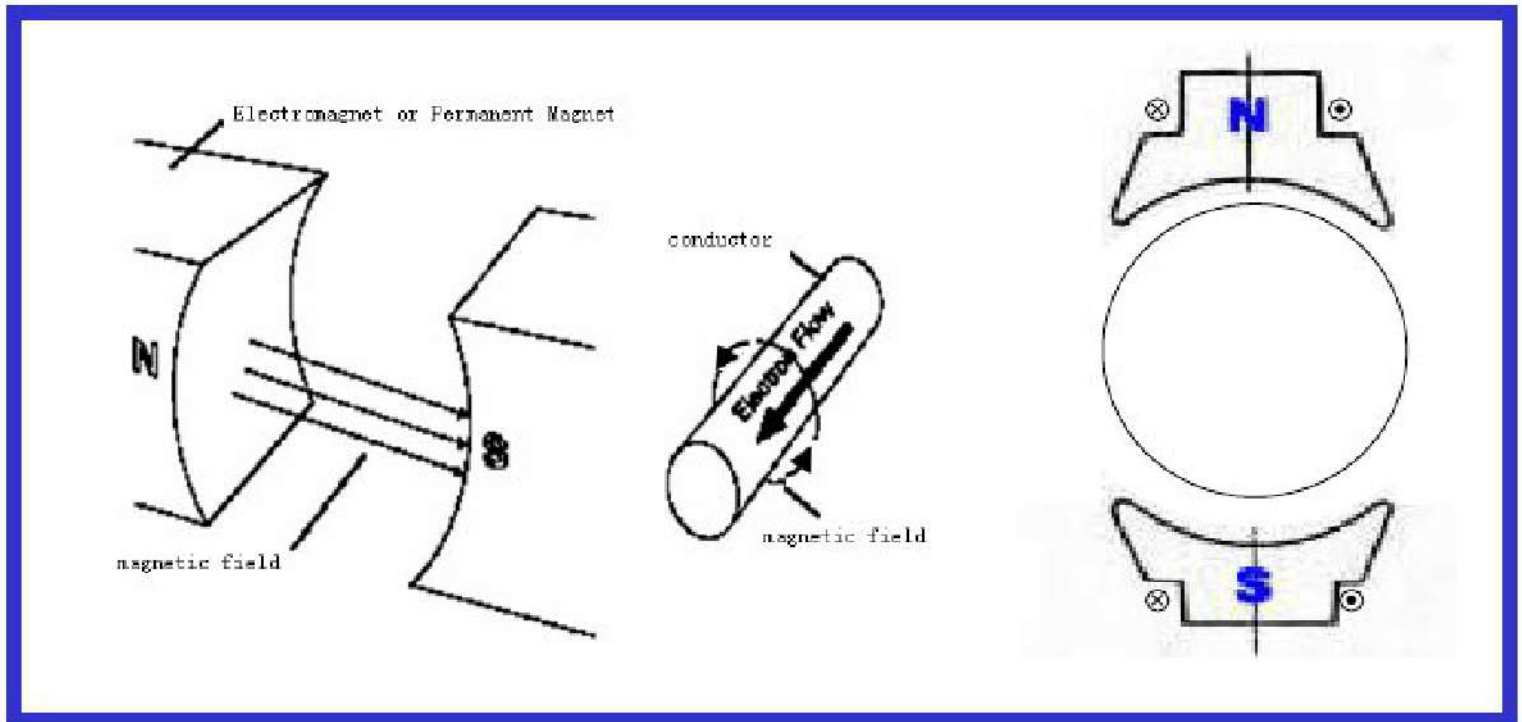


主要内容

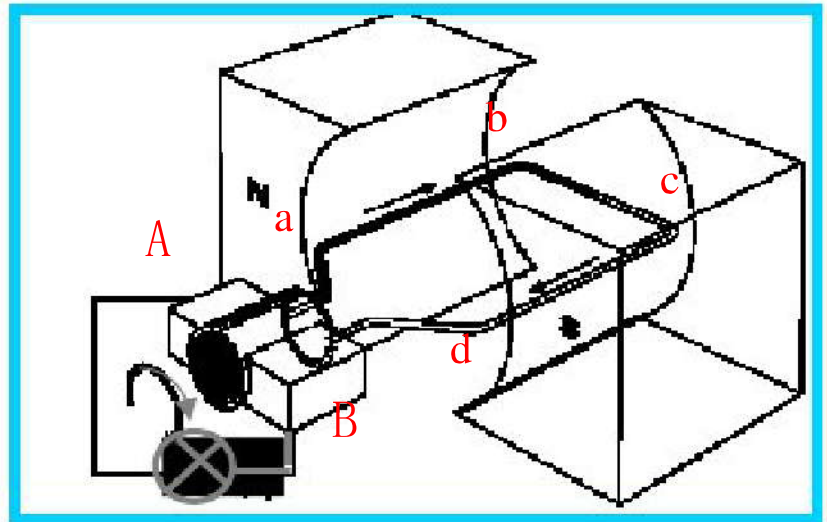
- ❖ 直流电机的基本原理和结构
- ❖ 直流电枢绕组
- ❖ 直流电机的磁场
- ❖ 直流电机的电枢电动势、电磁转矩和电磁功率
- ❖ 直流发电机
- ❖ 直流电动机
- ❖ 直流电机的换向

§ 3-1 直流电机的原理和结构

一、直流电机的工作原理——磁场

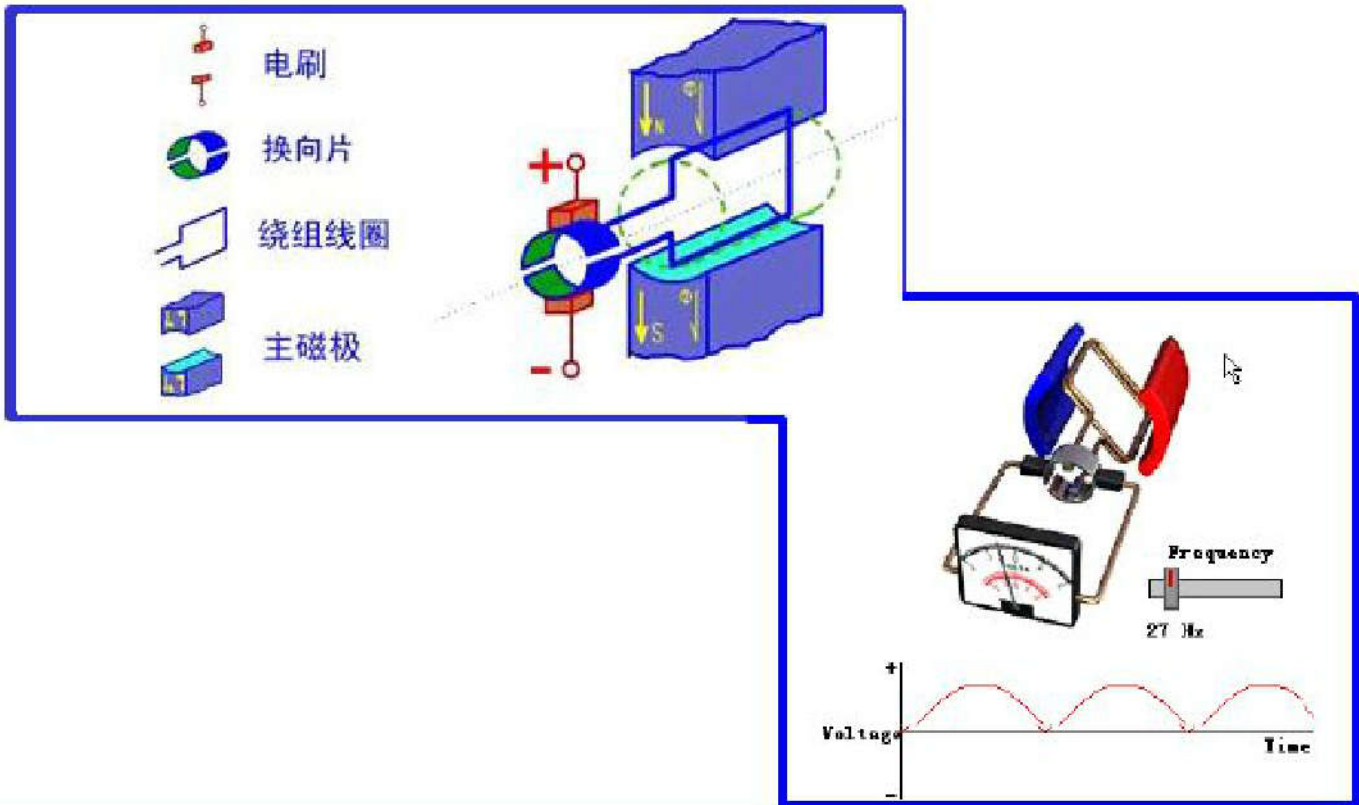


电磁作用

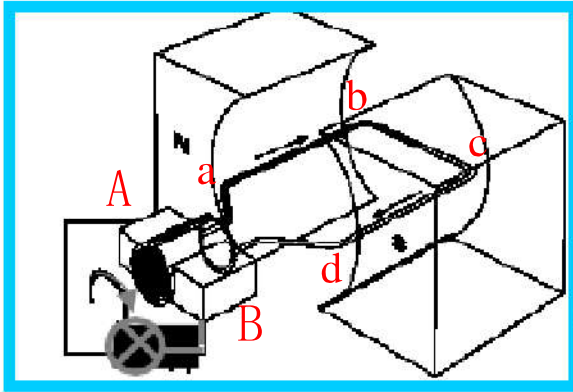


- ❖ 运动的导体切割磁力线，产生感应电动势；
- ❖ 载流导体在磁场中，受到磁场力

1. 直流电机的物理模型



2. 直流发电机的工作原理



电势正方向: abcd

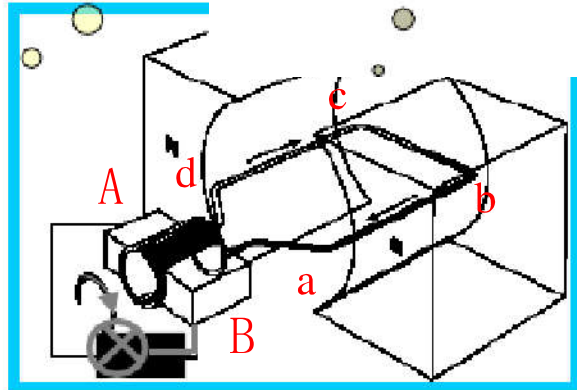
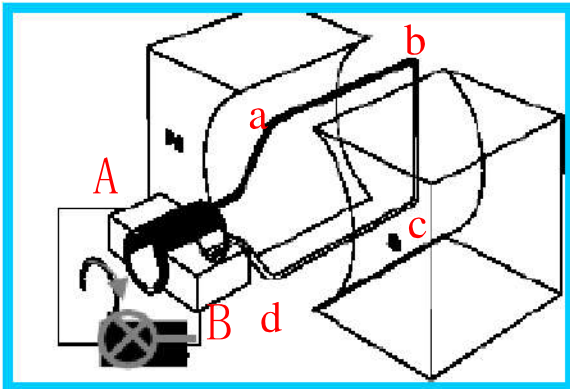
B^+, A^-

电势正

电势正方向:

dcba

B^+, A^-

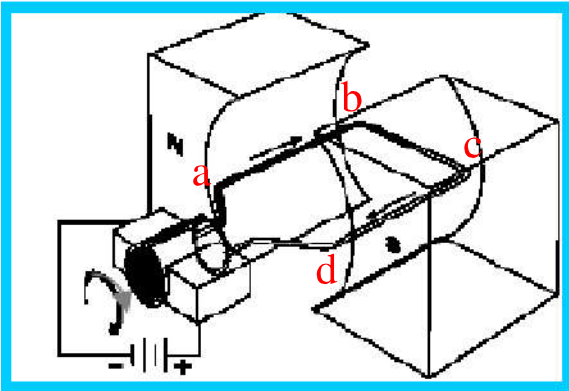




直流发电机运行时的几点结论

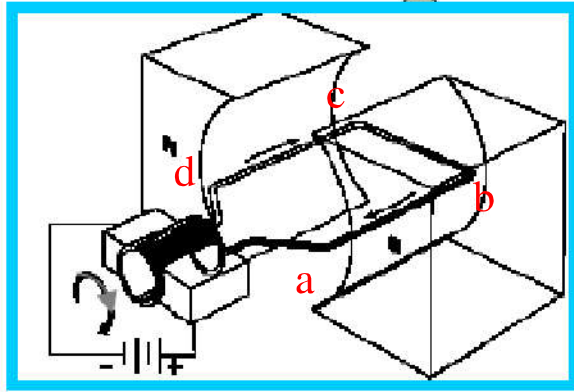
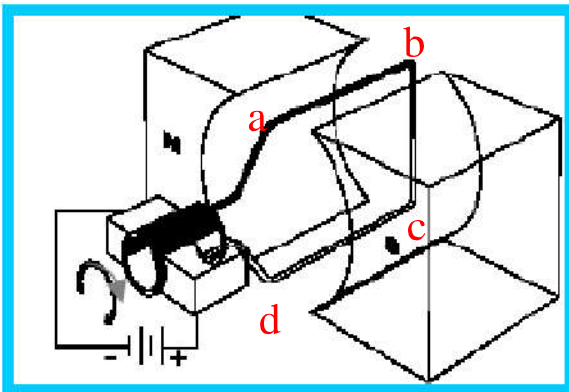
1. 电枢线圈内电势、电流方向是交流电；
2. 电刷间为直流电势。线圈中感应电势与电流方向一致；
3. 从空间看，电枢电流产生的磁场在空间上是恒定不变的磁场；
4. 产生的电磁转矩 T 与转子转向相反，是制动性质；

3. 直流电动机的工作原理



电流正方向: dcba
转矩方向: 顺时针
电势方向: abcd

电流正方向: abcd
转矩方向: 顺时针
电势方向: dcba

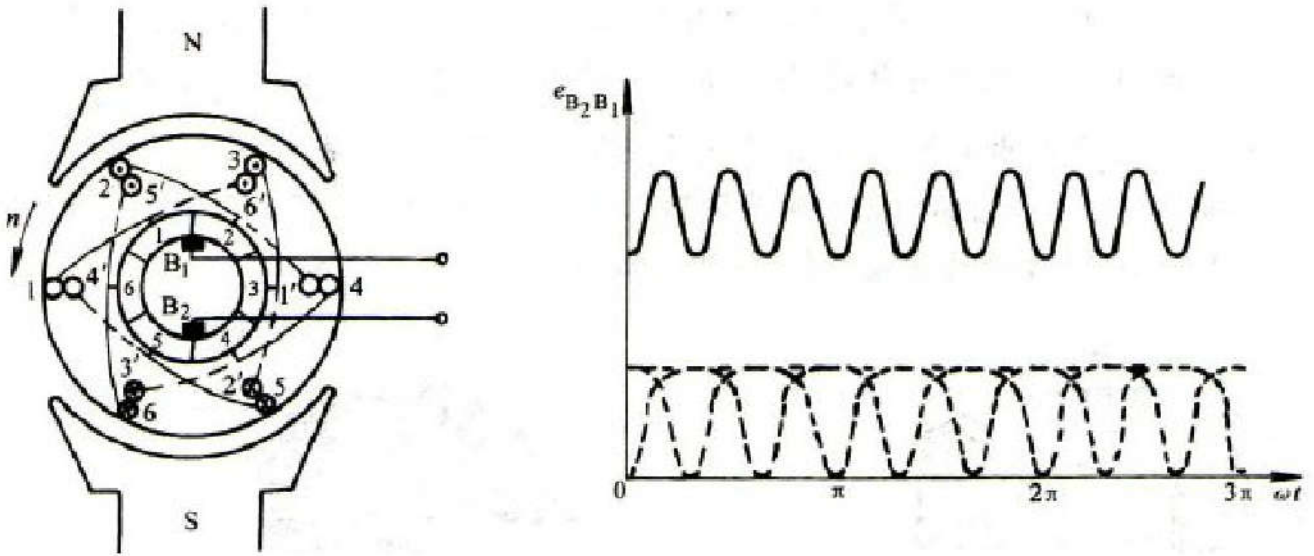




直流电动机运行时的几点结论

1. 外施电压、电流是直流，电枢线圈内电流是交流；
2. 线圈中感应电势与电流方向相反；
3. 线圈是旋转的，电枢电流是交变的。电枢电流产生的磁场在空间上是恒定不变的；
4. 产生的电磁转矩 T 与转子转向相同，是驱动性质；

4. 脉动的减少方法



电枢绕组由多个线圈串联而构成的。

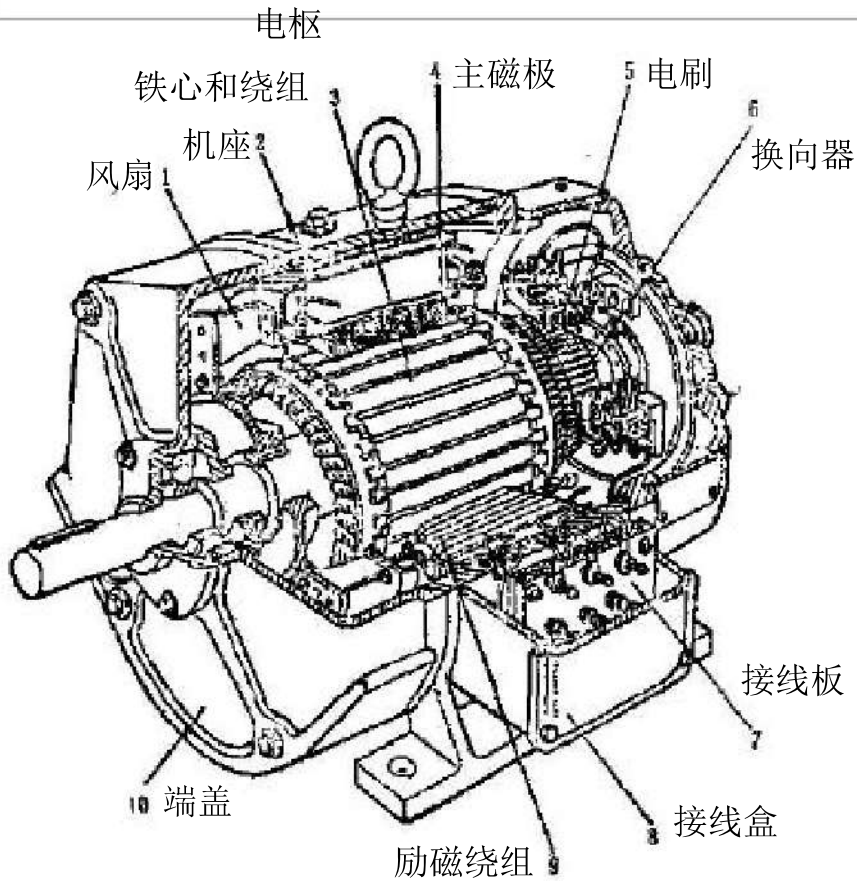


5. 直流电机的可逆原理

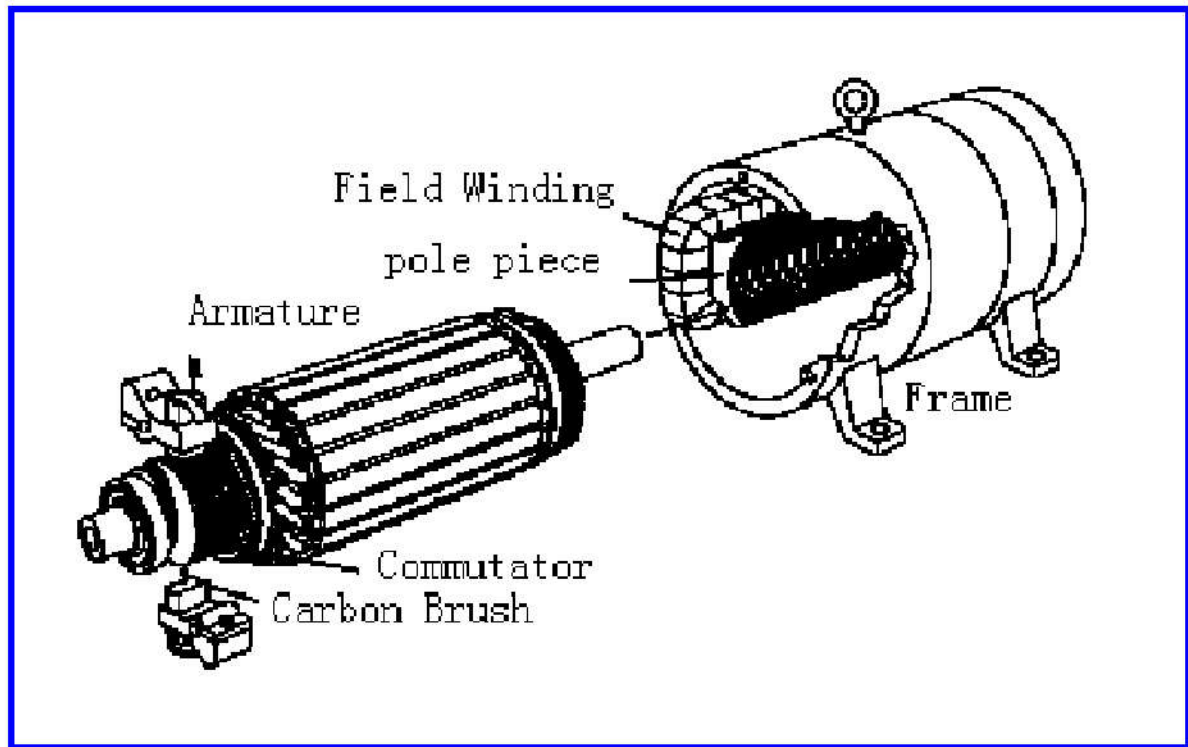
同一台直流电机，通过改变外界条件，
可当发电机运行，也可当电动机运行。



二、直流电机的结构

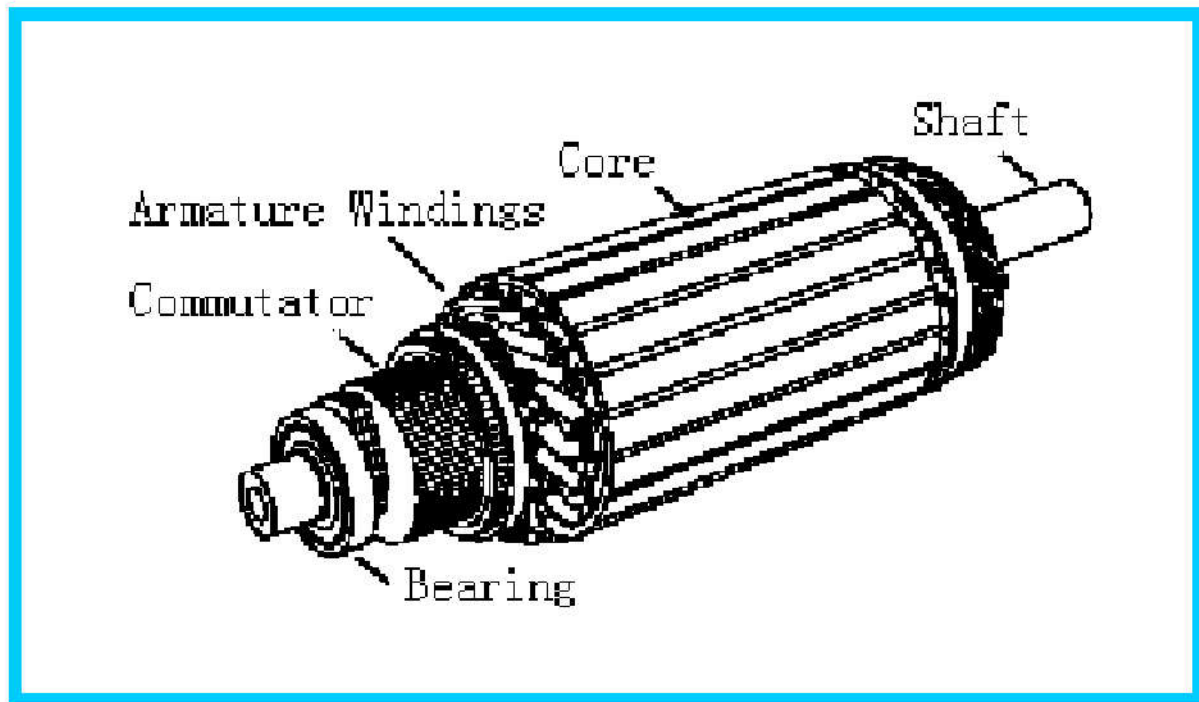


定子和转子

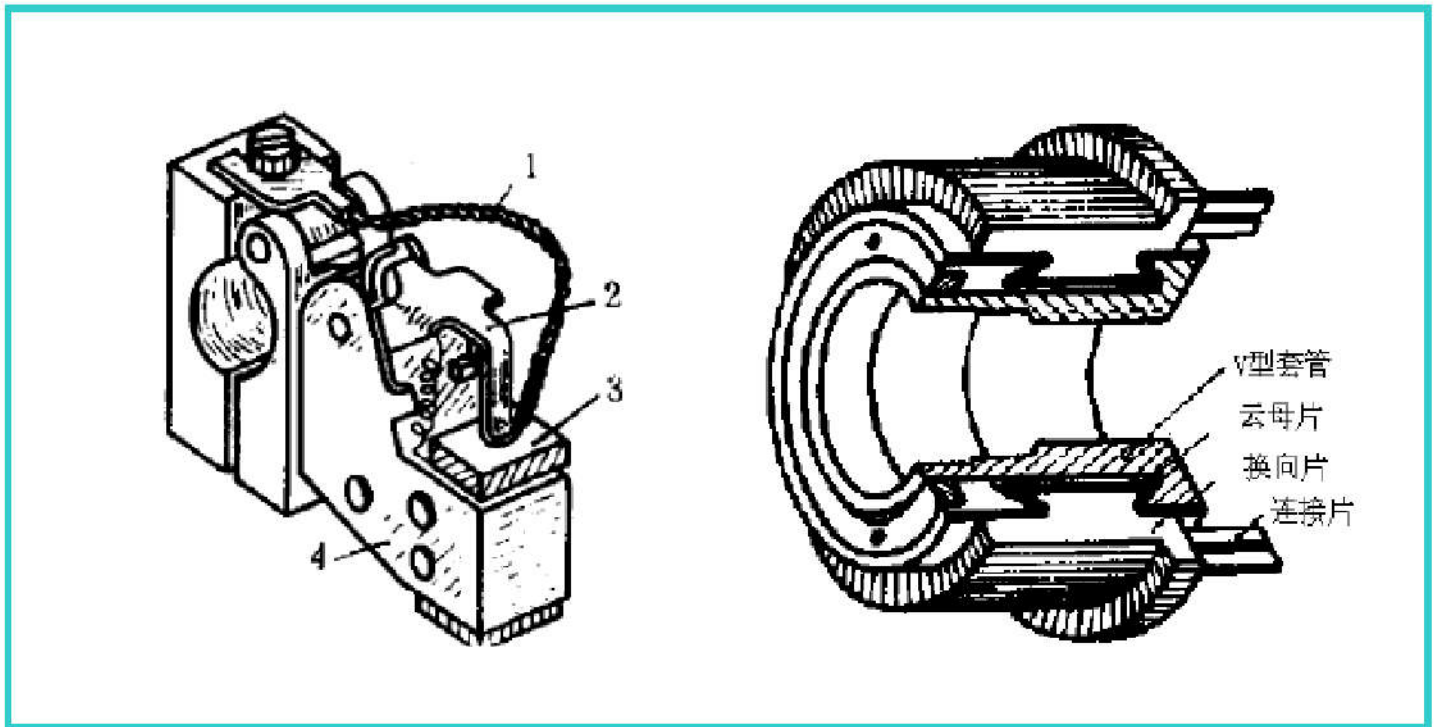




直流电机电枢绕组结构



直流电机电刷和换向器结构



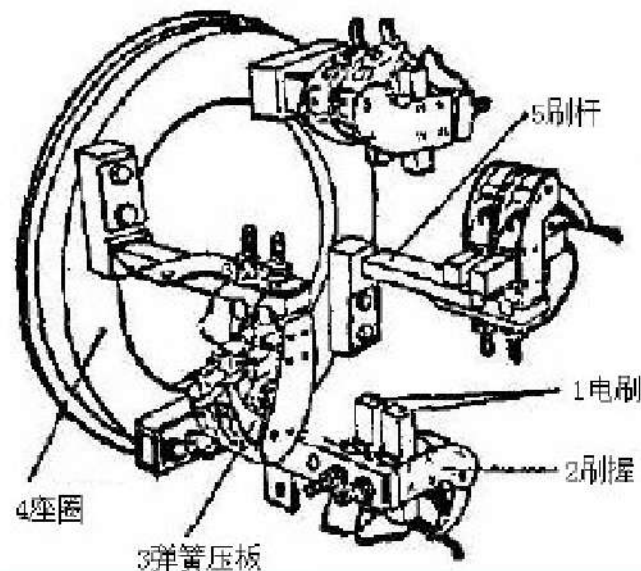


❖ 电枢电流能经旋转的换向器（随转子）通过静止的电刷（固定在定子上）接通外电路

1. 将转动的电枢与外电路相连

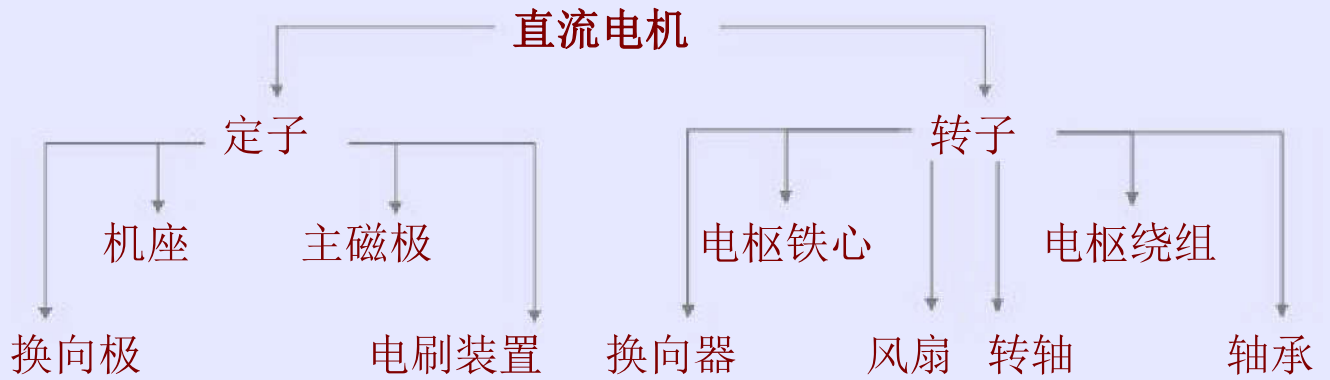
2. 与换向器配合作用而获得
直流电压

电刷组数一般等于电机极对数



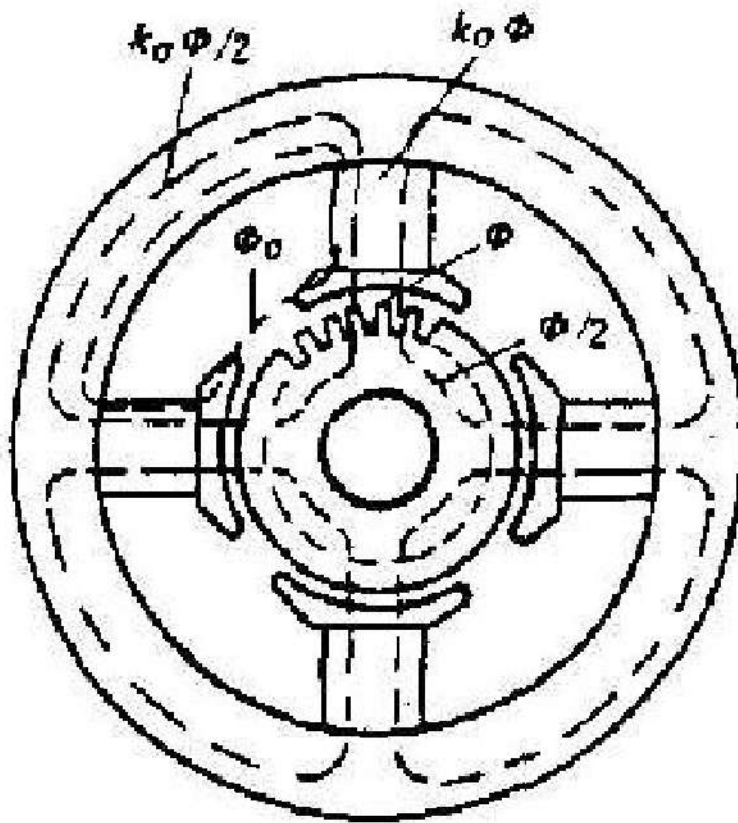
直流电机的基本结构总结

1. 主要由定子、转子两部分组成

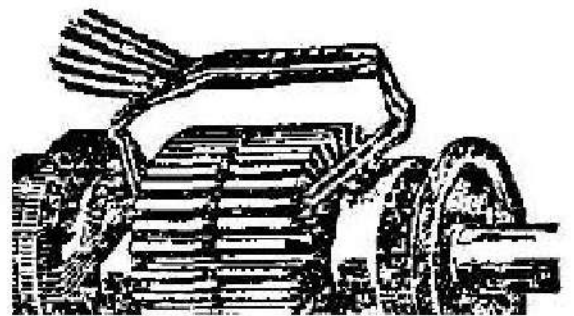
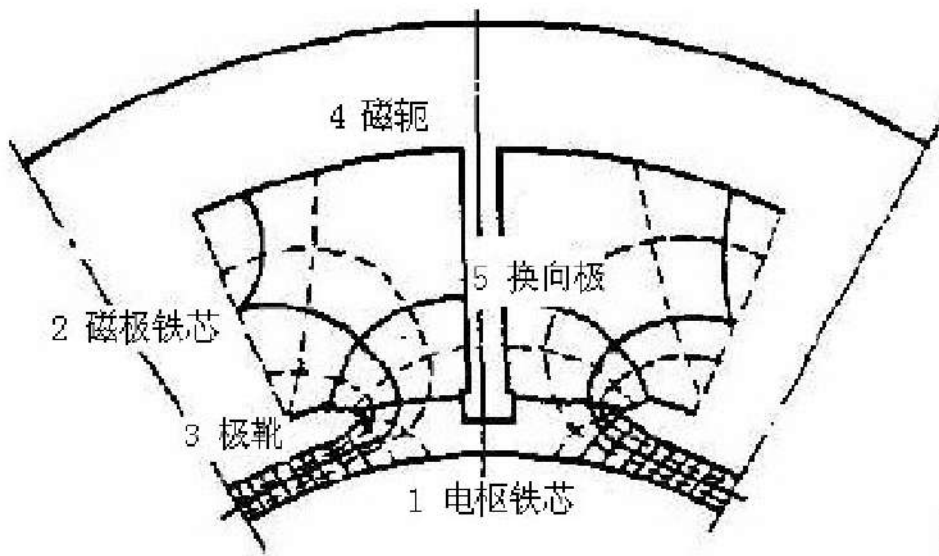




2. 直流电机的磁路



2. 直流电机的磁路



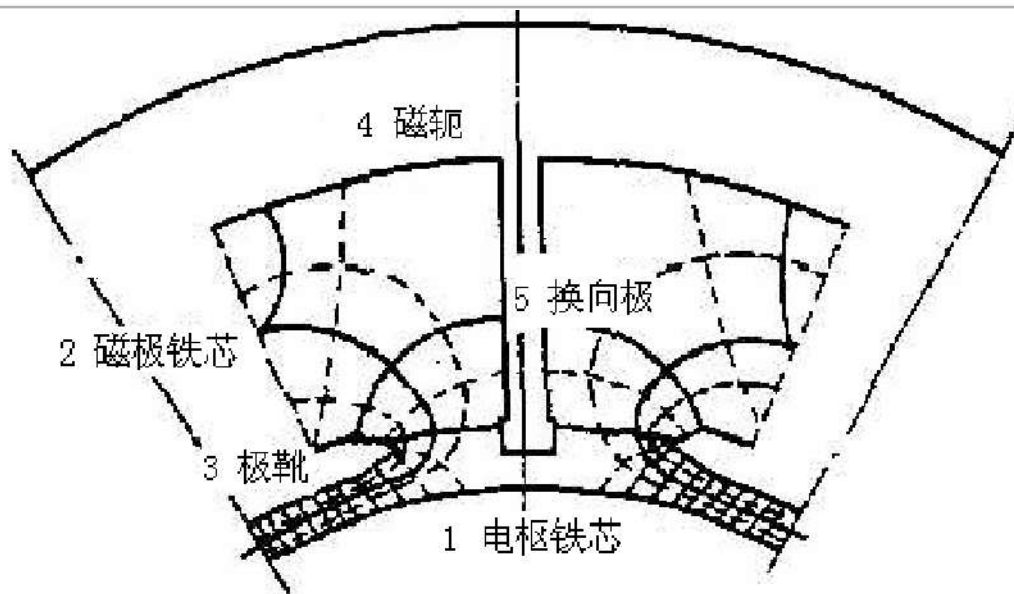
1. 电枢铁心

由0.5mm厚的硅钢片叠装而成，用作磁路及嵌放电枢绕组。

铁芯外缘均匀冲有槽和齿。电枢绕组元件嵌入槽中，用槽楔固定。

School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University

2. 直流电机的磁路

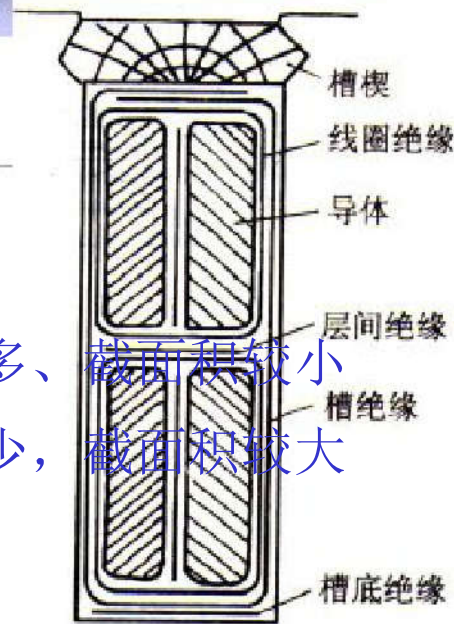


5. 换向极磁路

换向极，是位于两个主磁极之间的小磁极，用于改善换向。换向极常用整块钢或厚钢板制成

换向极的数目一般与主磁极相等。在小功率直流电机中，换向极数量通常只有主磁极的一半，或不设置换向极

3. 直流电机的电路



❖ **励磁绕组** 套在磁极铁芯上。

并励绕组—和电枢绕组并联，匝数较多、截面积较小

串励绕组—和电枢绕组串联，匝数较少，截面积较大

❖ **电枢绕组** 嵌在电枢铁芯槽中

叠绕组和波绕组

❖ **换向极绕组** 与电枢绕组串联，激励换向极磁通。

❖ **换向器** 将电枢绕组内部的交流电势用机械换接的方法转换为电刷间的直流电势。



思考？

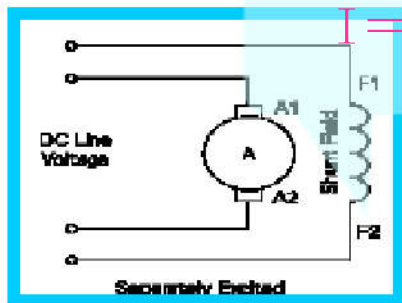
- ❖ 直流电机中，对电枢铁心、主极铁心及磁轭的要求？
- ❖ 主极铁心：1~1.5mm厚的钢板冲片叠压而成；
- ❖ 机座（作为磁路的部分称磁轭）：厚钢板弯成桶形以后焊成；
- ❖ 电枢铁心：0.5mm厚的硅钢片叠压而成。



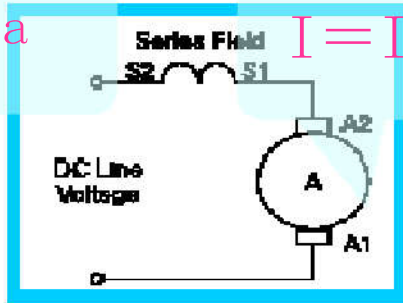
三、励磁方式

- ❖ **直流电机励磁方式**，即励磁绕组与电枢绕组的连接方式，对电机的运行特性有大的影响
- ❖ **他励**——励磁由另外独立的直流电源供给，与电枢绕组不连接
- ❖ **自励**——励磁绕组与电枢绕组相连接，励磁电流由发电机本身供给

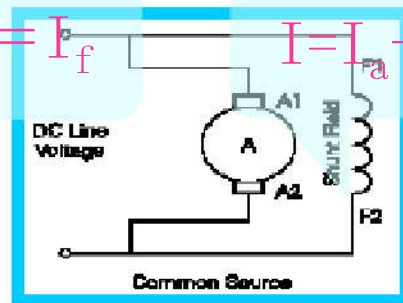
Electrical Machinery



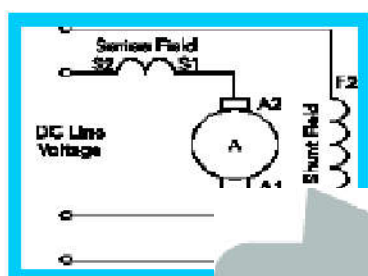
他励



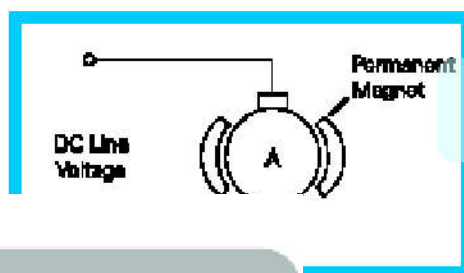
串励



并励



复励



励磁

$$I = I_a$$

$$I_{fc} = I_a, I = I_a + I_{fb};$$

$$\text{或 } I = I_{fc} = I_a + I_{fb}$$

四、直流电机的额定值

额定容量 P_N : 输出功率

额定电压 U_N : 额定状态下出线端电压;

额定电流 I_N : 额定状态下出线端电流;

额定转速 n_N : 额定状态下的电机转速



直流发电机: $P_N = U_N \cdot I_N$

直流电动机: $P_N = U_N \cdot I_N \cdot \eta$

直流电机的铭牌数据



上海电气 SHANGHAI ELECTRIC		直流电动机 DIRECT CURRENT MOTOR			
型号 TYPE	Z710-400	出厂号 SERIAL NO.	710Z1303264	2013-07	
	1400 千瓦 kW		660 伏 V	2258	安 A
工作制 DUTY	S1	绝缘等级 INS	F	600/1200	转/分 r/min
励磁 ENC	他励		220/110 伏 V	33.1/66.2	安 A
防护等级 IP	54	安装形式 IM	1001	冷却方法 IC	86W 9980 千瓦 kW
最大安全转速 MAX. SAFETY SPEED	1200 转/分 r/min	风压降 ΔP	2.14 千帕 kPa		
转动惯量 JM	343 千克·米 kg·m ²	风量 QV	6.68 米/秒 m/s		
标准 STD	JB/T9577				
上海电气集团上海电机厂有限公司 SHANGHAI ELECTRIC MACHINERY CO., LTD. (SECI)					



§ 3-2 直流电机电枢绕组

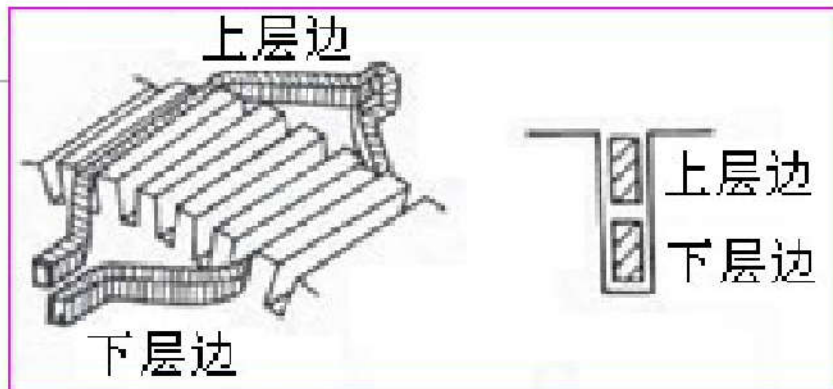
电枢绕组作用——功率绕组

- (1) 当电枢绕组在磁场中旋转时将感应电势；
- (2) 当电枢绕组中流通电流时，电流和气隙磁场相互作用将产生电磁转矩；
- (3) 通过电枢绕组，进行电功率和机械功率的转换。

对电枢绕组的要求：

- (1) 通过规定的电流
- (2) 产生足够的电势和电磁转矩
- (3) 所消耗的有效材料最省，强度高（机械、电气、热），运转可靠，结构简单等。

双层绕组

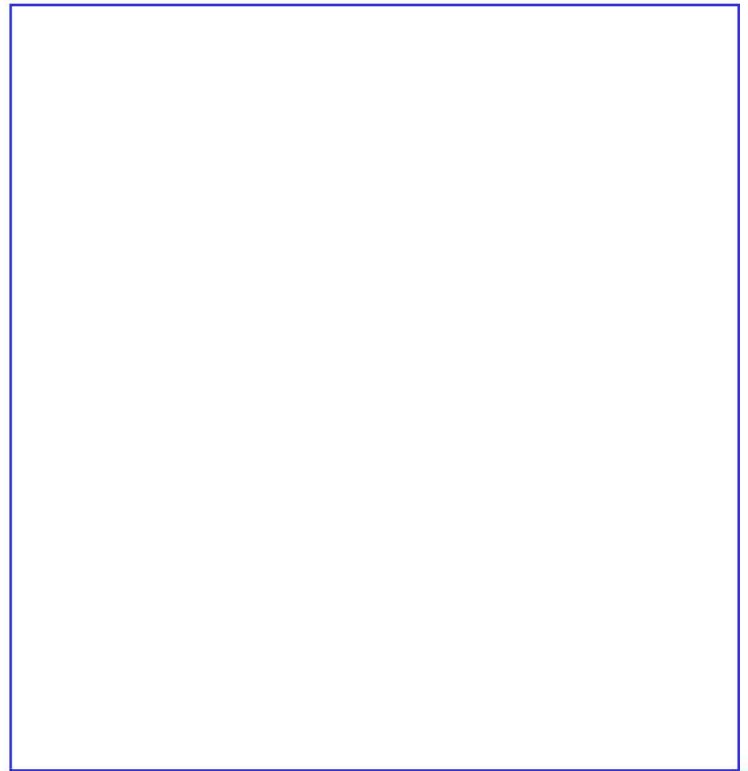
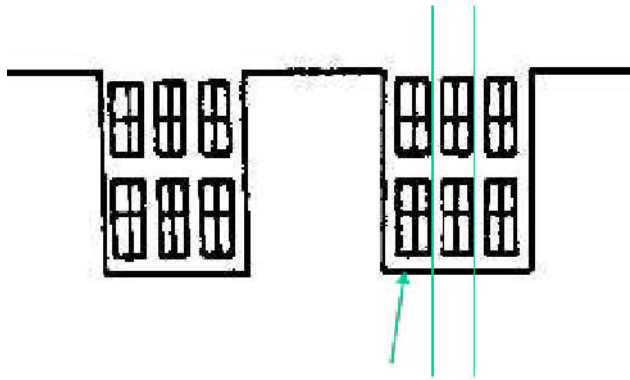


- ❖ 线圈的两边都在电枢铁芯表面的槽中：两边都能切割磁场而产生感应电势。
- ❖ 两边电势相加：线圈的两边必须处于不同极性的极面下，线圈的跨距约等于一个极距。
- ❖ 线圈对称排列：当一线圈的一个边在某槽中占有上层位置时，则该线圈的另一边必须放在另一槽下层。



虚槽概念

- ❖ 在大型电机中、每层可能有C个并列圈边



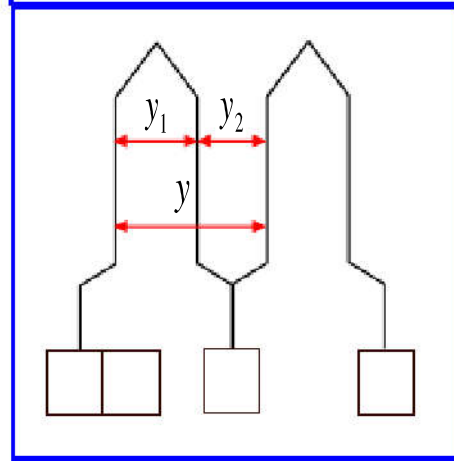
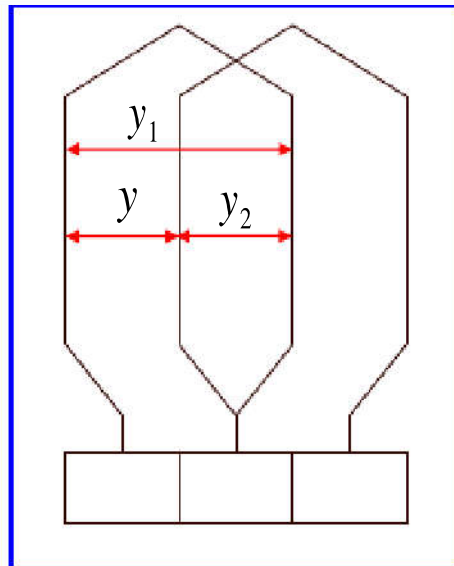


直流绕组

- ❖ 极距
- ❖ 第一节距 y_1
元件的宽度,
- ❖ 第二节距 y_2
连接至同一换
- ❖ 合成节距 y
紧相串联的两
- ❖ 换向器节距 y_c
每一线圈两端
器表面的跨距,)

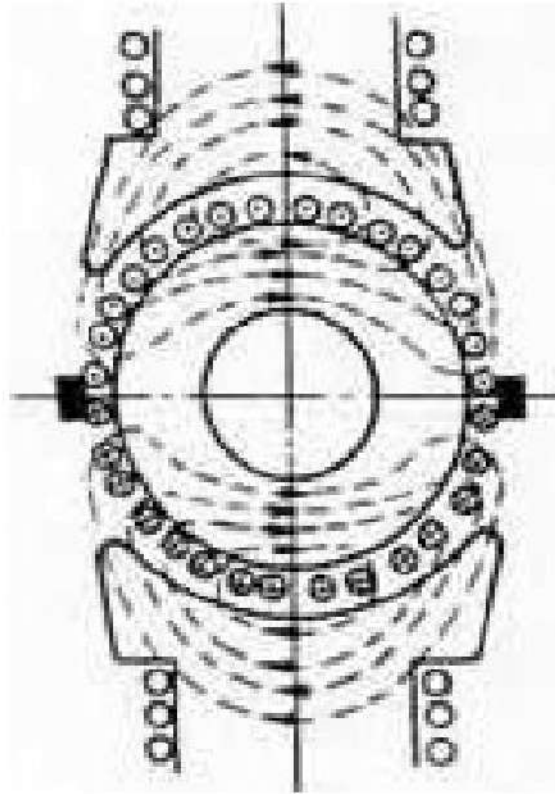
$$\tau = \frac{Z_e}{2p}$$

$$y = \begin{cases} y_1 + y_2 \neq 0 \text{ 或} \\ y_1 - y_2 \neq 0 \end{cases}$$



其它术语

极轴线:



几何中心线

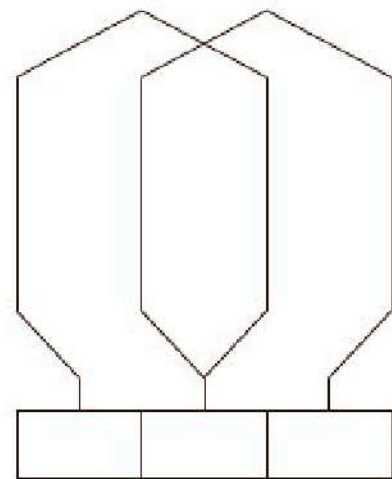


基本绕组形式

一、单叠绕组:

- ❖ 每个元件出线端依次连在相邻的换向片上，后一个绕组元件相对前一个绕组元件仅移过一个槽。

$$y=y_k=\pm 1 \text{ (右行, 左行)}$$





单叠绕组分析实例

实例：槽数 Z （设 $C=1$ ）、元件数 S 和换向片数 K 三者相同

$$p=2, \quad Z=S=K=16$$

1. 数据计算：

$$y=y_k=1$$

$$y_1 = \tau = \frac{Z}{2p} = \frac{16}{2 \times 2} = 4$$

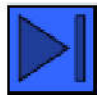
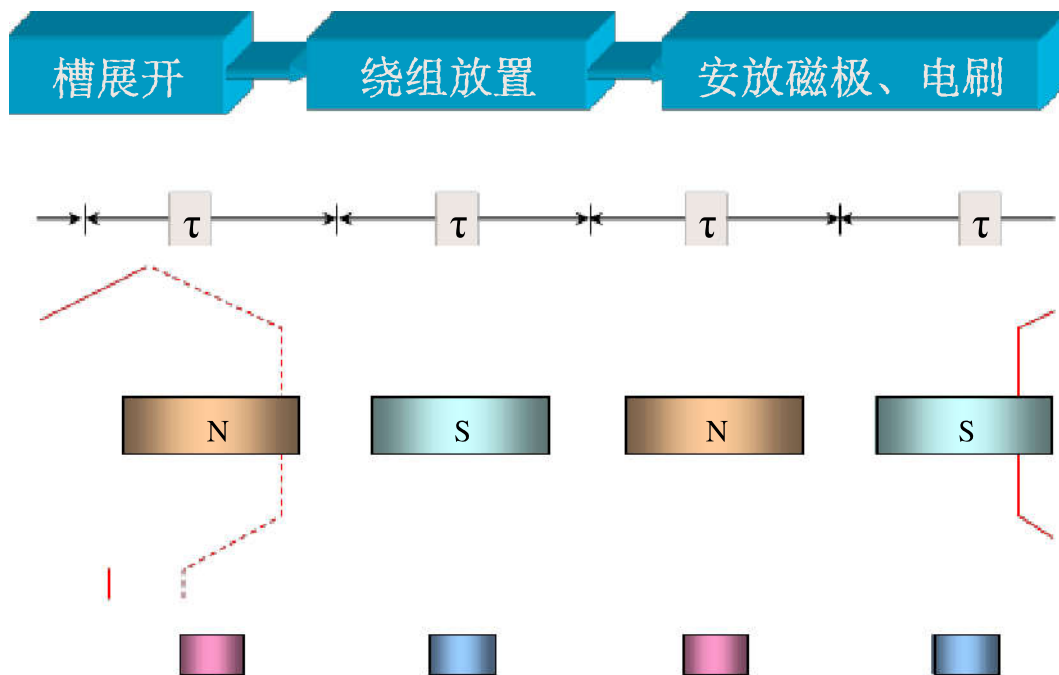
$$y_2 = y_1 - y = 4 - 1 = 3$$

计算数据 y 和 y_1

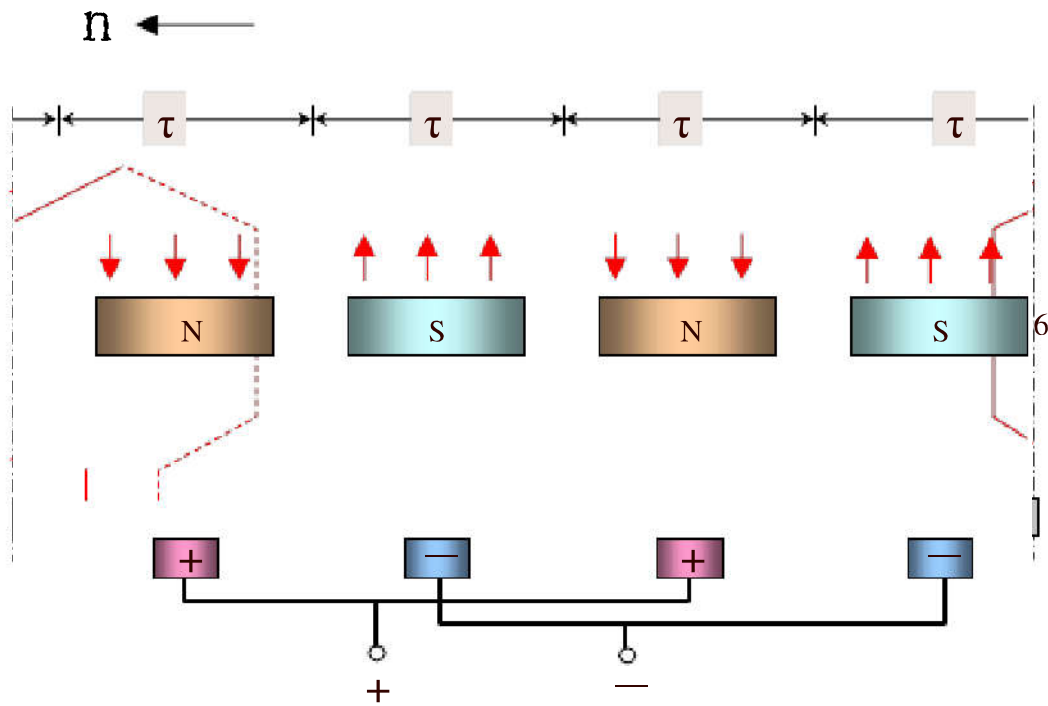
画绕组展开图

安放电刷和磁极

单叠绕组展开图



展开图 (2)



绕组放置

❖ 元件1:

上元件边在1槽， 下元件边放在相距 $y_1=4$ 即5槽下层。

❖ 元件2:

上元件边在2槽， 下元件边放在相距 $y_1=4$ 即6槽下层。

以此类推

某一瞬间电刷、磁极放置

- ❖ **磁极**：磁极宽度约 0.7τ ，均匀分布，N、S极交替安排。
- ❖ **电刷**：连接内、外电路。为了在正负电刷间获得最大直流电势以及产生最大的电磁转矩，电刷放在被电刷短路的元件电势为零的位置。

电势为零的元件：在一个主极下的元件边电势具有相同的方向。在磁极的几何中心线上电势为零。

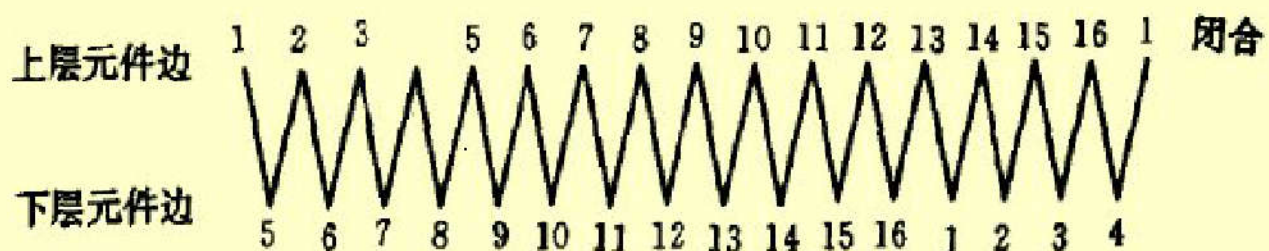
- ❖ **电刷放置**：电刷放置在使电刷的中心线与主磁极轴线对准的换向片上。





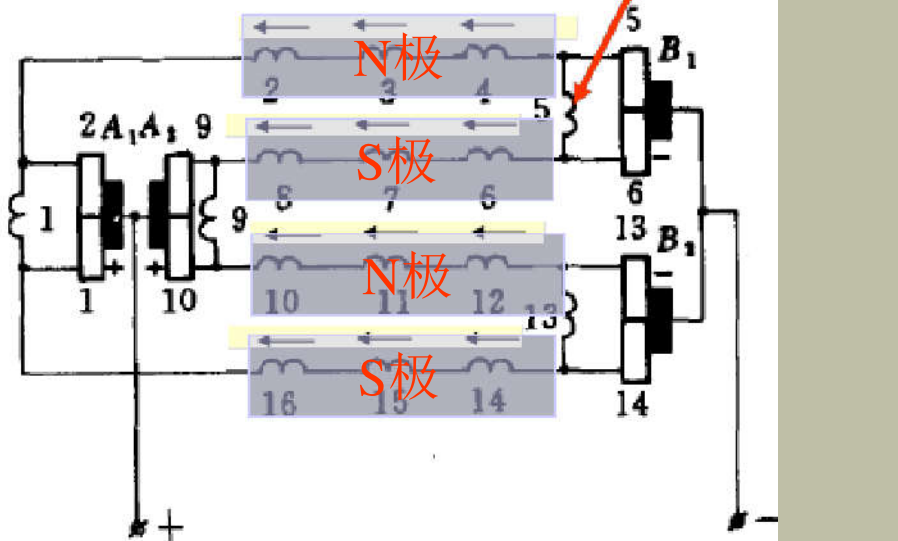
元件连接顺序图

绕电枢一周，所有元件互相串联构成一闭合回路。



电刷之间的引出电势为每一支路个元件的电势和

被电刷短路，处于
换向状态



每个极下的元件组成一条支路。即单迭绕组的并联支路数正好等于电机的极数。 $2a=2p$

这是单叠绕组的重要特点之一。

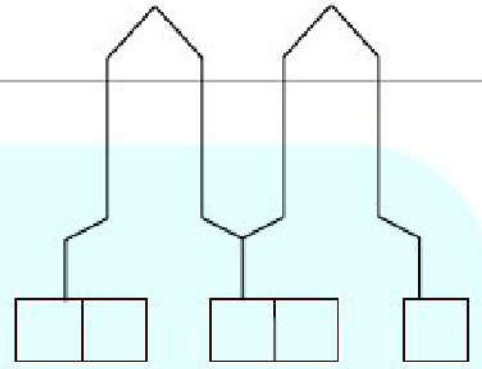
单叠绕组的特点

- ❖ 元件的两个出线端连接于相邻两个换向片上；
- ❖ 最大并联支路数等于磁极数， $2a=2p$ ；
- ❖ 整个电枢绕组的闭合回路中， 感应电动势的总和为零， 绕组内部无环流；
- ❖ 每条支路由不相同的电刷引出， 电刷不能少， 电刷数等于磁极数；
- ❖ 正负电刷引出的电动势即为每一支路的电动势， 电枢电压等于支路电压；
- ❖ 由正负电刷引出的电枢电流 I_a 为各支路电流之和， 即

$$I_a = 2ai_a$$

二、单波绕组

波绕组：首末端所接的两换向片相隔很远，两个元件紧相串联后形似波浪。



- 为了使紧相串联的元件所生的电势同向相加，元件边应处于相同磁极极性下，即合成节距 $y \approx 2\tau, y \neq 2\tau$
- 为了使绕组从某一换向片出发，沿电枢铁心一周后回到原来出发点相邻的一片上，则可由此再绕下去。

单波绕组：换向片极距 y_k 必须符合 $p \cdot y_k = k \pm 1$
 即
$$y_k = \frac{k \pm 1}{p}$$



单波绕组

实例： $p=2$ ， $Z=S=K=15$ 左单波绕组

1. 绕组数据计算

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon = \frac{15}{4} - \frac{3}{4} = 3$$

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

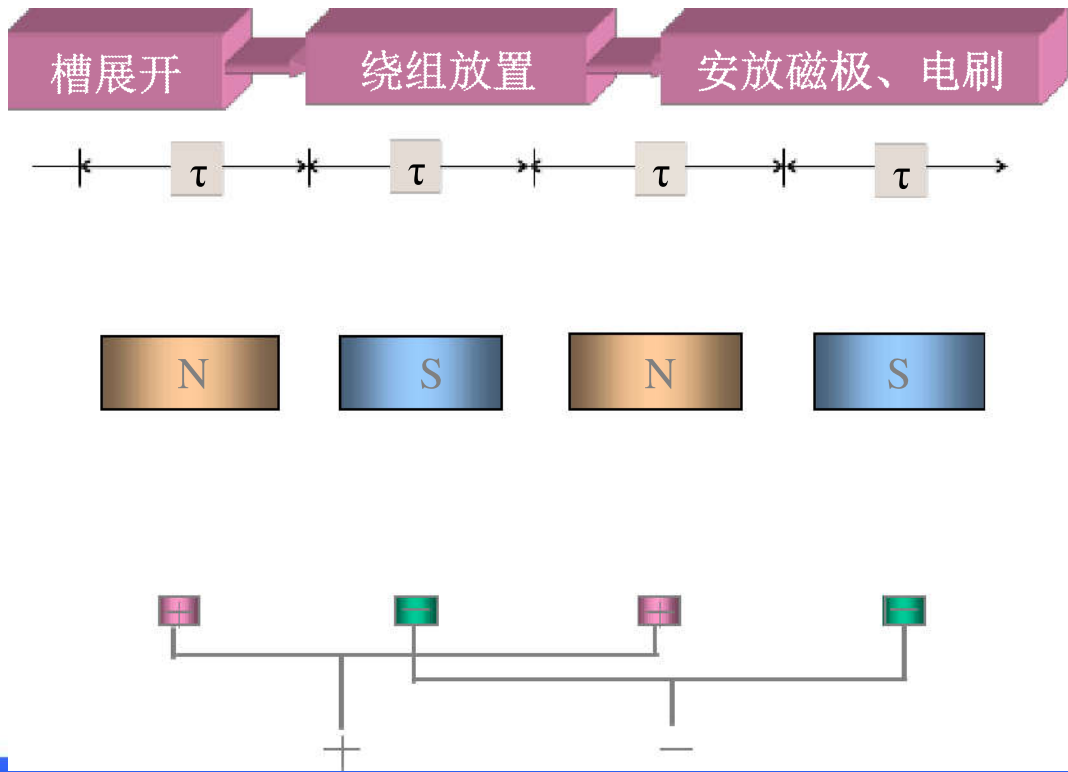
$$y_2 = y - y_1 = 7 - 3 = 4$$

计算数据 y 和 y_1

画绕组展开图

安放电刷和磁极

单波绕组展开图



单波绕组元件连接顺序图

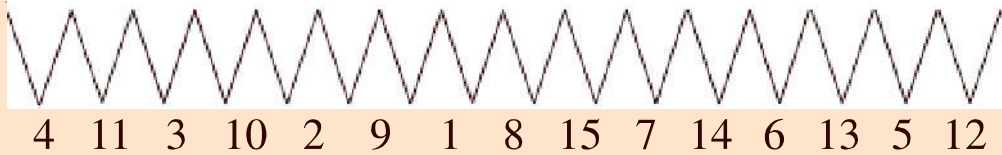
从绕组展开图可以看出，全部15个元件串联而构成一个闭合回路的顺序是：

1 → 8 → 15 → 7 → 14 → 6 → 13 → 5 → 12 → 4 → 11 → 3 → 10 → 2 → 9 → 1

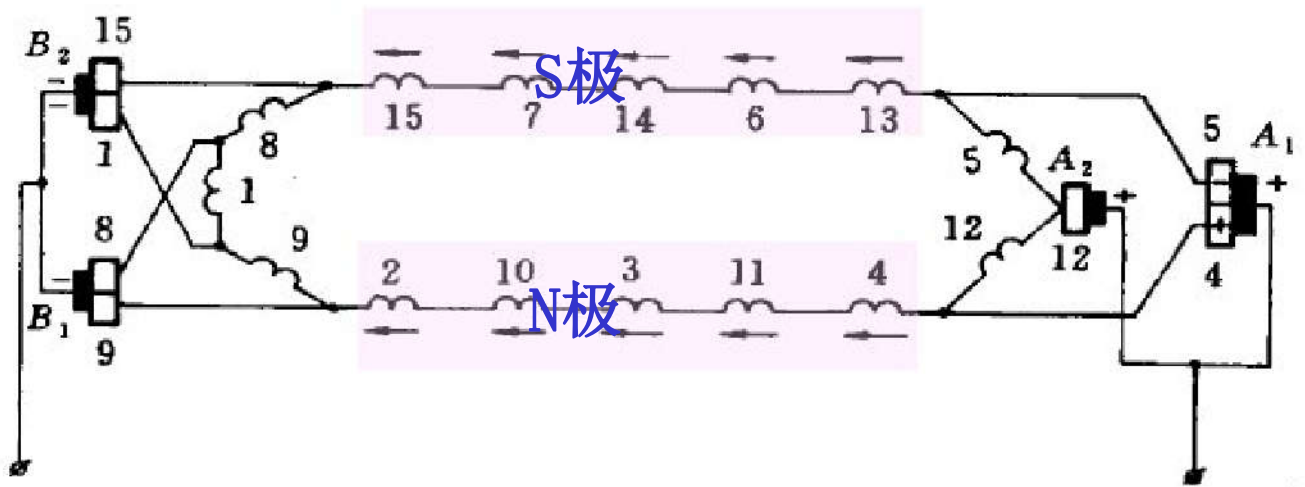
用联接

上层

下层边



单波绕组电路图



单波绕组把**相同极性下**的全部元件**串联起来组成一条支路**。由于磁极只有N、S之分，所以单波绕组的支路对数 a 与极对数多少无关，永远为1，即 $a=1$ 。

单波绕组的特点

- 同极性下各元件串联起来组成一条支路，支路对数 $a=1$ ，与磁极对数 p 无关。
- 当元件的几何尺寸对称时，电刷在换向器表面上的位置对准主磁极中心线，支路电动势最大。
- 电刷组数应等于极数（采用全额电刷）；
- 电枢电流 $I_a = 2i_a$ 。



直流电机绕组的归纳

- ❖ 所有的直流电机的电枢绕组总是自成闭路.
- ❖ 电枢绕组的支路数 ($2a$) 永远是成对出现, 这是由于磁极数 ($2p$) 是一个偶数.
注: a 一支路对数
 p 一极对数
- ❖ 为了得到最大的直流电势, 电刷总是与位于几何中线上的导体相接触。



单叠绕组和单波绕组的区别

单叠绕组：先串联所有上元件边在同一极下的元件，形成一条支路。每增加一对主极就增加一对支路。 $2a=2p$ 。

➤ 叠绕组并联的支路数多，每条支路中串联元件数少，适用于较大电流、较低电压的电机。

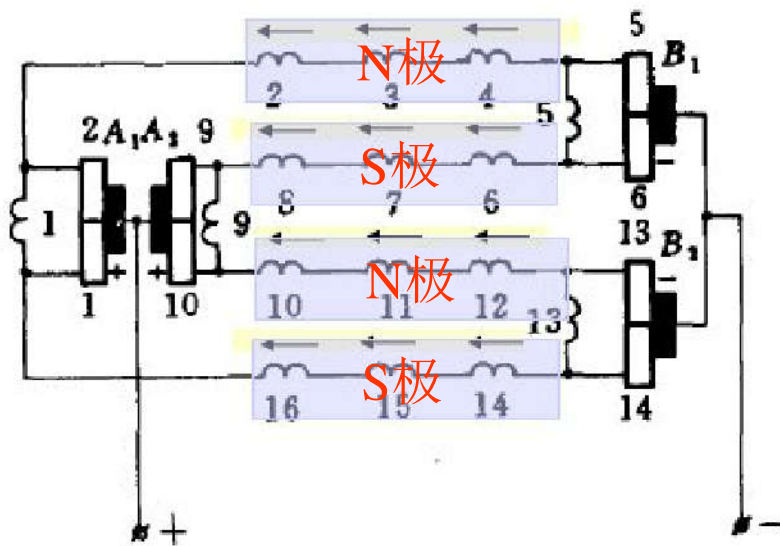
单波绕组：把全部上元件边在相同极性下的元件相连，形成一条支路。极数的增减与支路数无关。 $2a=2$ 。

➤ 波绕组并联的支路数少，每条支路中串联元件数多，适用于较高电压、较小电流的电机。

思考题

❖ 有一四极直流电机，电枢为单叠绕组，如发生以下故障：

- (1) 有一个主磁极失磁；
 - (2) 有一对主磁极失磁；
 - (3) 有一个电刷跌落；
 - (4) 有一对相邻电刷跌落
- 试分析电机会有什么现象？





❖作业:

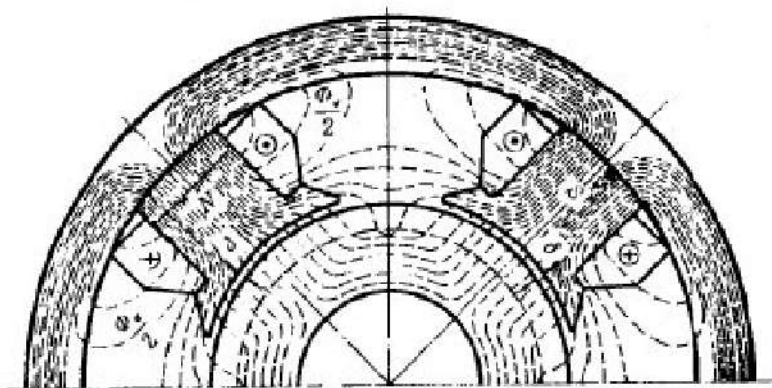
p336思考题

16-1, 16-2, 16-7

§ 3-3 直流电机的磁场和电枢反应

一、空载时磁场分布

磁路从气隙1出发经—电枢齿—电枢轭—电枢齿2—气隙2—主磁极2—定子轭—主磁极1，最后又回到气隙1



直流电机空载时的磁场分布

磁通、磁路

主磁通、主磁路：由N极出发，经气隙进入电枢齿部，经电枢铁心的磁轭到另外的电枢齿，通过气隙进入S极，再经定子轭回到原来N极。

主磁通交链励磁绕组和电枢绕组，在电枢绕组中感应电势，产生电磁转矩。

漏磁通、漏磁路：不进入电枢铁心，直接经过相邻的磁极或定子轭。

影响饱和程度

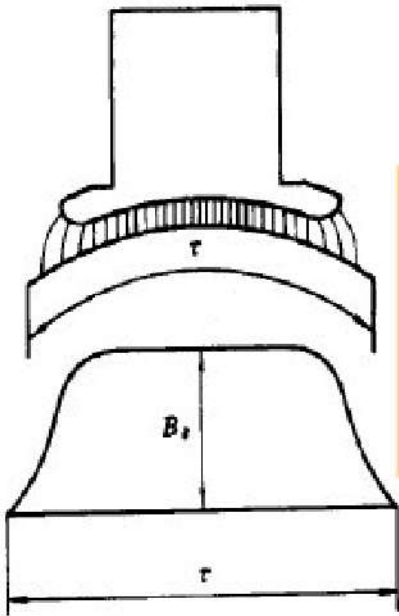


主磁通和漏磁通

- ❖ 主磁通 Φ 和漏磁通 Φ_{σ} 由同一磁动势建立；
- ❖ Φ 所走的路径气隙小，磁阻小；
- ❖ 漏磁通所走的路径气隙大，磁阻大；
- ❖ 漏磁系数：（1.15~1.25）

$$k_{\sigma} = 1 + \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi}; \quad \Phi_p = \Phi + \Phi_{\sigma} = k_{\sigma} \Phi$$

气隙磁场

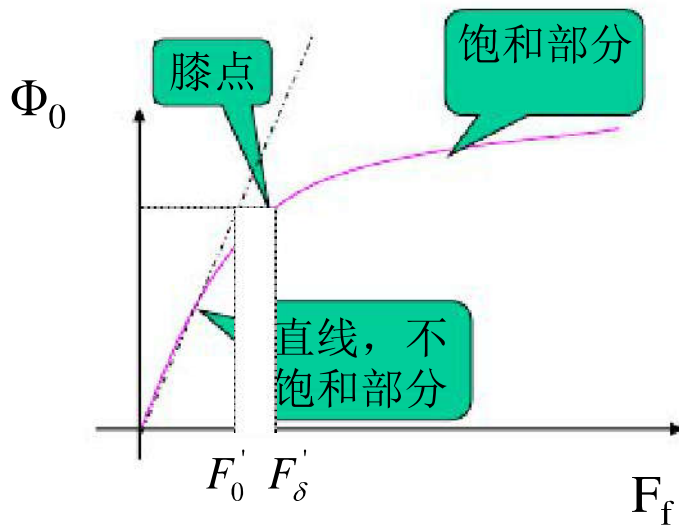


在一个磁极的范围内，励磁磁势大小一样， B_δ 大小完全与气隙长度成反比。

在主极直轴附近的气隙较小，并且气隙均匀，磁阻小，即此位置的主磁场较强，在此位置以外，气隙逐渐增大，主磁场也逐渐减弱，到两极之间的几何中线处时，磁密等于0。

空载磁化曲线

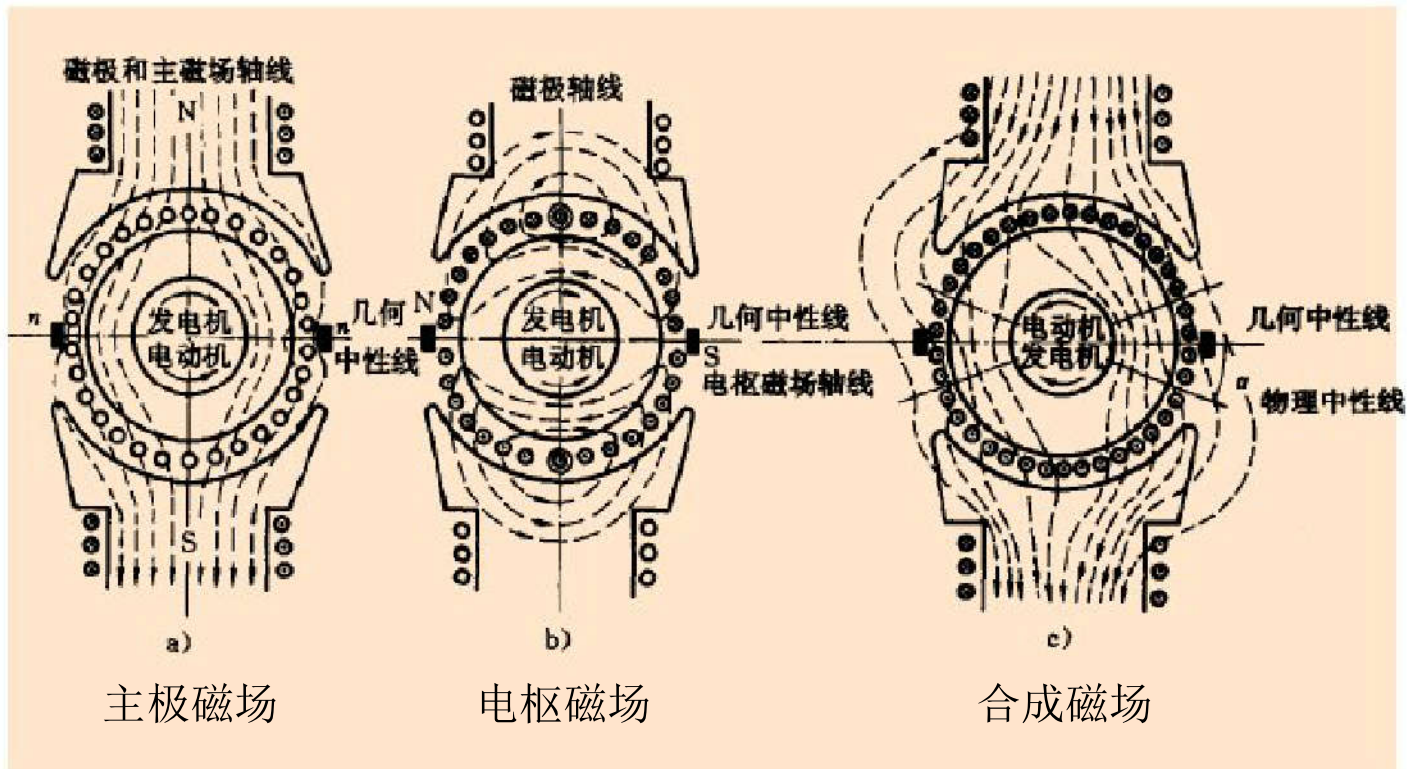
磁化曲线：表示空载主磁通 Φ_0 与主极磁动势 F_f 之间的关系曲线， $\Phi_0=f(F_f)$ 。通过实验或计算得到。



$$k_{\mu} = \frac{F'_{\delta}}{F'_0}$$

(约1.1~1.35)

二、直流电机负载时磁场

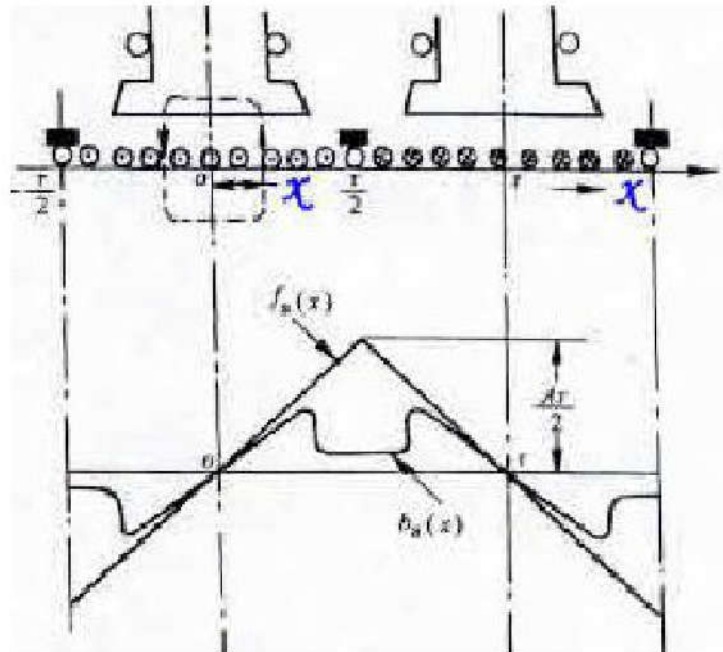
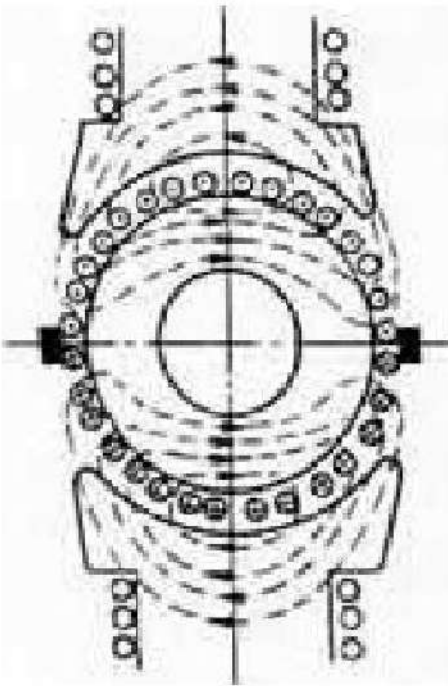




电枢磁场、电枢反应的定义

- ❖ 直流电机负载后，电枢绕组有电流通过，该电流建立的磁场简称**电枢磁场**，电枢磁场对主磁场的影响就称为**电枢反应**。
- ❖ 当电机带上负载后，电机的气隙磁场由主磁场和电枢两个磁场共同决定。电枢磁动势的出现，使气隙磁场发生畸变，即电枢反应。
- ❖ 各支路电流都是通过电刷引入或引出，因此**电刷是电枢表面上电流分布的分界线**。电枢磁势的轴线总是与电刷轴线相重合。

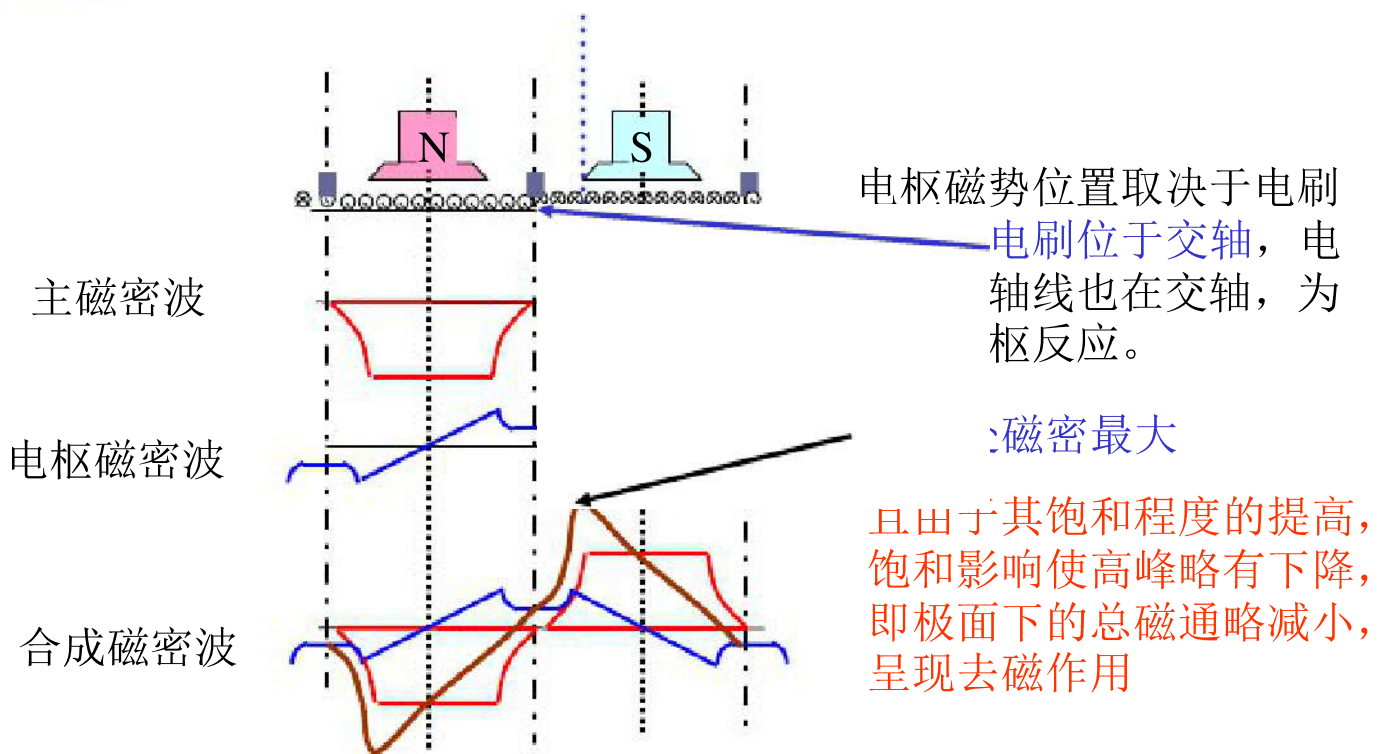
1 交轴磁势和交轴电枢反应



$$F_{ax} = \frac{1}{2} \left(\frac{Ni_a}{\pi D_a} \cdot 2x \right) \quad B_{ax} = \mu_0 \cdot \frac{F_{ax}}{\delta}$$



交轴电枢反应

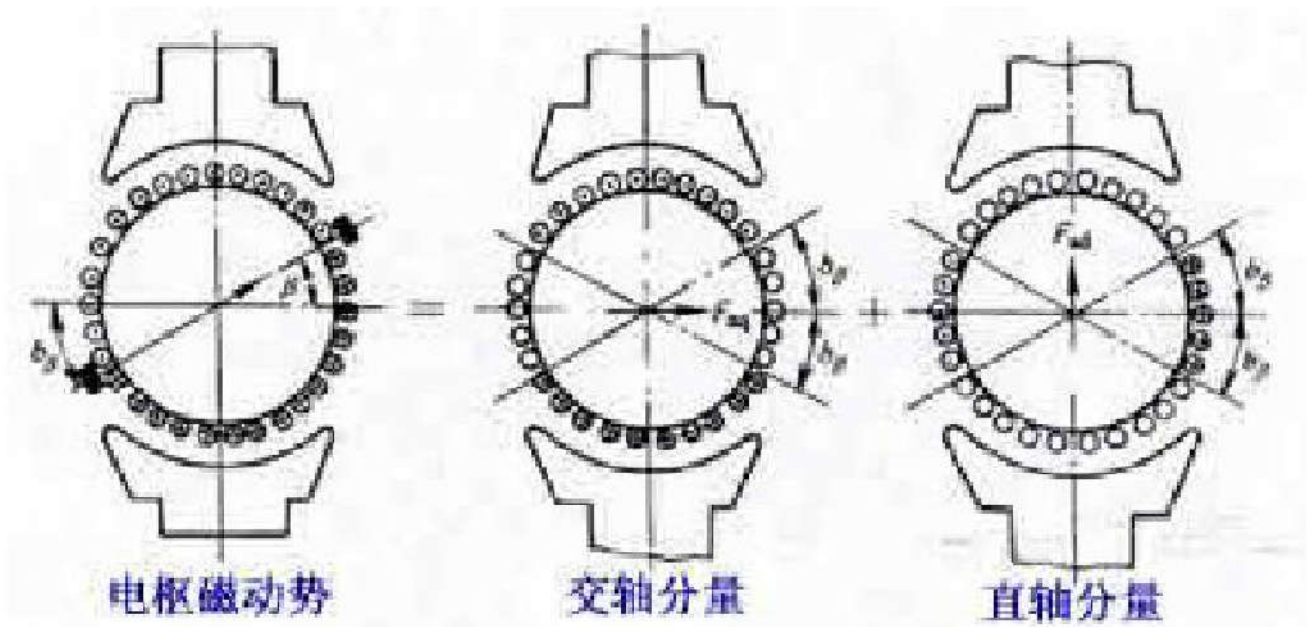




交轴电枢反应对气隙磁场的影响:

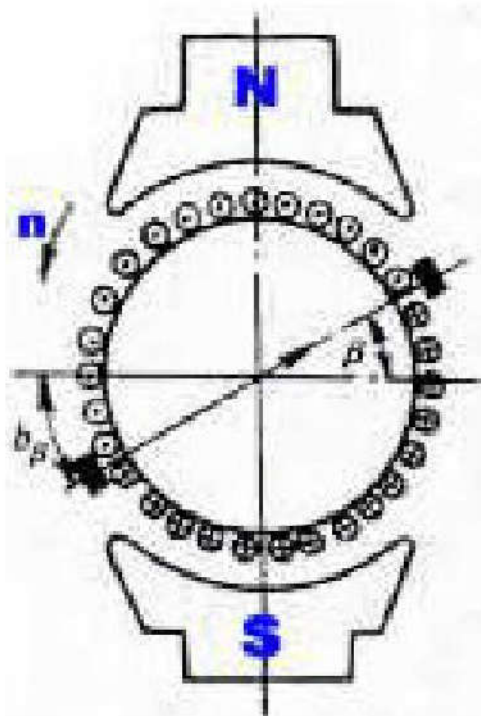
- 使气隙磁场分布发生畸变;
- 使物理中性线位移 (空载时, 电机物理中性线与几何中性线重合; 负载时, 物理中性线发生偏转, **发电机: 顺着旋转方向**);
- 磁路未饱和时, 每极磁通 Φ 不变
- 考虑饱和情况下, 呈去磁作用

2 直轴磁势和直轴电枢反应



电刷不在几何中心线上，电枢磁势分为交轴和直轴分量

直轴电枢反应



增磁与去磁与电刷的旋转角度有关。

若电机为发电机

★★直流发电机的电刷是顺转向偏移一个小角度时，直轴电枢反应对主极磁场的作用将是去磁的。

★★而直流发电机的电刷若是逆转向偏移一个小角度时，直轴电枢反应对主极磁场的作用将是增磁的。



§ 3-4 直流电机的感应电势和电磁转矩

一、直流电机的电枢电势

电枢电势：直流机正、负电刷之间的感应电势，即每个支路里的感应电势。

计算：求出一根导体在一个极距范围内切割气隙磁密的平均感应电势，乘上一个支路里总的导体数。

直流电机的感应电势

具体计算:

一根导体: $e_{av} = B_{av} \cdot l \cdot v$ B_{av} : 平均磁密; l : 导体长度;

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

v : 电枢旋转线速度
 n : 电枢旋转速度 (r/min)

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

ϕ : 每极磁通

支路电势: $E_a = \frac{N}{2a} \cdot e_{av} = \frac{N}{2a} \cdot \frac{\Phi}{\tau \cdot l} \cdot l \cdot 2p\tau \cdot \frac{n}{60}$ N : 总导体数

$$= \frac{pN}{60a} \cdot \Phi \cdot n = C_e \cdot \Phi \cdot n$$

C_e : 电势常数



电枢电势的认识

$$E_a = \frac{pN}{60a} \cdot \Phi \cdot n = C_e \cdot \Phi \cdot n$$

1. 直流电机的感应电势与每极磁通量及转速有关。

每极磁通量保持不变，直流电机的感应电势将和转速成正比。

转速保持不变，直流电机的感应电势将和每极磁通量成正比。

2. 电刷间的感应电势仅和极面下的总磁通量有关，而和极面下磁通密度的分布情况无关

电枢电势的认识

$$E_a = \frac{pN}{60a} \cdot \Phi \cdot n = C_e \cdot \Phi \cdot n$$

3. 电刷在交轴，如果移动电刷位置，则支路中一部分导体的感应电势将因方向相反而互相抵消，导致电刷间电势 E_a 的减小。

$$E_a = C_e \Phi n$$

Φ 为相邻两电刷所

每极有效磁通

4. 使用负载时的每极磁通，

应电势 E_a 。

5. 当负载时，由于电枢回路的电阻电压降，直流发电机电刷间的端电压 U 比负载时的电刷电势 E_a 小



二、直流电机的电磁转矩

一根导体的平均电磁力:

$$F_{av} = B_{av} \cdot l \cdot i_a \quad i_a = \frac{I_a}{2a}$$

电磁转矩:

$$T_{av} = F_{av} \cdot \frac{D}{2} = B_{av} \cdot l \cdot i_a \cdot \frac{D}{2} \quad D = \frac{2p\tau}{\pi}$$

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

C_T : 转矩常数



电磁转矩的认识

$$T = \frac{pN}{2a\pi} \cdot \Phi \cdot I_a = C_T \cdot \Phi \cdot I_a$$

一台制造好的电机，它的电磁转矩正比于每极磁通和电枢电流，与磁密分布无关。

电势常数 C_e 和转矩常数 C_T 决定于结构常数。它们的关系为：

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



三、电磁功率

电枢电功率

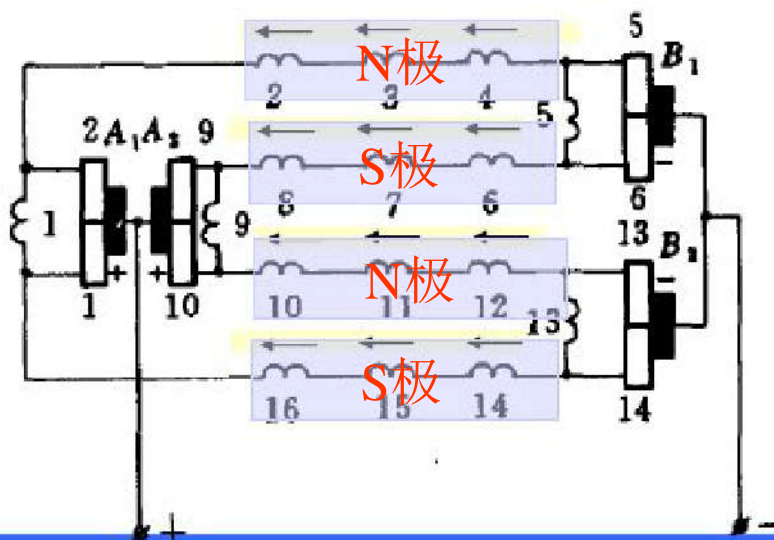
$$\begin{aligned} P_M &= E_a \cdot I_a = C_e \cdot \Phi \cdot n \cdot I_a \\ &= \frac{2\pi}{60} \cdot C_T \cdot \Phi \cdot n \cdot I_a = T \cdot \Omega \quad \text{机械功率} \end{aligned}$$

直流电动机：从电源吸收的电功率，通过电磁感应作用，转换成轴上的机械功率；

直流发电机：原动机克服电磁转矩的制动作用所做的机械功率等于通过电磁感应作用在电枢回路所得到的电功率。

思考题1

- ❖ 电刷之间的感应电势与某一导体的感应电势有什么不同
- ❖ 各种数量之间的相互关系：导体总数、换向片数、元件数、圈边数、槽数、每元件匝数、每一槽中并列圈边数





思考题2

- ❖ 一台六极电机原为单波绕组，加改绕成单叠绕组，并保持元件数、导体数、每元件匝数、每槽并列圈边数不变，问该电机的额定容量是否改变？额定电压、额定电流是否改变？

答：单波时，并联支路数恒为2，设导体额定电流为I，则电刷的电流为2I；电刷间感应电势为 $E_a = E_2$ 。

单叠时，并联支路数等于极数， $2a = 2p = 6$ ，则电刷的电流为6I；电刷间电势为 $E_a = E_6 = E_2/3$ 。

$$E_a = \frac{pN}{60a} \cdot \Phi \cdot n = C_e \cdot \Phi \cdot n$$



❖作业:

p336思考题

16-1, 16-2, 16-7, 16-9, 16-10

p339习题

16-7, 16-8