

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



第三章 直流电机

第一节 直流电机的用途及基本工作原理

一、直流电机的用途及特点

1、用途：机械能与直流电能的相互转化

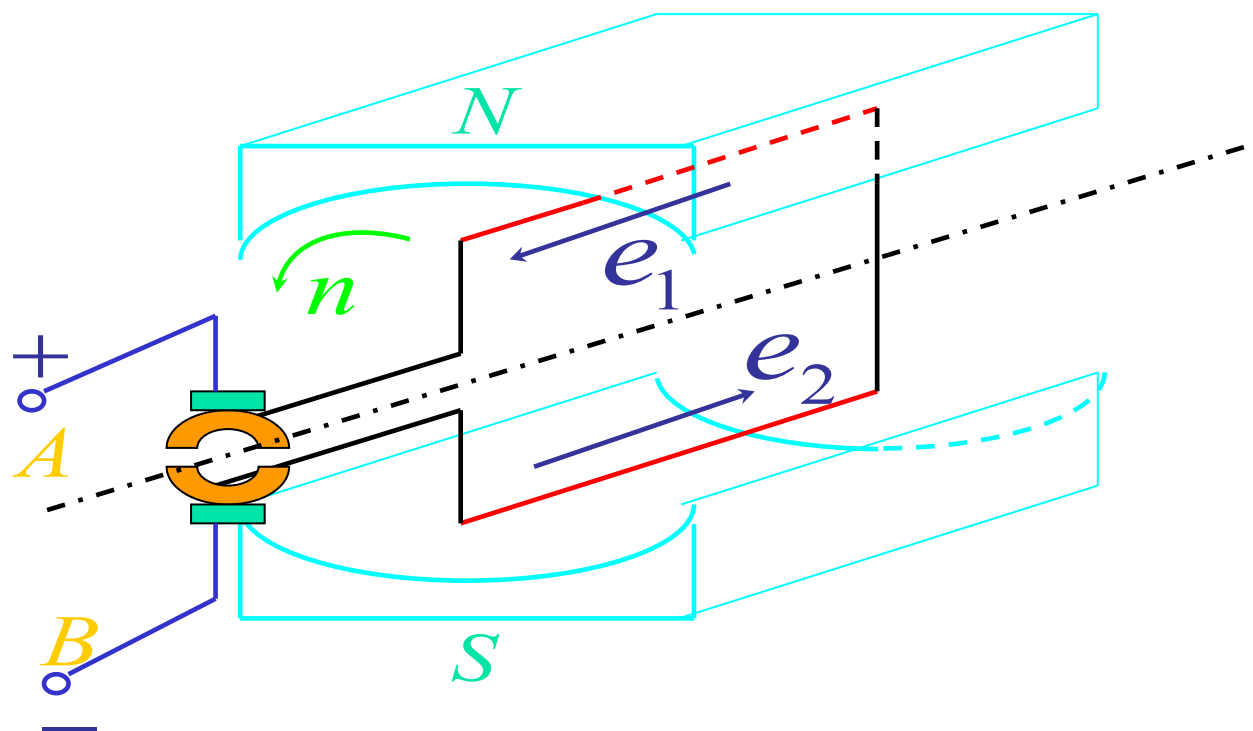
直流发电机：机械能——直流电能

直流电动机：直流电能——机械能

2、特点：优点突出而缺点明显

- (1)调速范围大，易平滑调速
- (2)起、制动转矩大，过载能力强
- (3)易控制，可靠性高
- (4)换向问题，维护问题

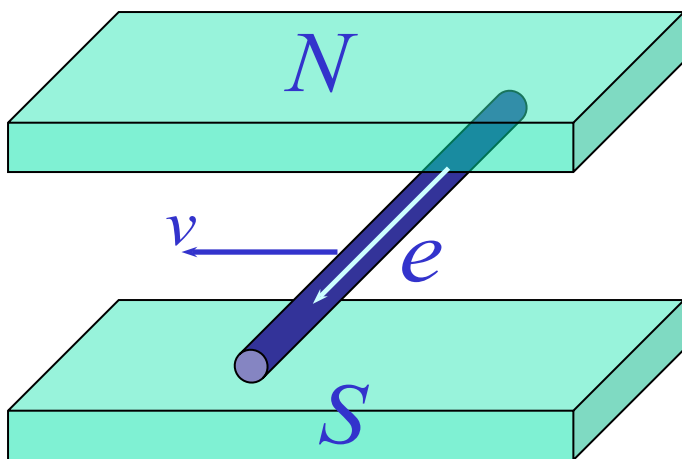
二、直流发电机物理模型



二、直流发电机物理模型

电磁感应定律

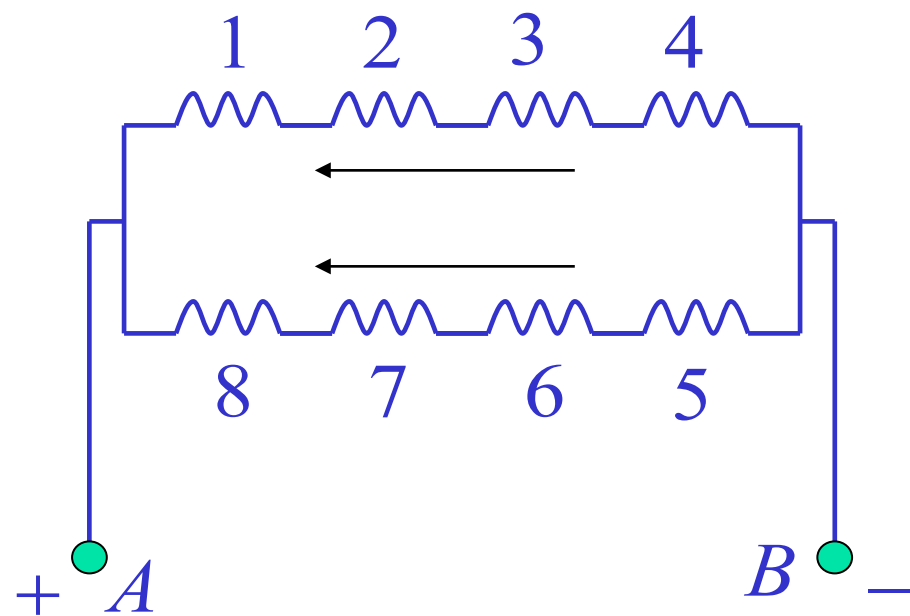
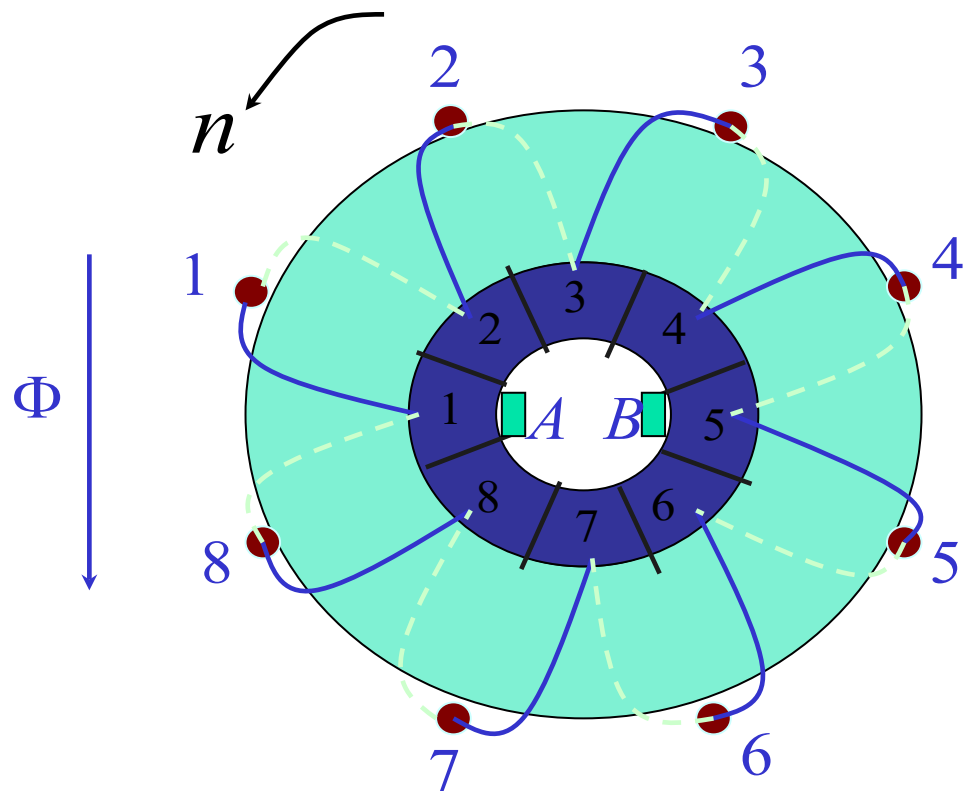
- 切割电动势：导体与磁场有相对运动



$$e = Blv$$

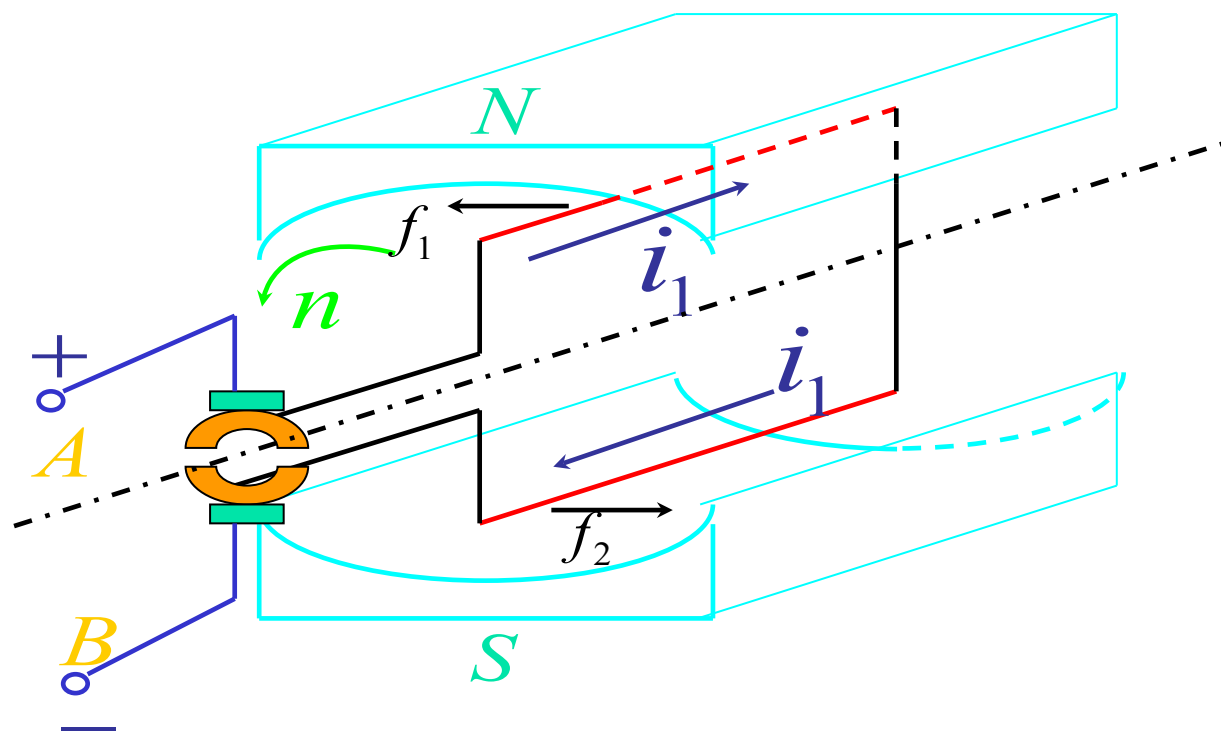
切割电动势的方向与磁场和运动方向的关系遵循右手定则

二、直流发电机物理模型



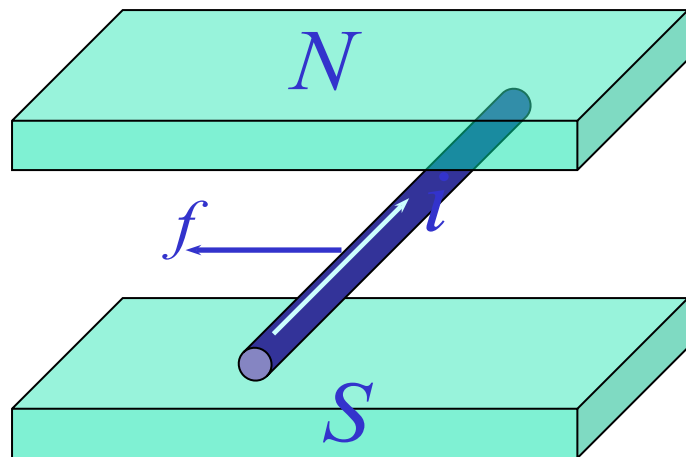
并联支路图

三、直流电动机物理模型



三、直流电动机物理模型

- 安培力：在磁场中磁场对载流导体施加的力



$$f = Bli$$

安培力的方向与磁场和电流的关系遵循左手定则

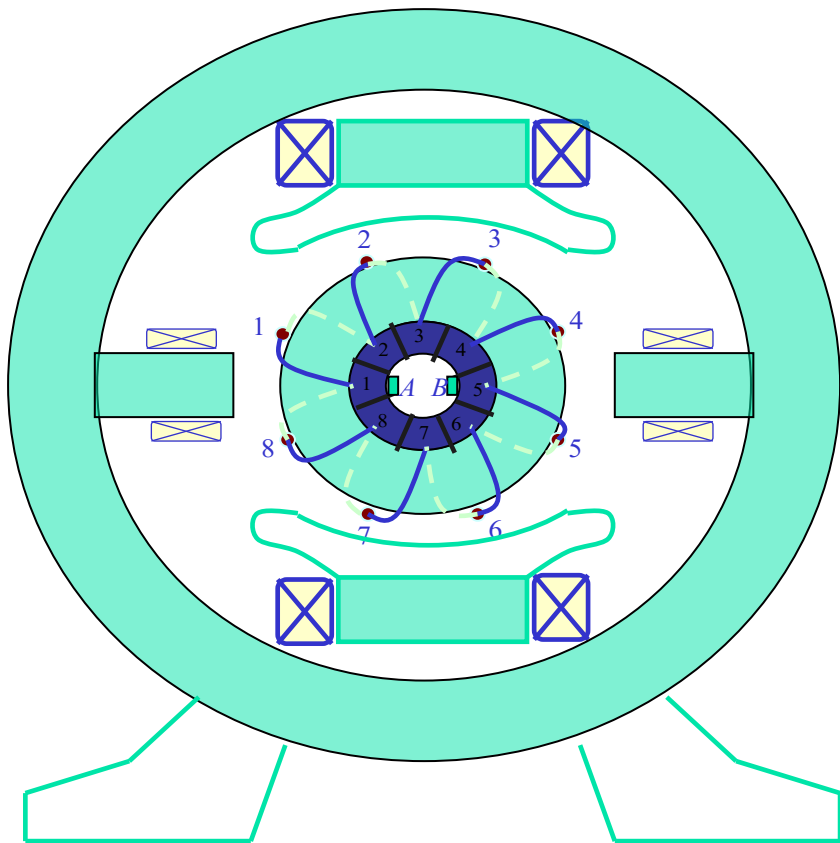


四、直流电机的可逆原理

- 直流发电机和直流电动机两者结构完全相同，只是运行条件不同
- 直流电机，适当改变其运行条件即可作为发电机运行，也可作为电动机运行
- 直流电机的运行状态具有可逆性。

第二节直流电机的主要结构与铭牌数据

■ 直流电机的主要结构



1、转子部分

- (1) 轴;
- (2) 电枢铁心;
- (3) 电枢绕组;
- (4) 换向器;
- (5) 风扇等。

2、定子部分

- (1) 机座;
- (2) 主磁极;
- (3) 励磁绕组;
- (4) 换向极;
- (5) 电刷装置等。

第二节直流电机的主要结构与铭牌数据

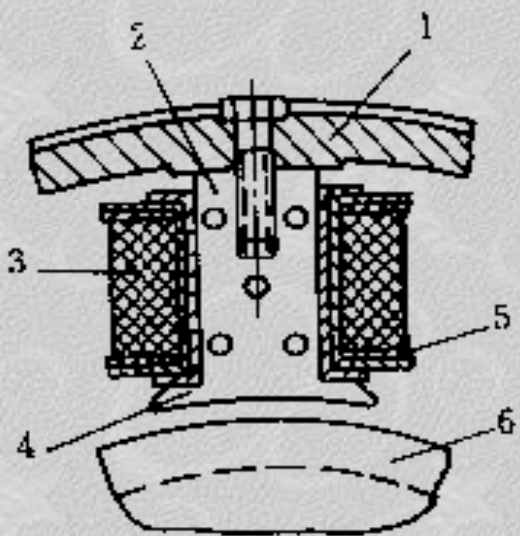


图 3.6 主磁极装置

1——机座；2——极身；3——励磁线圈；
4——极靴；5——框架；6——电枢；

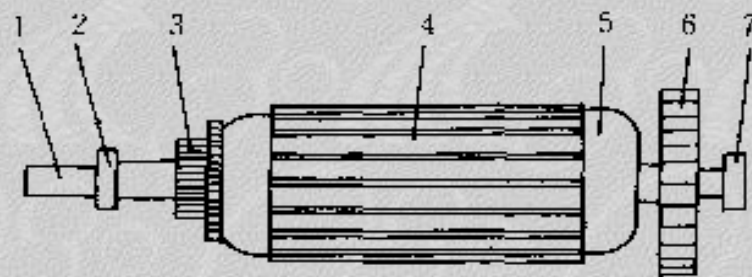


图 3.7 直流电机电枢

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

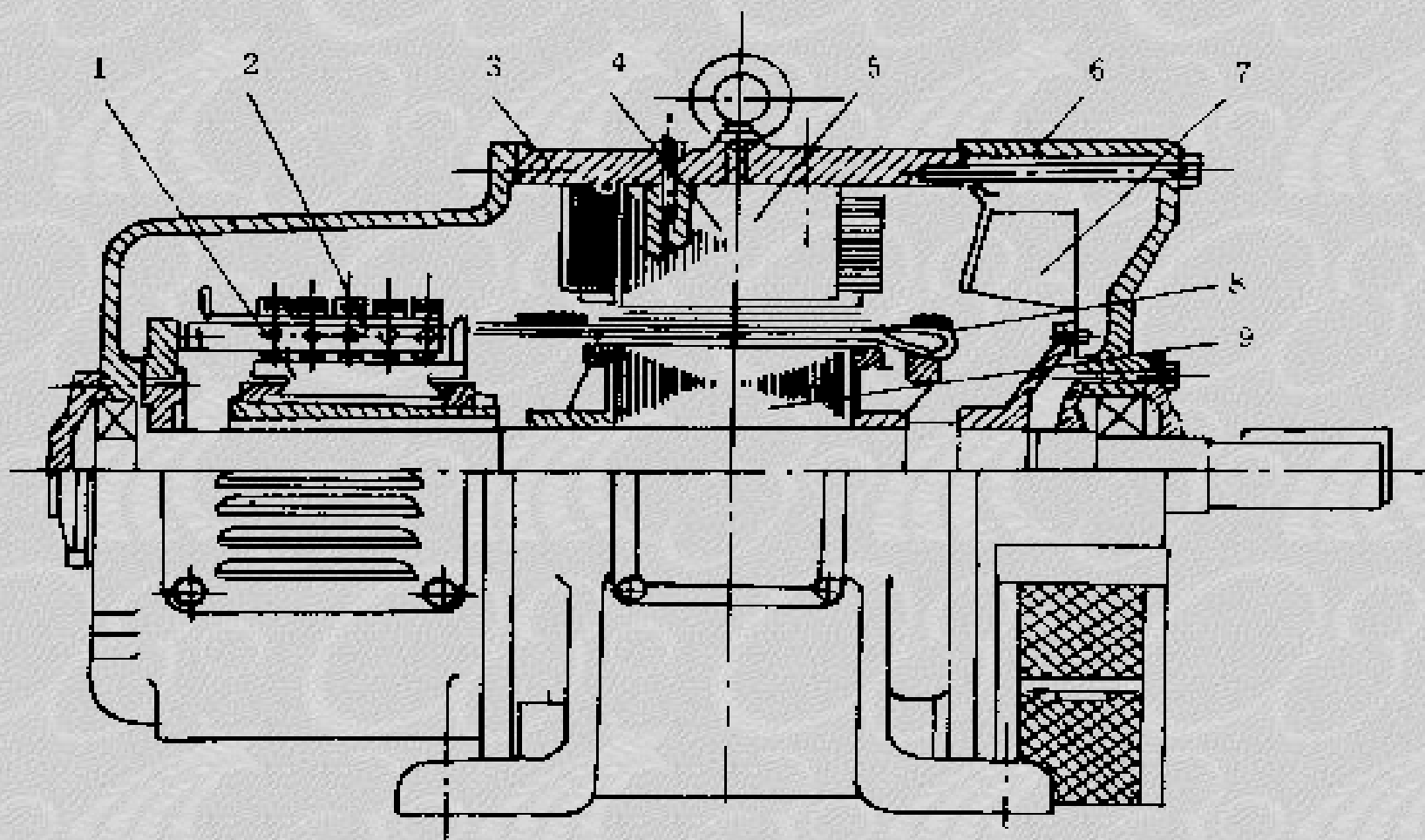


图 3.4 小型直流电机的结构

1——换向器； 2——电刷杆； 3——机座； 4——主磁极； 5——换向极；
6——端盖； 7——风扇； 8——电枢绕组； 9——电枢铁心

第二节直流电机的主要结构与铭牌数据

直流电机的铭牌数据

- 额定容量（功率）： $P_N(W, kW)$ 对于发电机： $P_N = U_N I_N$
- 额定电压： $U_N(V)$
- 额定电流： $I_N(A)$
- 额定转速： $n_N(r/min)$ 对于电动机： $P_N = U_N I_N \eta_N$
- 励磁方式和额定励磁电流： $I_{fN}(A)$
- 额定效率： η_N $P_N = T_{2N} \Omega_N = T_{2N} n_N / 9.55$
- 额定转矩： $T_N(N \cdot m)$ 额定功率是W时，系数为9.55；
额定功率是kW时，系数为9550
- 额定输出转矩： $T_{2N}(N \cdot m)$

第二节直流电机的主要结构与铭牌数据

例题：他励直流电动机 $P_N = 160kW$ $U_N = 220V$ $\eta_N = 90\%$

$n_N = 1500 r/min$ 求输入功率 $P_1 = ?$ 额定电流 $I_N = ?$ 输出转矩

$T_{2N} = ?$

解：
$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_N} = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{160}{0.9} = 177.8(kW)$$

$$I_N = \frac{P_1}{U_N} = \frac{P_N}{U_N \eta_N} = 808.1(A)$$

$$T_{2N} = 9.55 \frac{P_N}{n_N} = 9.55 \times \frac{160 \times 10^3}{1500} = 1018.7(N \cdot m)$$

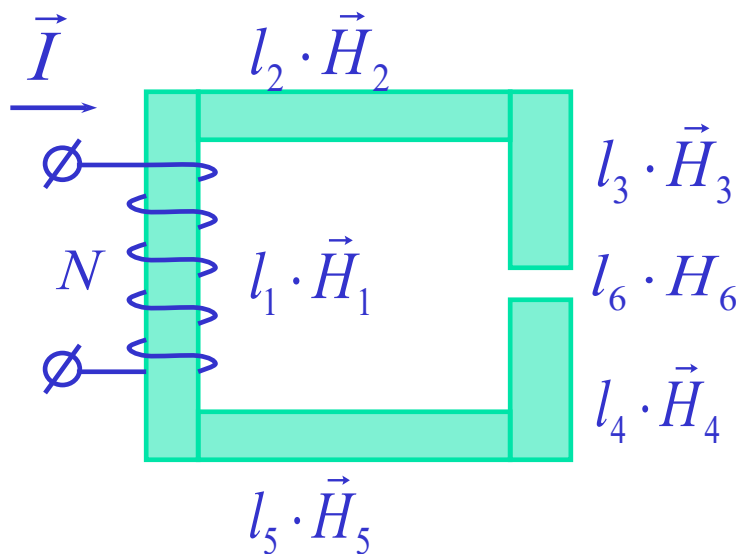


四、国产直流电机的主要系列产品

- Z2系列：一般用途的中、小型直流电机
- Z和ZF系列：一般用途的大、中型直流电机系列；Z是直流电动机，ZF是直流发电机
- ZT系列：恒功率且调速范围较大的拖动系统里的广调速直流电动机
- ZZJ系列：冶金辅助拖动机械用的冶金起重直流电动机
- ZQ系列：电力机车、工矿电机车和蓄电池供电电车用的直流牵引电动机
- ZH系列：船舶上各种辅助机械用的船用直流电动机
- ZA系列：用于矿井和有易爆气体场所的防爆安全型直流电动机
- ZU系列：用于龙门刨床的直流电动机
- ZKJ系列：冶金、矿山挖掘机用的直流电动机

回顾-第一章的磁路欧姆定律

利用该公式计算较复杂，有时很难计算出结果，需简化。
例如： N 为线圈匝数，单位：匝

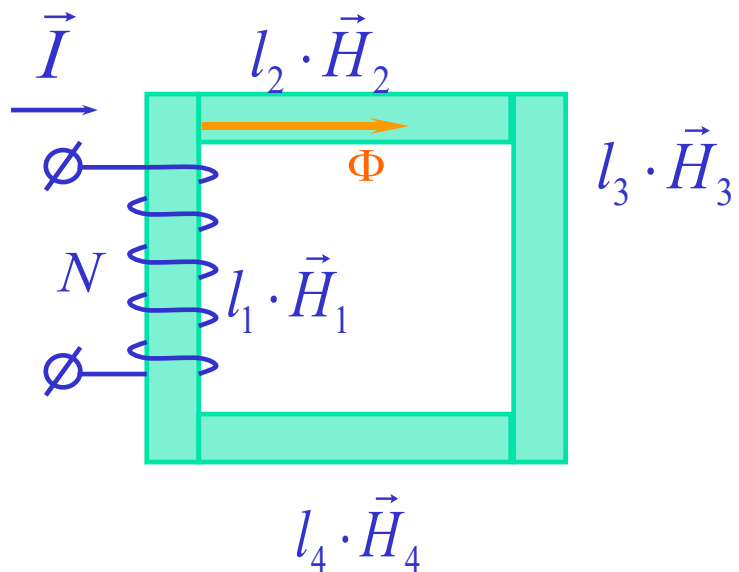


$$\sum_1^n \vec{H}_k \bullet l_k = \sum \vec{I} = \vec{I}N$$

\vec{I} 叫励磁电流； $\vec{H}_k \bullet l_k$ 为每一段的磁位降；
 $\sum \vec{I}$ 是全电流； $\vec{F} = \vec{I}N$ 是磁势。

回顾-第一章的磁路欧姆定律

以无分支铁心磁路为例，如图：



$$B = \Phi / S = \mu H$$

$$\oint_S H dl = HL = NI = F$$

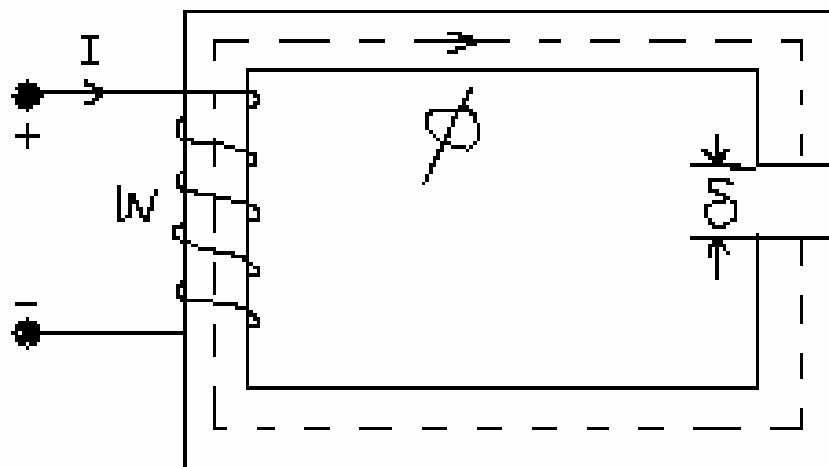
$$F = \frac{B}{\mu} L = \frac{L}{\mu S} \Phi \iff R = \frac{L}{\mu S}$$

令 $R_m = \frac{L}{\mu S}$ 称为磁阻

$$F = \Phi R_m \quad \text{称为磁路欧姆定律}$$

回顾-第一章的例题

0—12. 对于图 0—8, 如果铁心用 D_{23} 硅钢片迭成, 截面积 $A_{Fe} = 12.25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, 铁心的平均长度 $l_{Fe} = 0.4 \text{ m}$, 空气隙 $\delta = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}$, 线圈的匝数为 600 匝, 试求产生磁通 $\phi = 11 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ 时所需的励磁磁势和励磁电流。





解：在铁心迭片中的磁密为

$$B_{Fe} = \frac{\phi}{A_{Fe}} = 11/12.25 = 0.9 \quad (\text{T})$$

根据 D_{23} 硅钢片磁化曲线查出 $H_{Fe} = 306 \quad (\text{A/m})$

在铁心内部的磁位降 $F_{Fe} = H_{Fe} * l_{Fe} = 306 * 0.4 = 122.4 \quad (\text{A})$

在空气隙处，当不考虑气隙的边缘效应时

$$B_a = B_{Fe} = 0.9 \quad (\text{T})$$

$$\text{所以 } H_a = \frac{B_a}{\mu_0} = \frac{0.9}{4\pi \times 10^{-7}} = 7.15 \times 10^5 \quad (\text{A/m})$$

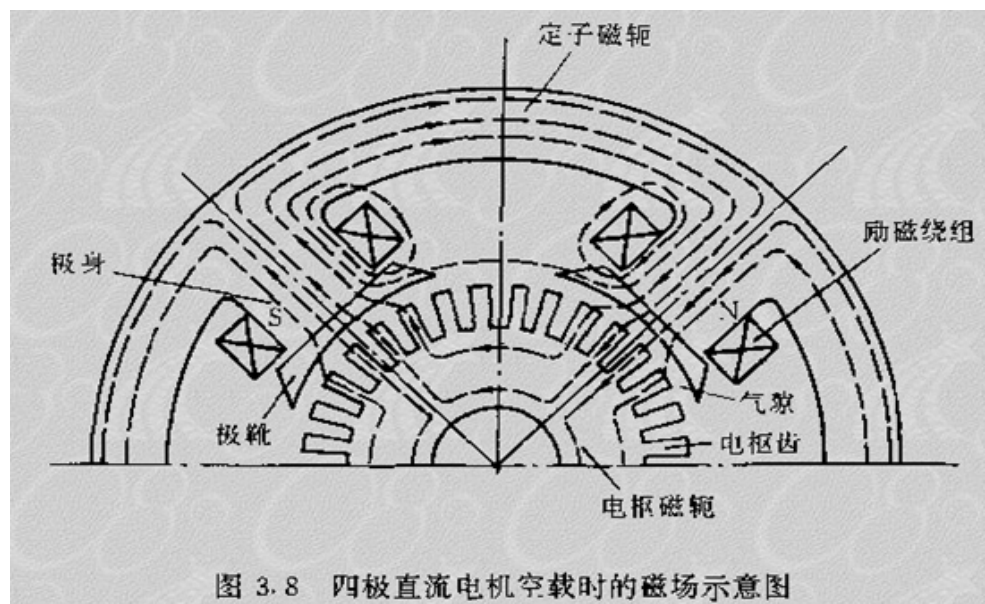
$$\text{故 } F_a = H_a \times \delta = 7.15 \times 10^5 \times 0.5 \times 10^{-3} = 357.5 \quad (\text{A})$$

则励磁磁势 $F = F_a + F_{Fe} = 357.5 + 122.4 = 479.9 \quad \text{安匝}$

$$\text{励磁电流 } I_f = \frac{F}{W} = \frac{479.9}{600} = 0.799 \quad (\text{A})$$

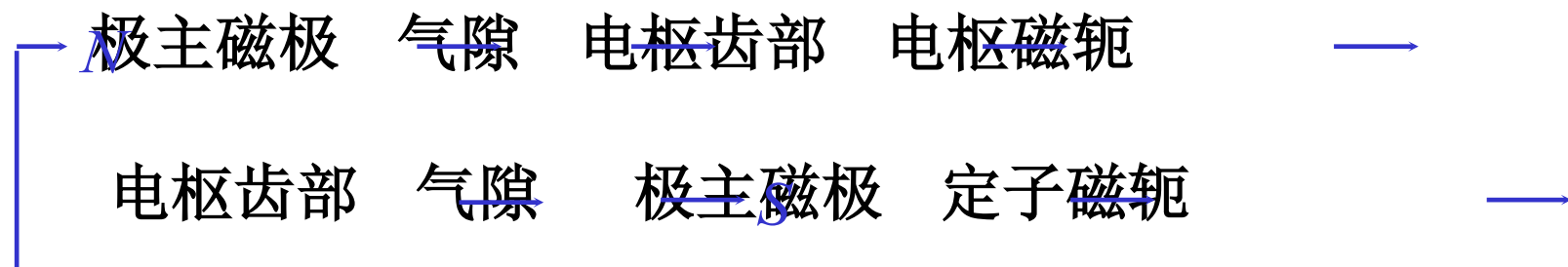
第三节 直流电机的磁路、空载时的气隙磁密与空载磁化特性

一、直流电机的磁场（空载运行）：



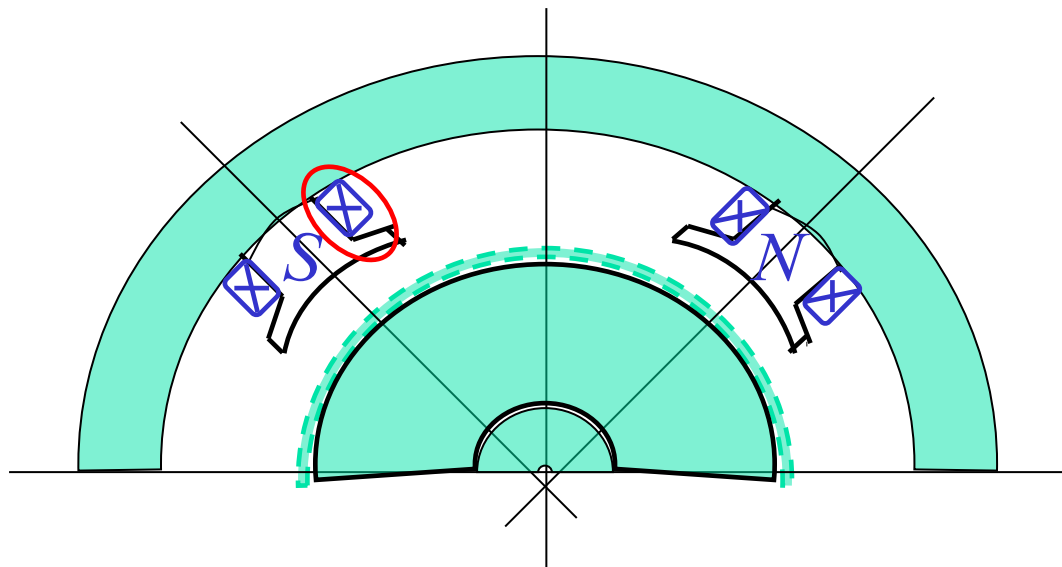
以四极电机为例
空载运行指仅有励磁电流 I_f ，无电枢电流 I_a

1、主磁路：



一、直流电机的磁场（空载运行）

2、漏磁路：



注：1）主磁路计算分段
气隙、电枢齿、电枢磁轭、
主磁极、定子磁轭五段
2）负载运行时电机磁场由
各绕组共同产生

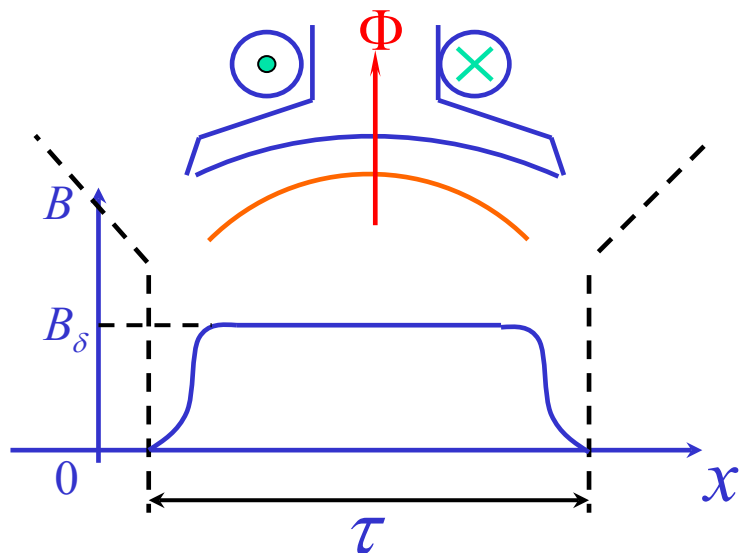
定义：

主磁通：同时连接励磁绕组和电枢绕组的磁通。
它产生电磁转矩。

漏磁通：指连接一个绕组本身的磁通。
它仅增加磁路的饱和程度。

二、空载运行时气隙磁通密度的分布波形

磁场方向：穿出电枢表面为正

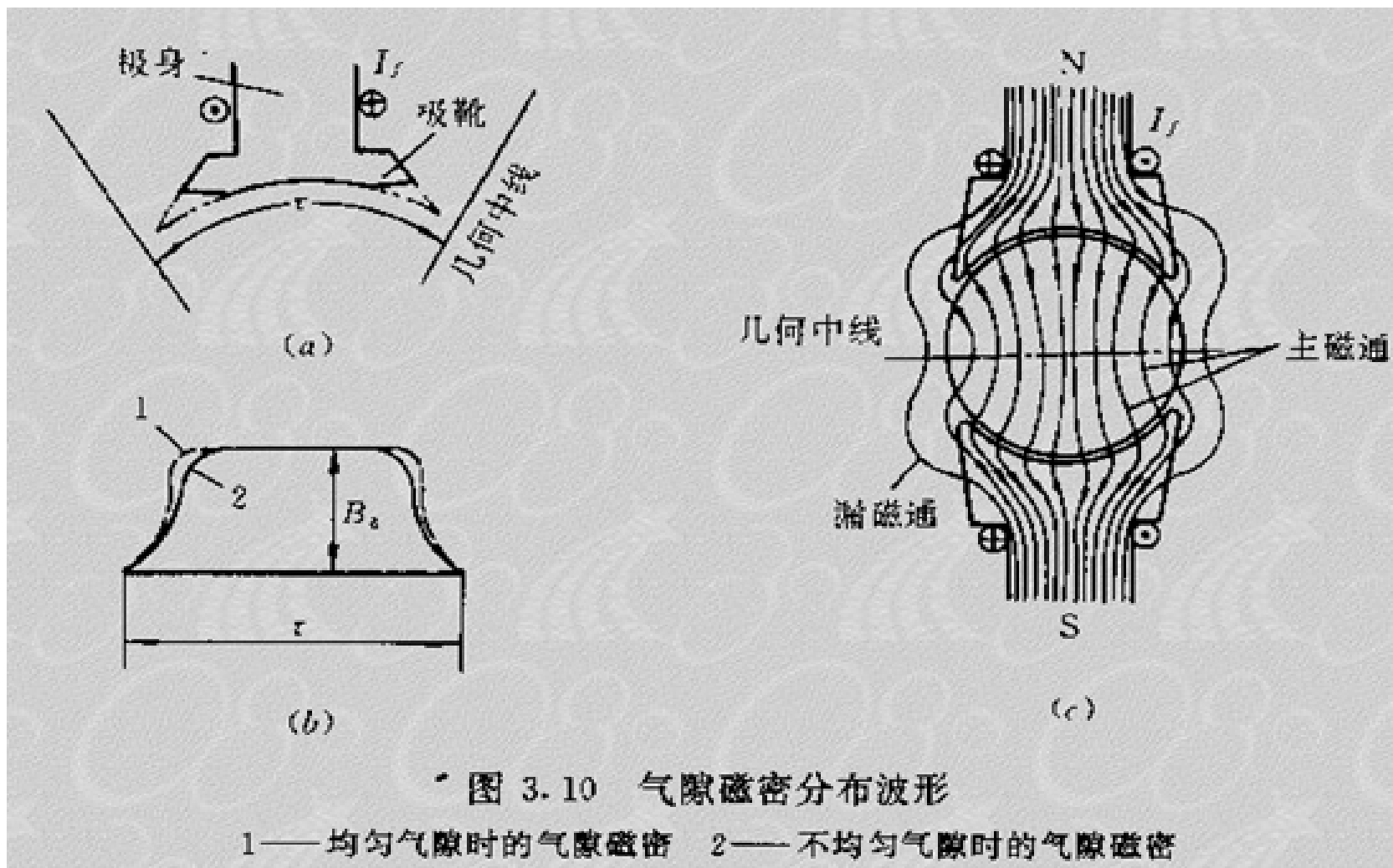


- 1、磁极中心部分：气隙小，磁密大。
- 2、两极靴尖部：磁密小。
- 3、两极靴外：磁密迅速减小。
- 4、两极之间的几何中线处：磁密为0。

$$F = \frac{B}{\mu} L = \frac{L}{\mu S} \Phi$$

空气中 μ_0 很小，磁路中的磁位降，主要集中在气隙中。 F 为每极励磁磁通势

二、空载运行时气隙磁通密度的分布波形



三、空载磁化特性

1、定义：空载时气隙每极磁通 Φ 与空载励磁磁通势 F_f 或空载励磁电流 I_f 的关系。即

$$\Phi = f(F_f) \quad \text{或} \quad \Phi = f(I_f)$$

称为空载磁化特性。

研究它的意义：后面要介绍的电枢电势、电磁转矩等，都对磁通有所要求。

为得到所需要的磁通，需要确定励磁电流。

三、空载磁化特性

2、计算：由需要的气隙每极磁通求出空载励磁电流

$$\Phi \Rightarrow B \Rightarrow H \Rightarrow I_f$$

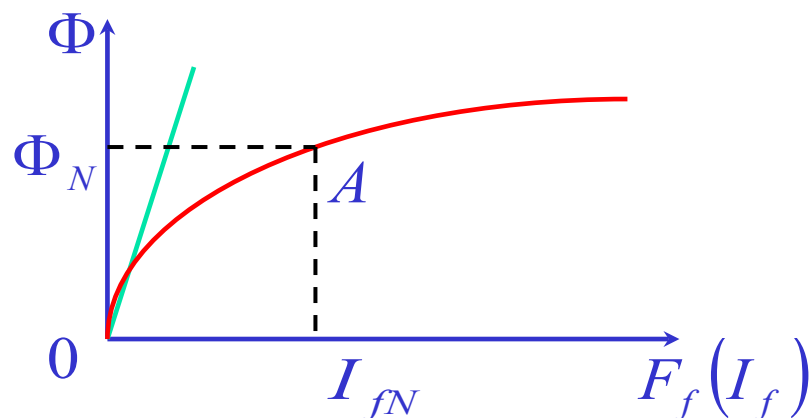
$$B = \Phi/S \Rightarrow H = B/\mu_0 \Rightarrow I_f = Hl/N$$

3、空载磁化特性曲线：

曲线说明：

1) 气隙中 $F_f(I_f) \propto \Phi$

其他 $F_f(I_f) \dots \Phi$ 非线性

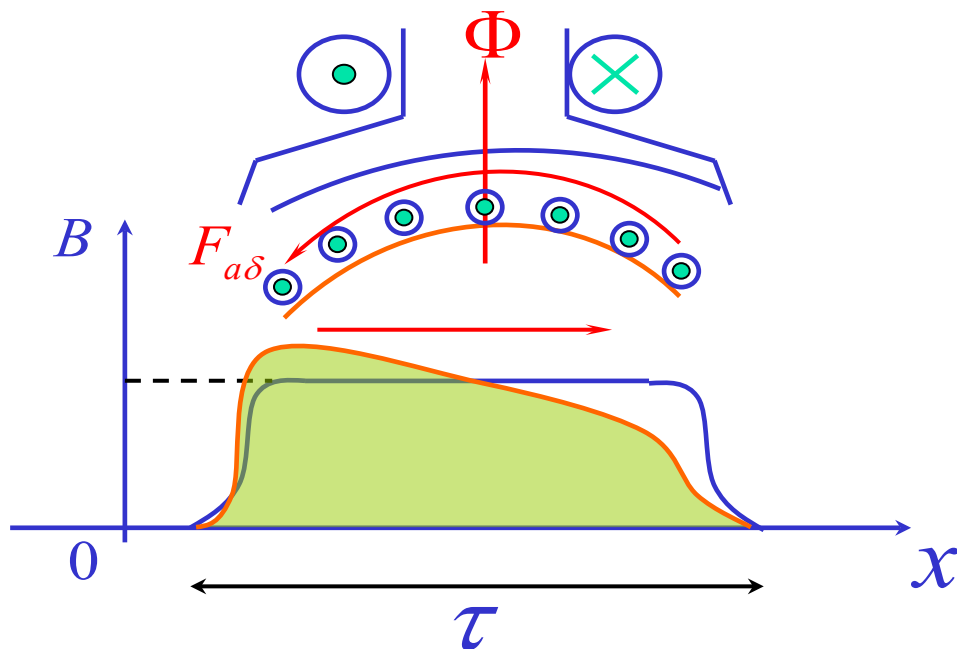


2) Φ 较小时，总磁位降主要在气隙上。
 Φ 较大时，铁磁材料饱和。

3) 额定运行点一般选在 A 点。

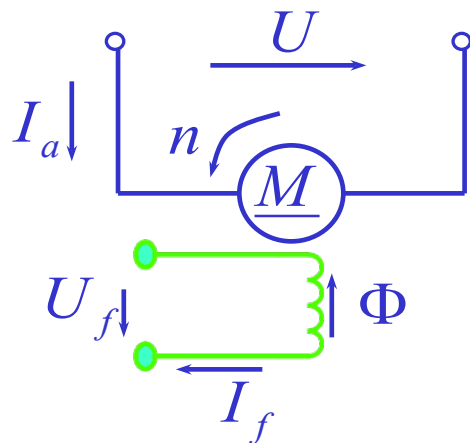
四、负载运行时的电枢反应

- 1、电枢磁通势 F_a ：电枢电流产生的磁通势
- 2、电枢反应：由于 F_a 的存在，将影响空载时 F_f 产生的磁场，改变 B_x 的分布及 Φ 的大小，此现象称电枢反应。
- 3、去磁效应： F_f 使电机定、转子铁心处于近饱和状态，加上 F_a 后，一侧加深饱和时 B 增加较少，另一侧减小饱和时 B 减小较多，总体上 B 减小， Φ 减小，此现象称为去磁效应。



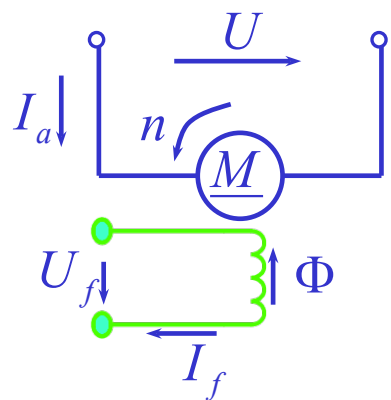
五、直流电机的图形符号及励磁方式

1、图形符号：

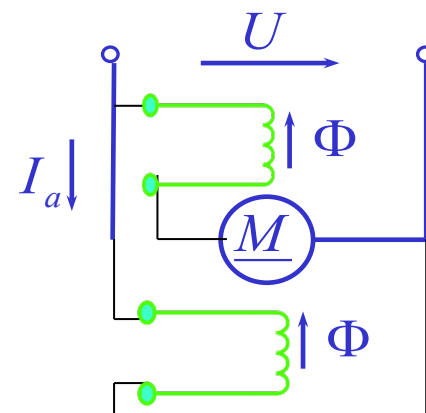
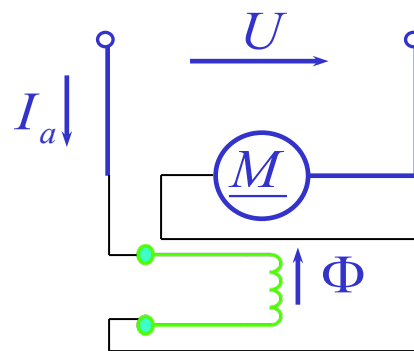
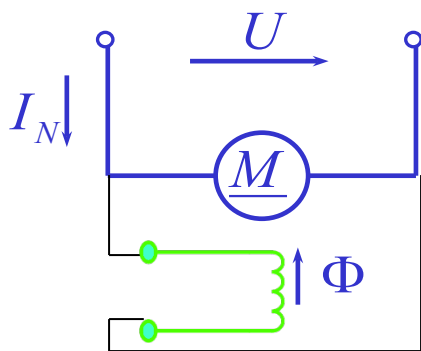


2、励磁方式：励磁绕组与电枢绕组的关系

1)、他励：



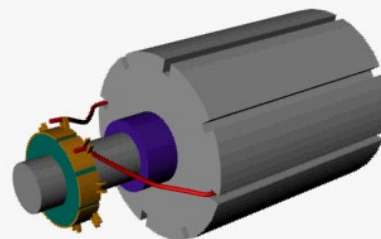
2)、自励：并励、串励、复励



第四节 直流电机的电枢绕组

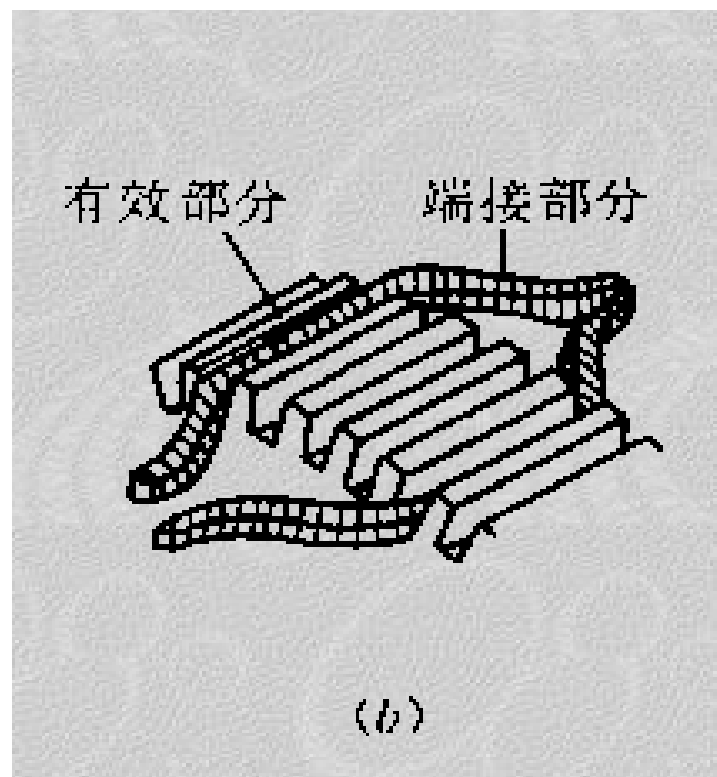
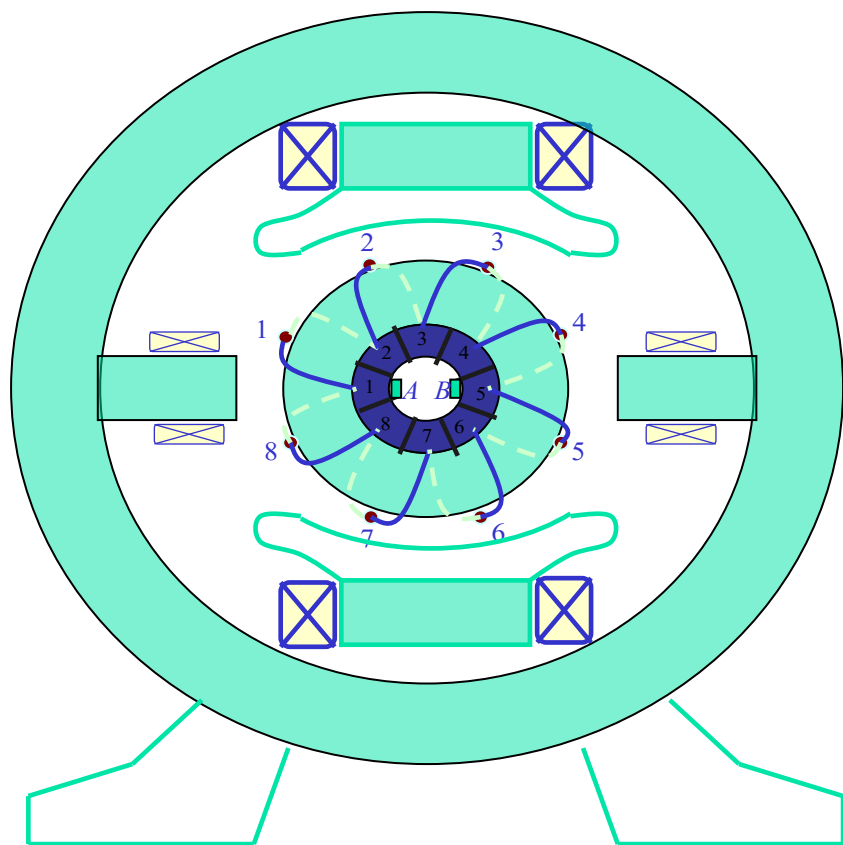


直流电机结构



电枢绕组结构

第四节 直流电机的电枢绕组



第四节 直流电机的电枢绕组

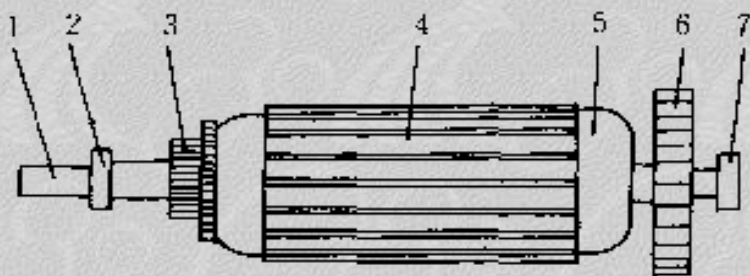
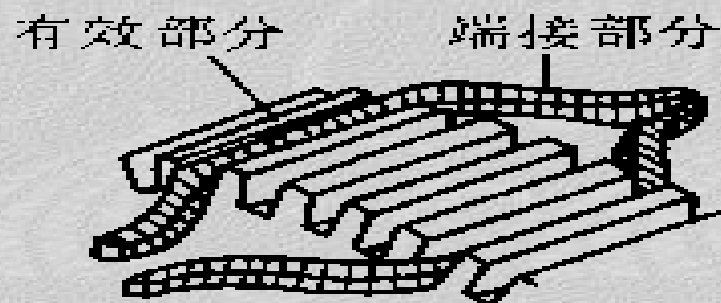


图 3.7 直流电机电枢

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)

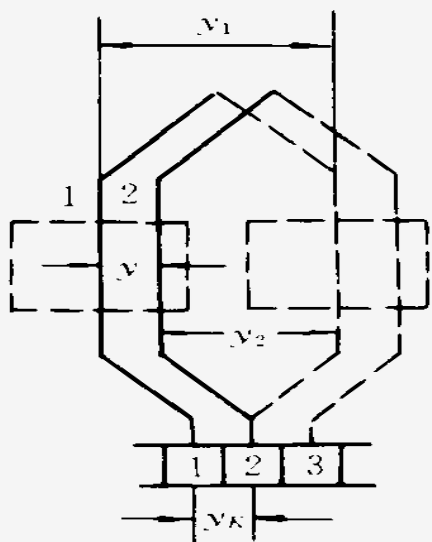


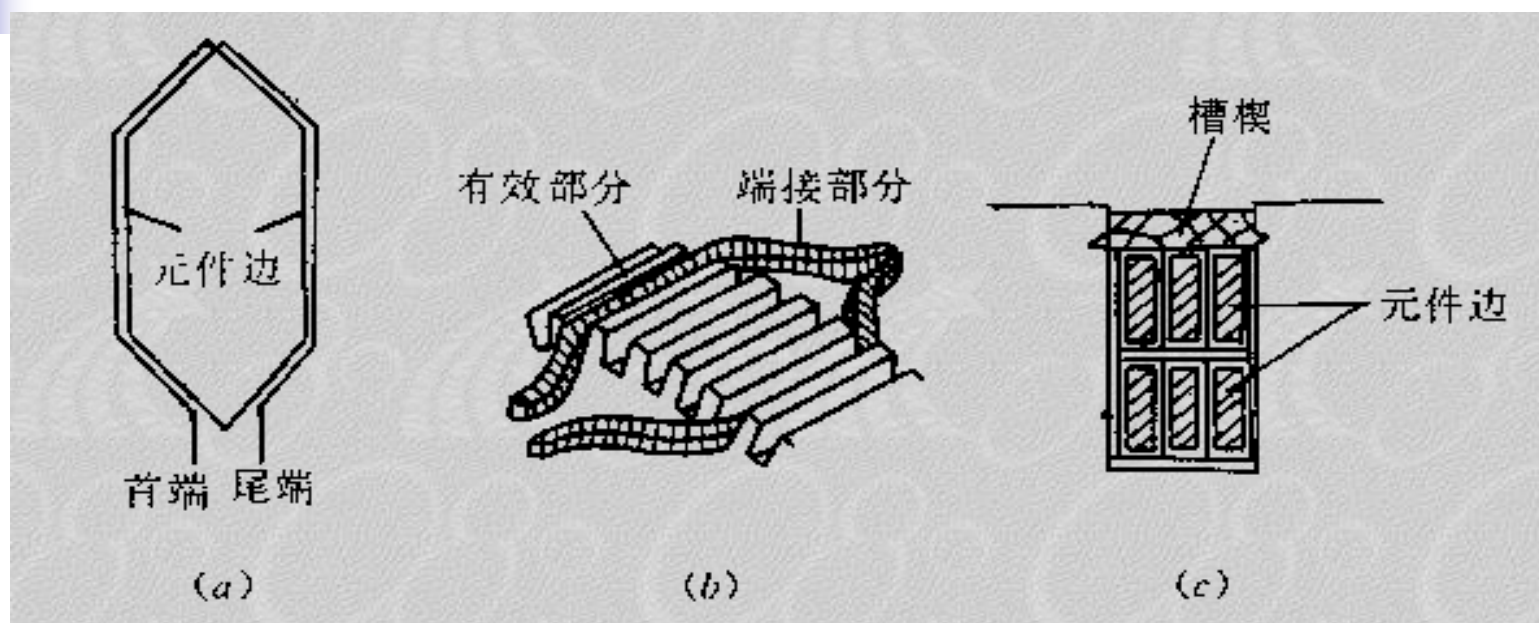
图 3.14 单叠绕组的节距

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

1、节距

指被联接起来的两个元件边或换向片之间的距离，以跨过的元件边数或虚槽数或换向片数来表示。

(1) 第一节距 y_1

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \varepsilon = \text{整数}$$

(2) 合成节距 y 和换向器节距 y_k

单叠绕组 $y = y_k = 1$

(3) 第二节距 y_2

单叠绕组 $y_2 = y_1 - y$

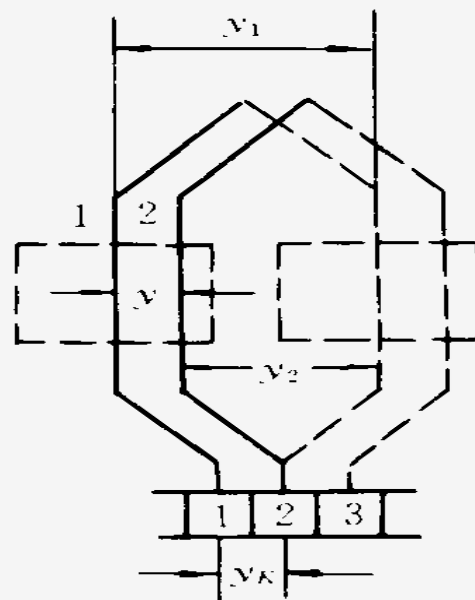


图 3.14 单叠绕组的节距

单叠绕组

2、单叠绕组展开图

已知： $2p=4$ $Z_e=S=K=16$ 计算各节距。

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \varepsilon = \frac{16}{4} = 4$$

$$y=y_k=1$$

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

单叠绕组

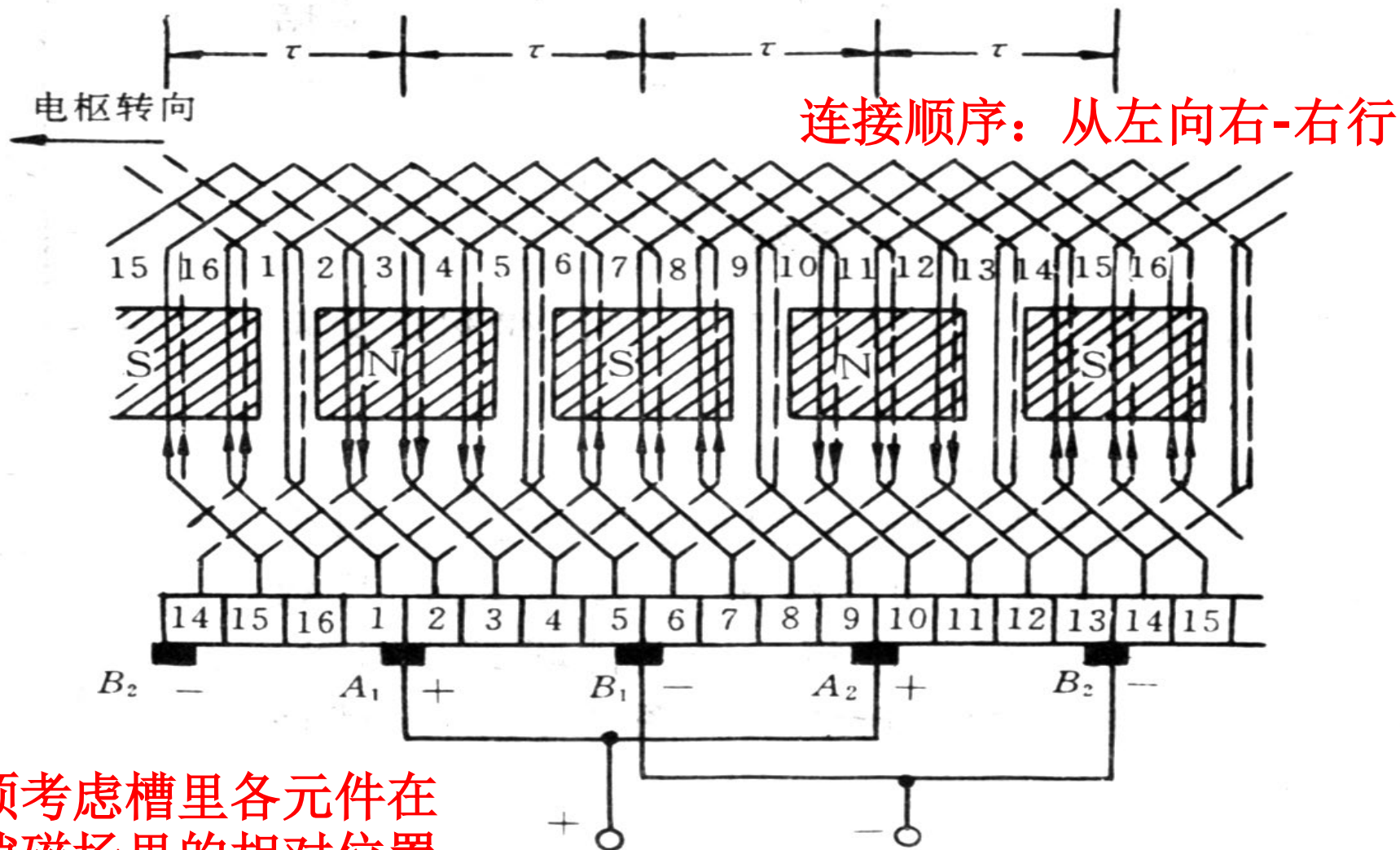


图 3.15 单叠绕组展开图

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

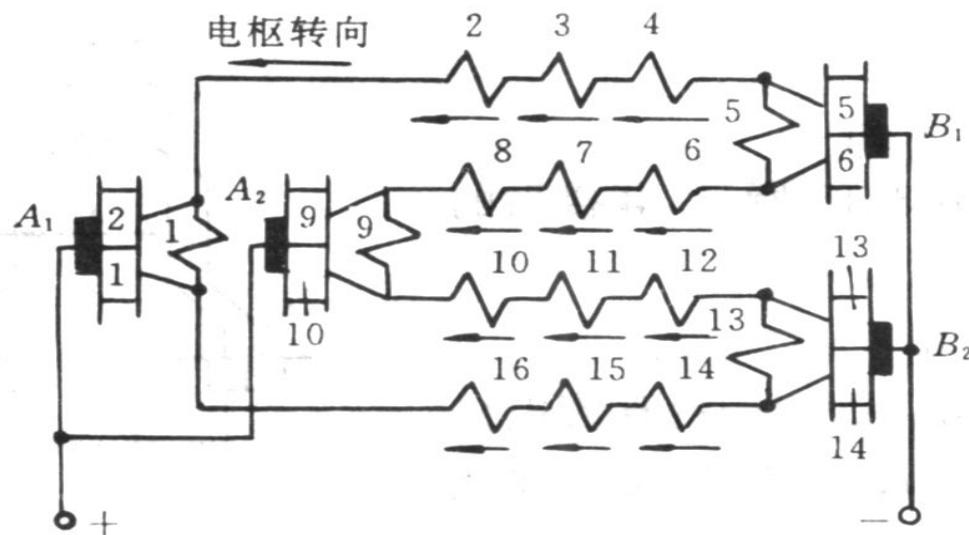


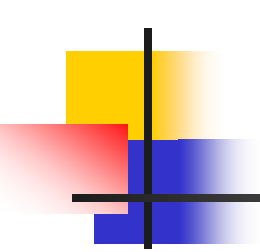
图 3.17 单叠绕组的并联支路图



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

- 
- **电枢绕组：**安放在转子表面，转子旋转时将产生感应电动势，并流过电流。

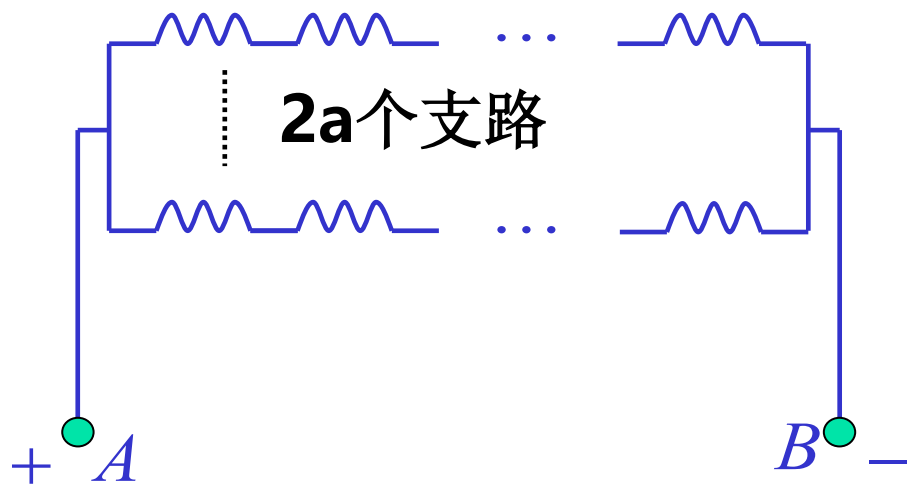
- 无论是发电机还是电动机

电磁功率=电枢电势×电枢电流

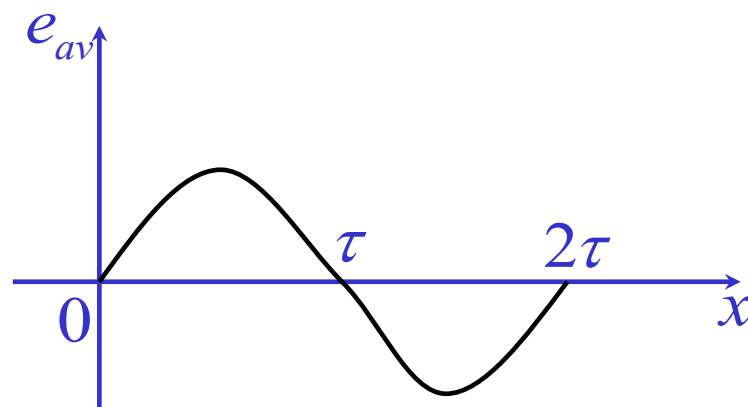
第五节 电枢电势、电磁转矩、电磁功率

各量的符号：电枢导体总数 z 、极对数 p 、极距 τ 、
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_{av}
在 2τ 中呈周期性变化



一、电枢电势

电枢电势 E_a :

1、一个 τ 范围内的平均磁密

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

Φ —— 每极磁通

l —— 轴向的导体有效长度

τ —— 极距

2、一个 τ 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

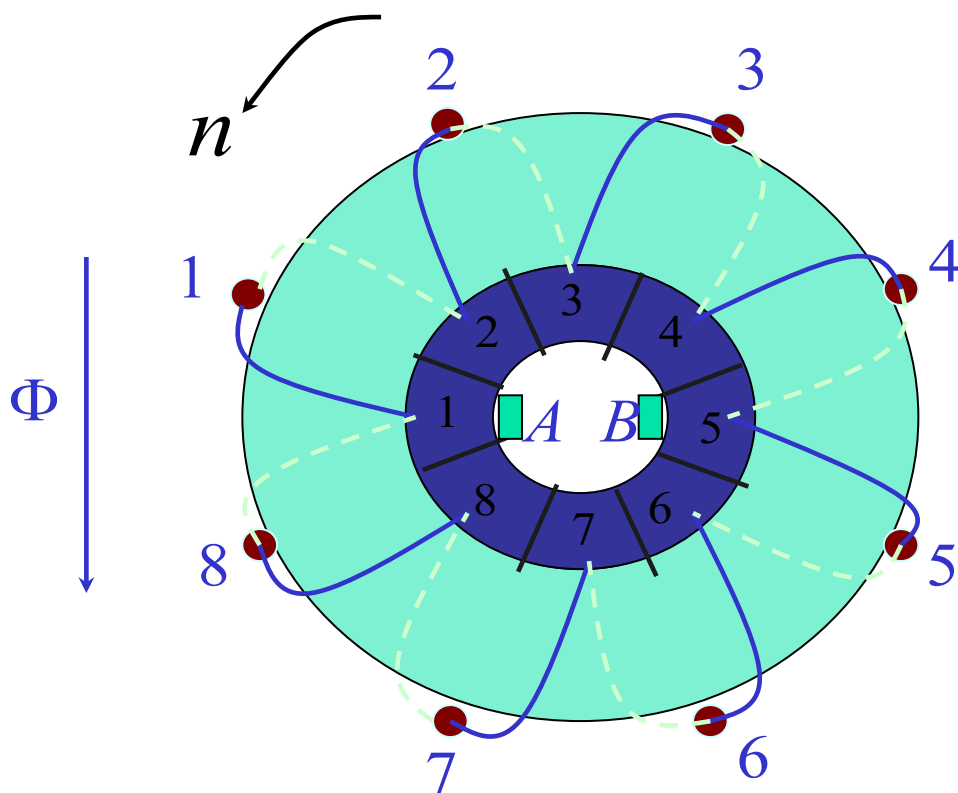
$$E_a = C_e \Phi n$$

一、电枢电势

说明：

发电机运行时：电枢电流与电枢电势同方向，

电磁力与转速反方向，即**吸收机械能，输出电能**



电动机运行时：电枢电势，也称反电动势，**吸收电能，输出机械能**

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。