

自动控制实践

第三讲 直流电机的原理 和基本结构

哈尔滨工业大学

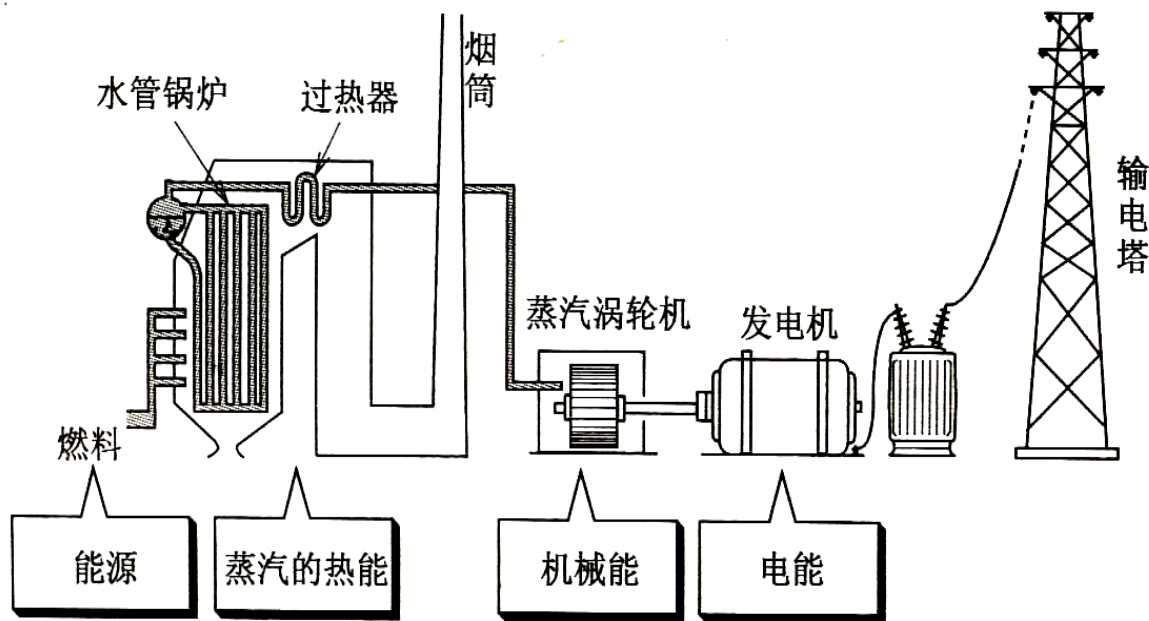
伊国兴



电机概述

- ❖ 电能是现代社会的能源，并对人类文明的发展起到了重要的推动作用。
- ❖ 电机是和电能的生产、输送与利用密切相关的能量转换机械。
- ❖ 电机不仅是国民经济各行业中的重要或关键设备，而且在人们日常生活中的应用也越来越广泛。
- ❖ 发电机、变压器、电动机

电机概述



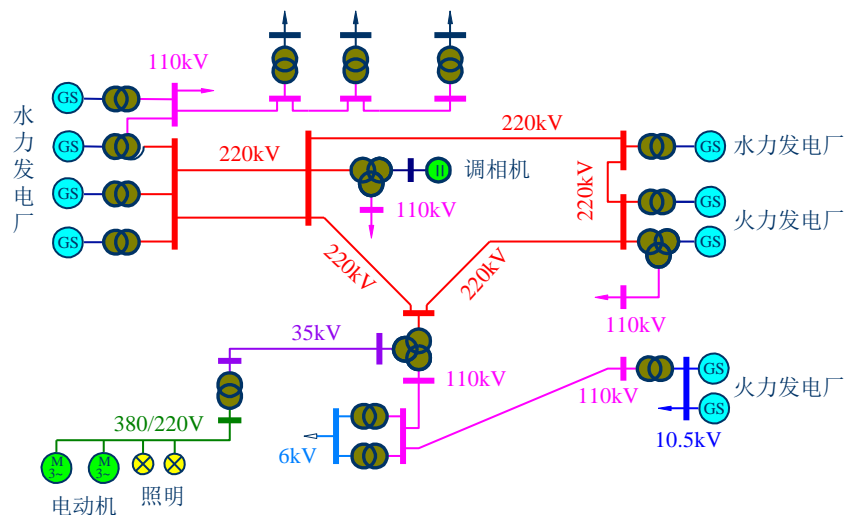
- ❖ 火电厂：将燃料燃烧的热能转换为电能。
- ❖ 水电厂：将水流的势能转换为电能。
- ❖ 核电厂：将原子核裂变的原子能转换为电能。
- ❖ 风电场：将风能转换为电能。

电机概述



- ❖ 三峡水电站装机总容量为1820万kW，年均发电量847亿kW·h
- ❖ 三峡水电站若电价暂按0.18~0.21/ (kW·h)计算，每年售电收入可达181亿~219亿元

电机概述



图例 GS 发电机 双绕组变压器 三绕组变压器 自耦变压器

- ❖ 主要用于各级变电站中。
- ❖ 改变交流电能的电压，实现交流电能的经济输送和合理分配。



接触调压器



三相干式变压器



电机概述

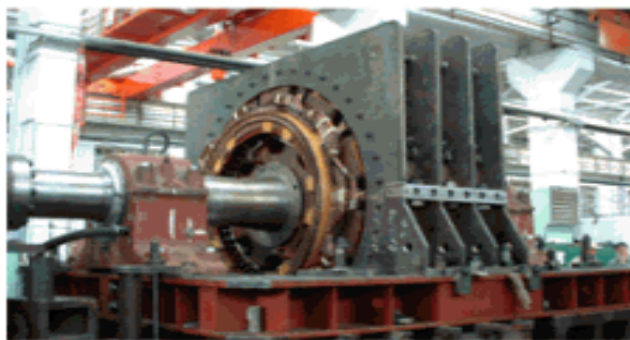
❖ 作为原动机，拖动各种机械设备。据统计，我国电动机的耗电量约占发电量的60%。



大型同步轧钢电机



隐极同步电机

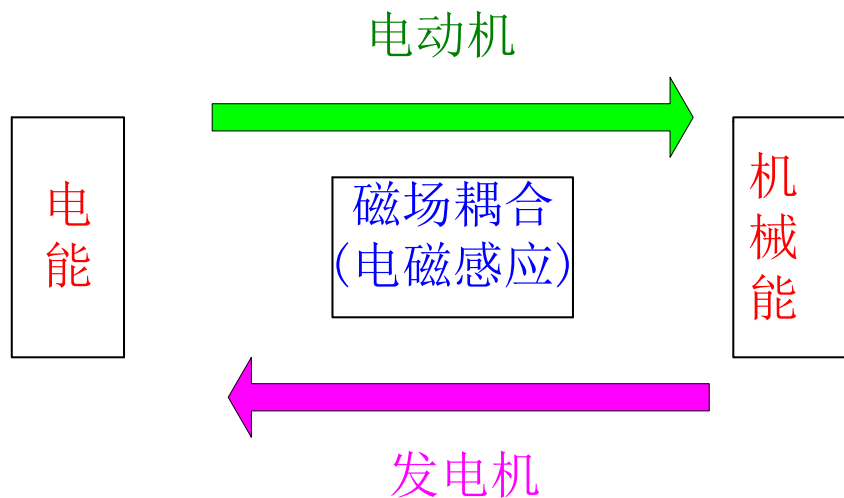


直流电动机



异步电动机

电机概述



电机的基本功能：

- ❖ 电机是一种机电能量转换或信号转换的电磁机械装置。
- ❖ 电机是符合电磁感应定律运行的机械装置。
- ❖ 电机按照控制作用来改变输出。
- ❖ 把机械能转换成直流电能的电机是直流发电机；反之，则为直流电动机。

直流电机



❖ 直流电机是电机的主要类型之一。特点：

- 调速范围宽，易于平滑调节
- 过载、起动、制动转矩大
- 易于控制，可靠性高
- 调速时能量损失较小

❖ 直流电动机

- 调速要求高的场所：轧钢机、舰船推进、造纸、挖掘机等。

❖ 直流发电机

- 给直流电动机、电解、电镀、冶炼、充电、交流发电机励磁等的直流电源。

❖ 直流电机是电机控制的基本模型。

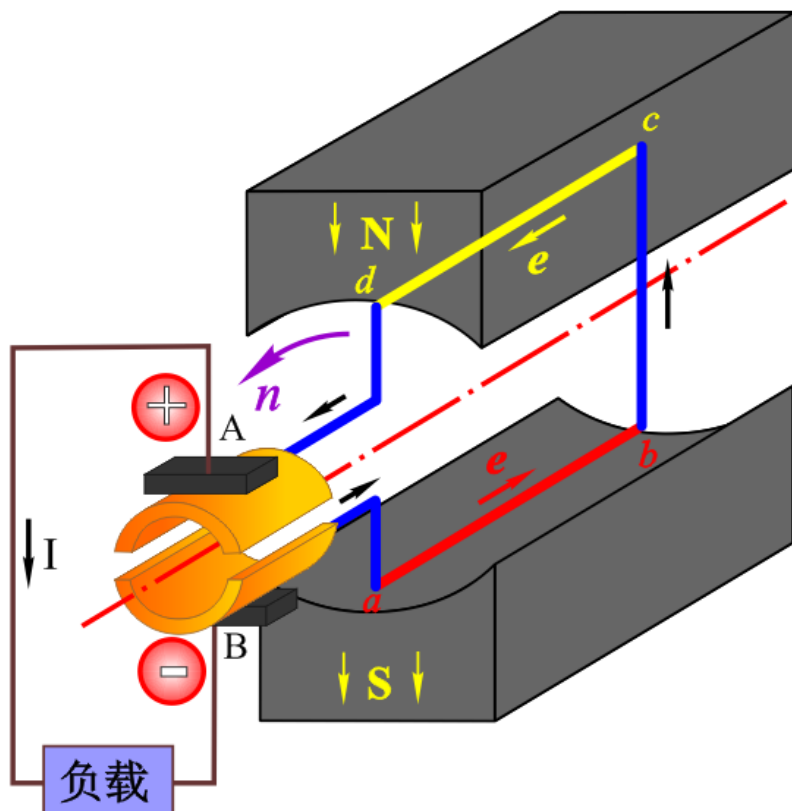
直流电机

❖ 缺点

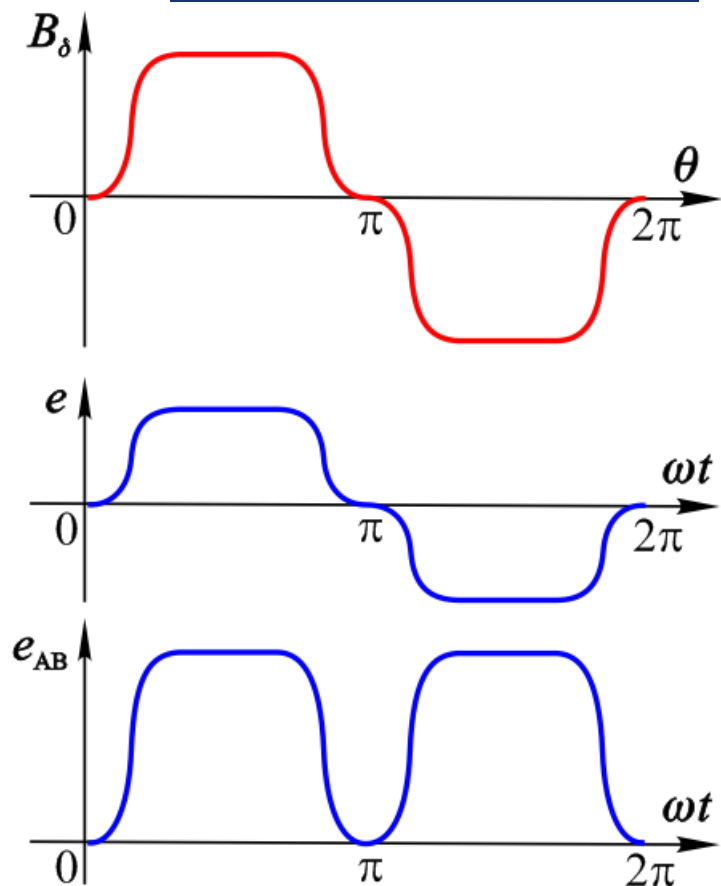
- 换向困难，使容量受到限制。
- 有换向器，费工费料、造价昂贵，需要经常维护，寿命较短。
- 可靠性差。
- 对环境要求高。

直流电机的工作原理

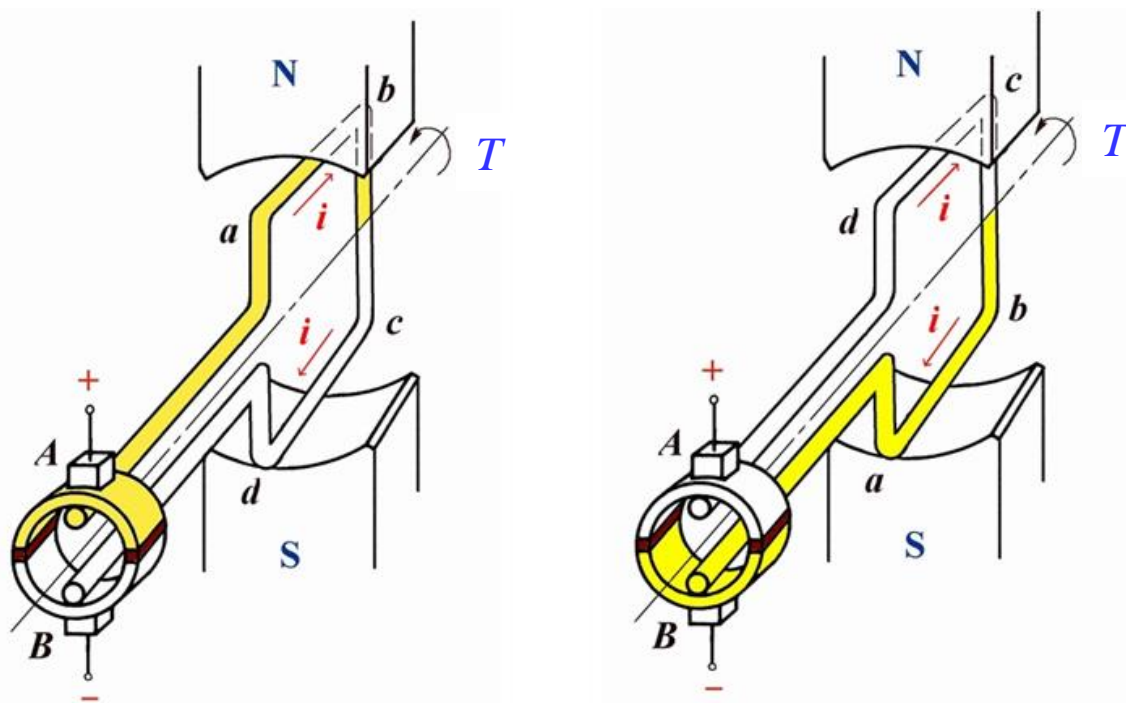
单线圈直流电机模型



$$e = B_{\delta} l v \propto B_{\delta}$$



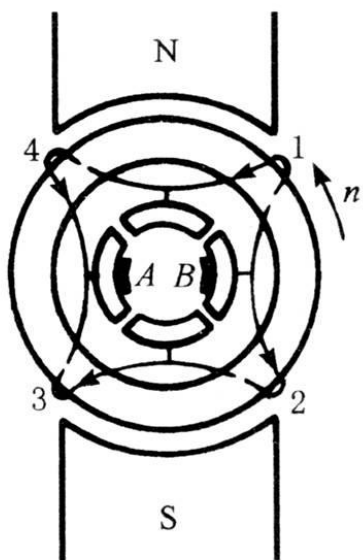
直流电机的工作原理



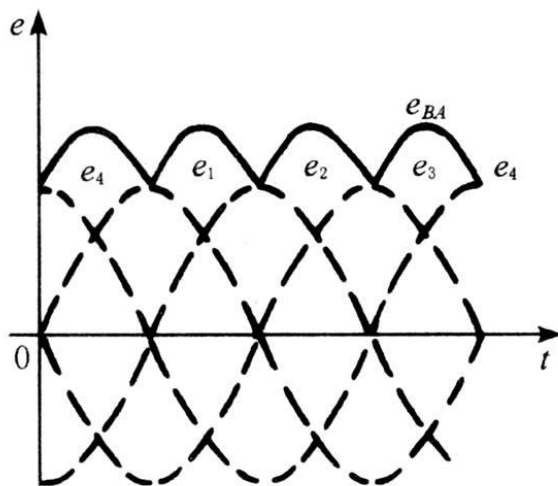
❖ 换向器将电刷外部的直流电流变换为线圈内部的交流电流，产生单方向的电磁转矩。

直流电机的基本工作原理

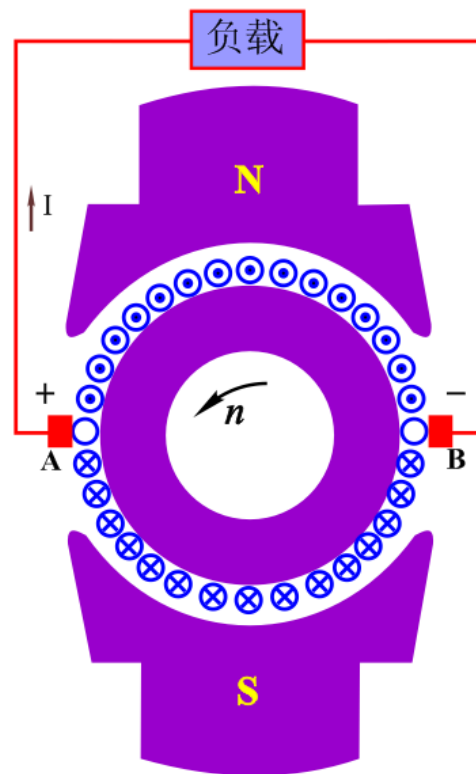
- ❖ 为了减小直流电动势和电磁转矩中的脉动，需要增加线圈数目。增加导体减小感应电动势脉动。当每极下导体数大于8时，脉动可小于1%。



(a)



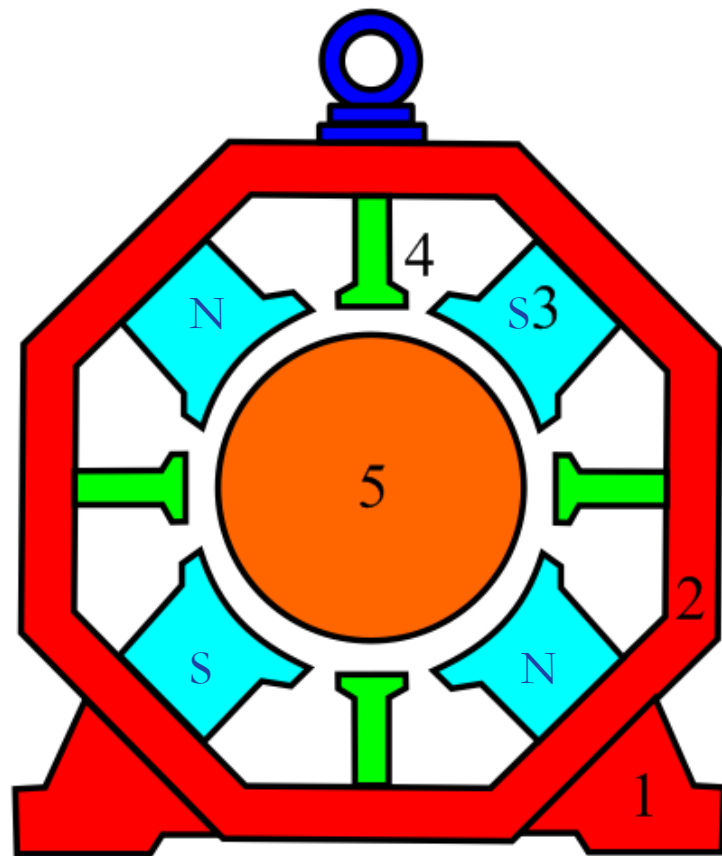
(b)



直流电机的结构

- ◆ N极和S极只能成对出现且沿圆周均匀交替分布；
- ◆ 极对数：N极或S极的个数，通常用 p 表示；
- ◆ 极数：主磁极的个数，等于 $2p$ 。

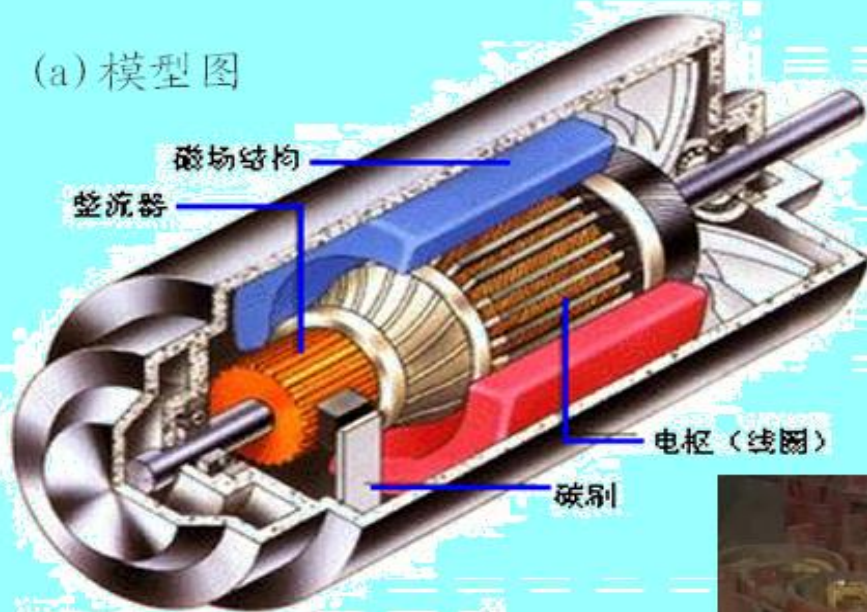
$p=2$
即4极电机



1-机座 2-磁轭 3-主极
4-换向极 5-电枢

直流电机的结构

(a) 模型图

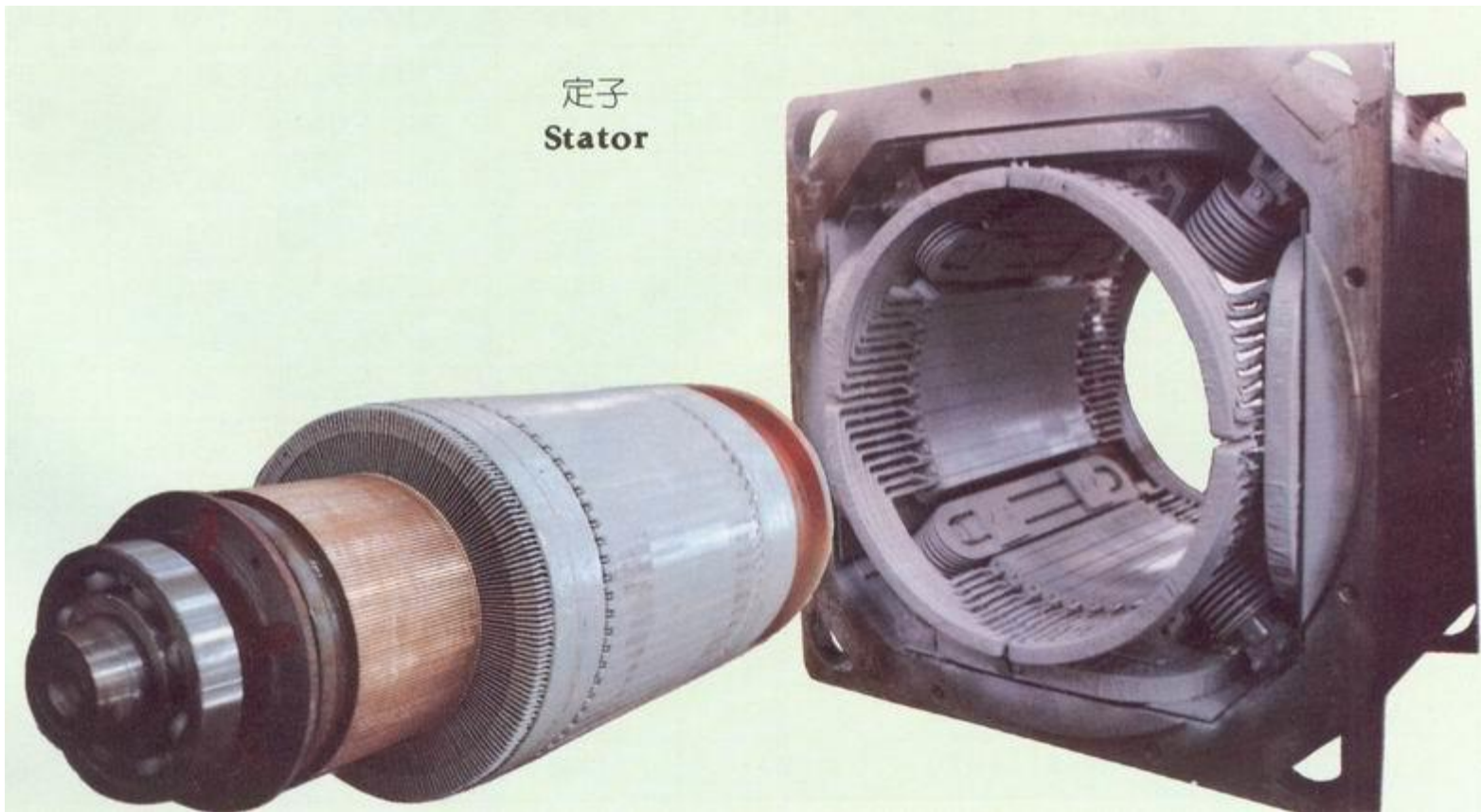


(b) 实体图



直流电机的基本结构图

直流电机的结构



直流电机的结构

1. 转子（又称电枢）

由铁芯、绕组（线圈）、换向器组成。

2. 定子

定子的分类：

- 永磁式：由永久磁铁做成。
- 励磁式：磁极上绕线圈，然后在线圈中通过直流电，形成电磁铁。

励磁的定义：磁极上的线圈通以直流电产生磁通，称为励磁。

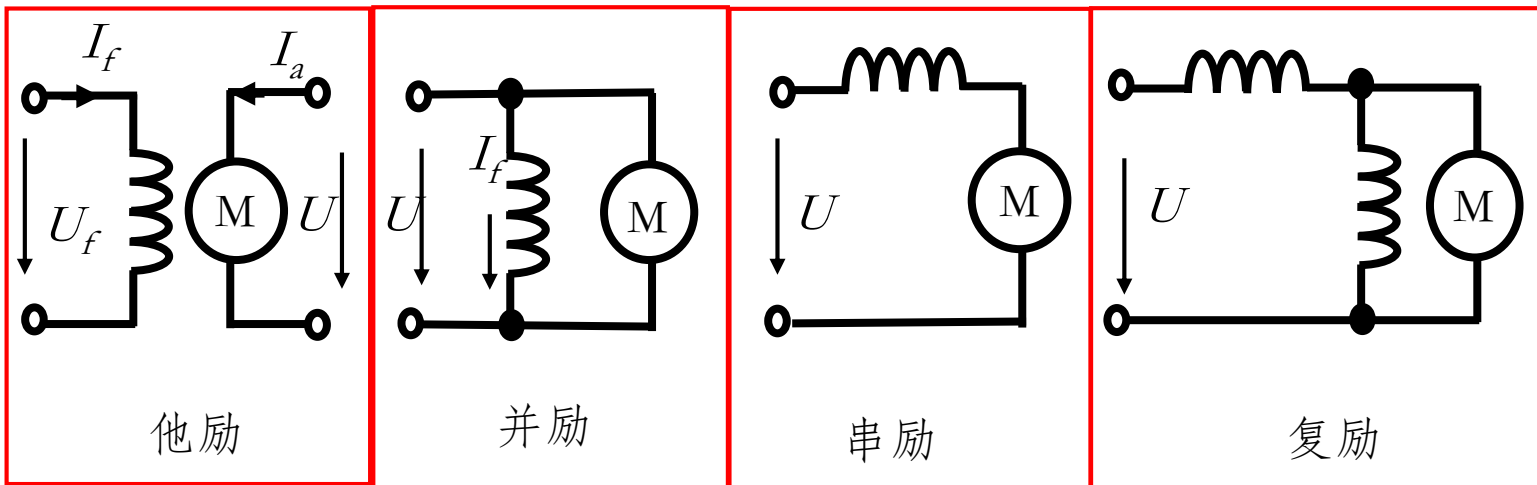
直流电机的结构

他励电动机：励磁线圈与转子电枢的电源分开。

并励电动机：励磁线圈与转子电枢并联到同一电源上。

串励电动机：励磁线圈与转子电枢串联接到同一电源上。

复励电动机：励磁线圈与转子电枢的连接有串有并，接在同一电源上。



直流电机的结构

- ① 主磁极
- ② 励磁绕组

主磁极钢板冲片
(1-1.5mm厚)

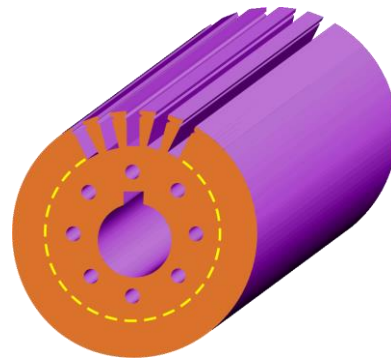
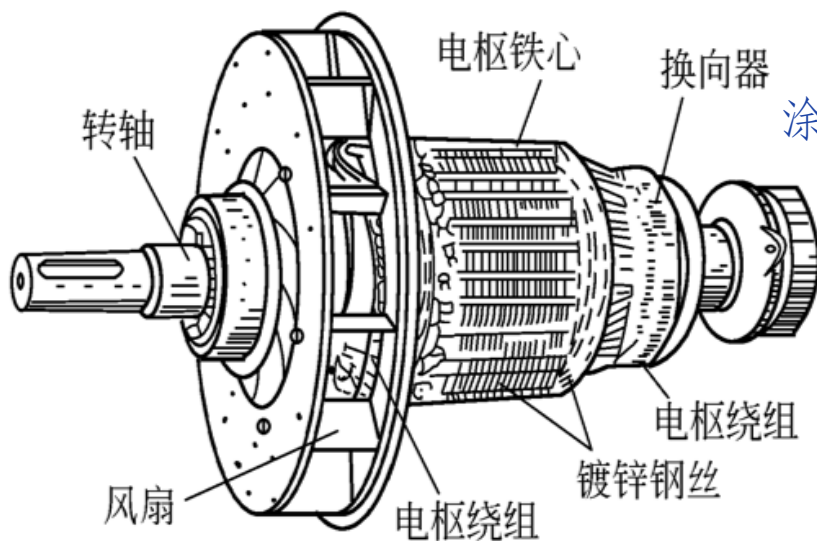
励磁绕组套在
主磁极极身上

主磁极由钢板
冲片叠压而成

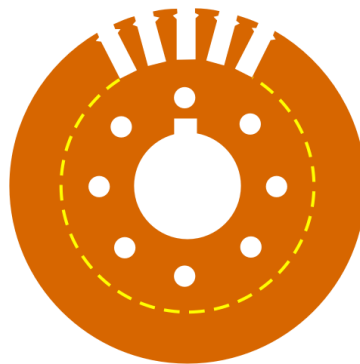
直流电机的结构

③ 电枢铁心

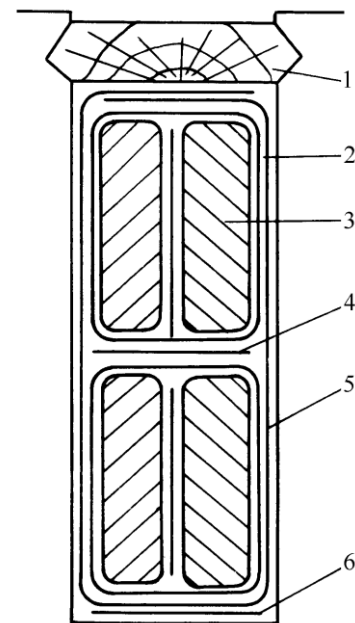
④ 电枢绕组



涂绝缘漆冲片叠压而成



电枢铁心冲片(0.2-0.5mm厚)
(硅钢片)

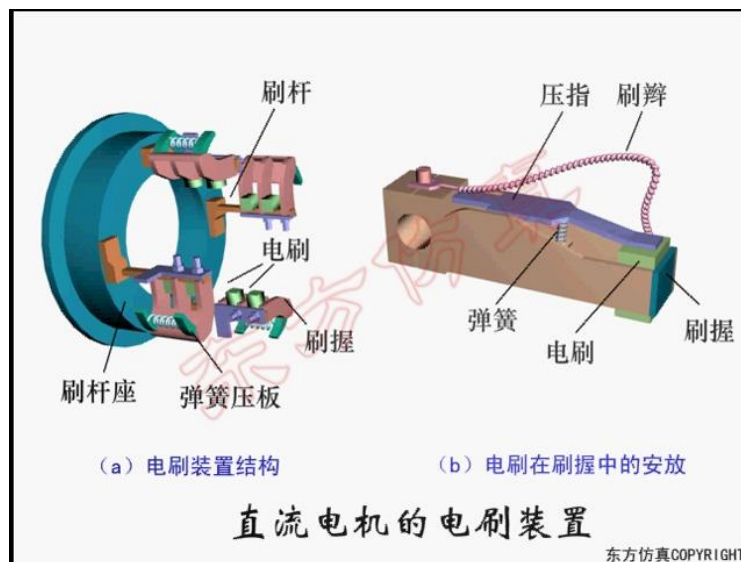
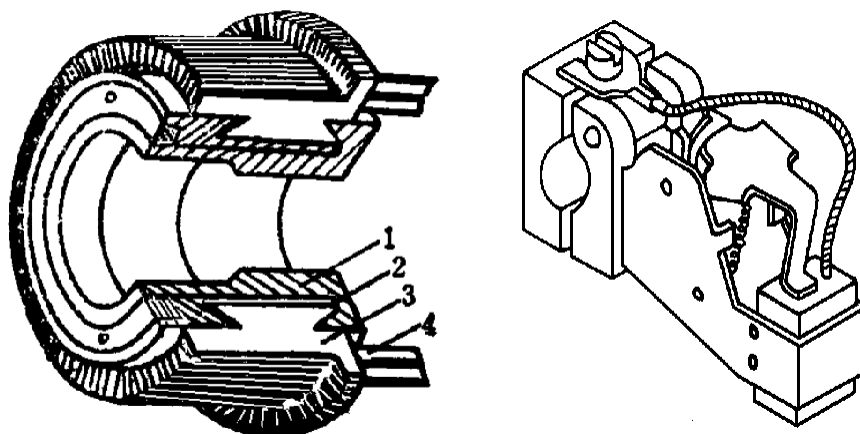


1—槽楔、2—线圈绝缘、
3—导体、4—层间绝缘、
5—槽绝缘、6—槽底绝缘

直流电机的结构

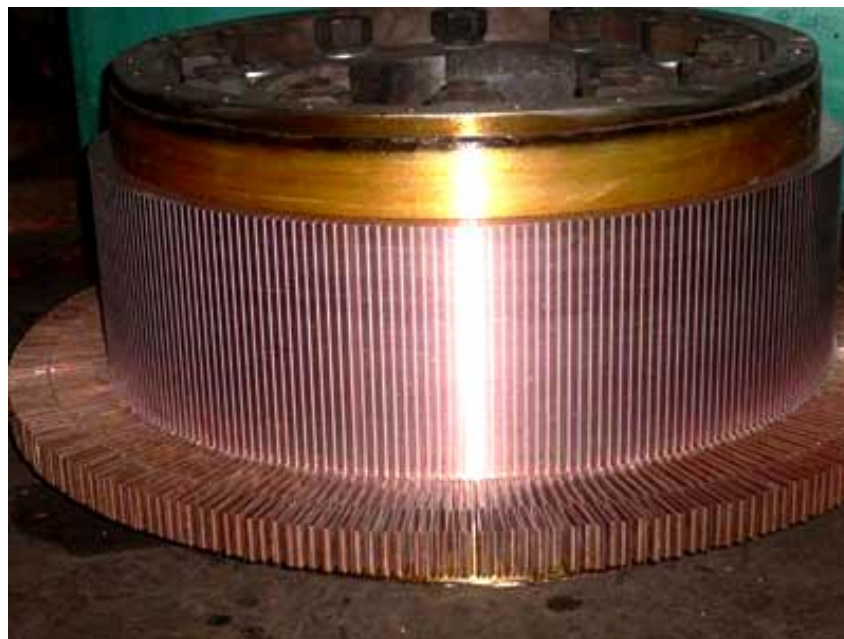
⑤ 换向器

⑥ 电刷

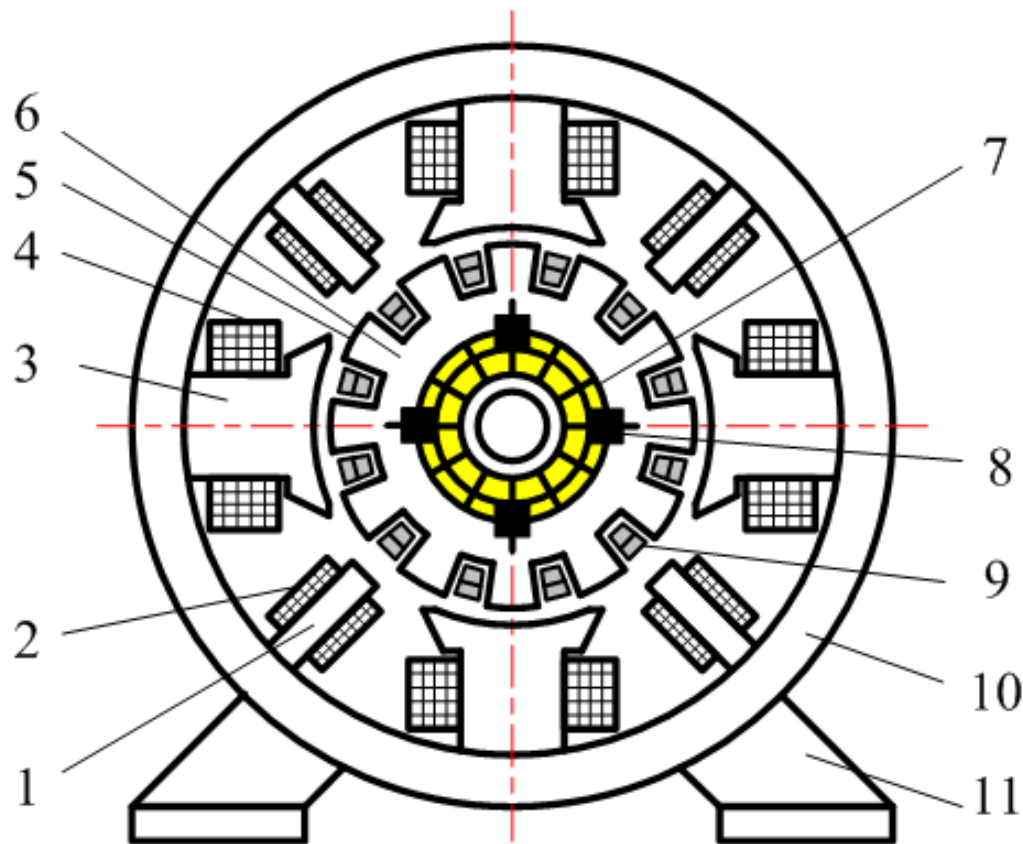


直流电机的结构

换向器



直流电机的结构



- ❖ 1—换向极铁心
- ❖ 2—换向极绕组
- ❖ 3—主极铁心
- ❖ 4—励磁绕组
- ❖ 5—电枢齿
- ❖ 6—电枢铁心
- ❖ 7—换向器
- ❖ 8—电刷
- ❖ 9—电枢绕组
- ❖ 10—机座
- ❖ 11—底脚

直流电机的结构

直流电机的具体结构

定子

主磁极：产生恒定的气隙磁通，由铁心和励磁绕组构成

换向磁极：改善换向

电刷装置：与换向片配合,完成直流与交流的互换

机座和端盖：起支撑和固定作用

转子

电枢铁心：主磁路的一部分，放置电枢绕组。

电枢绕组：由带绝缘的导线绕制而成，是电路部分。

换向器：与电刷装置配合,完成直流与交流的互换

转轴

轴承

直流电机的额定值

❖ 额定功率， P_N (kW)

由温升和换向等条件限制，按规定运行方式电机能输出的功率。

- 发电机：输出的电功率。
- 电动机：转轴上输出的机械功率。

❖ 额定电压， U_N (V)

额定运行时，电机出线端的平均电压。
直流电机的额定电压通常不高。

直流电机的额定值

❖ 额定电流， I_N (A)

电机在额定电压下运行，输出功率为额定功率时，通过电机出线端的线路电流。

- 发电机： $I_N = P_N / U_N$
- 电动机： $I_N = P_N / U_N \eta_N$

❖ 额定转速， n_N (r/min)

额定功率、额定电压、额定电流时的转速。

❖ 额定励磁电流， I_{fN} (A)

电机在额定工况下，其励磁绕组中的直流电流。

直流电机的额定值

❖ 电动机额定转矩， T_N (A)

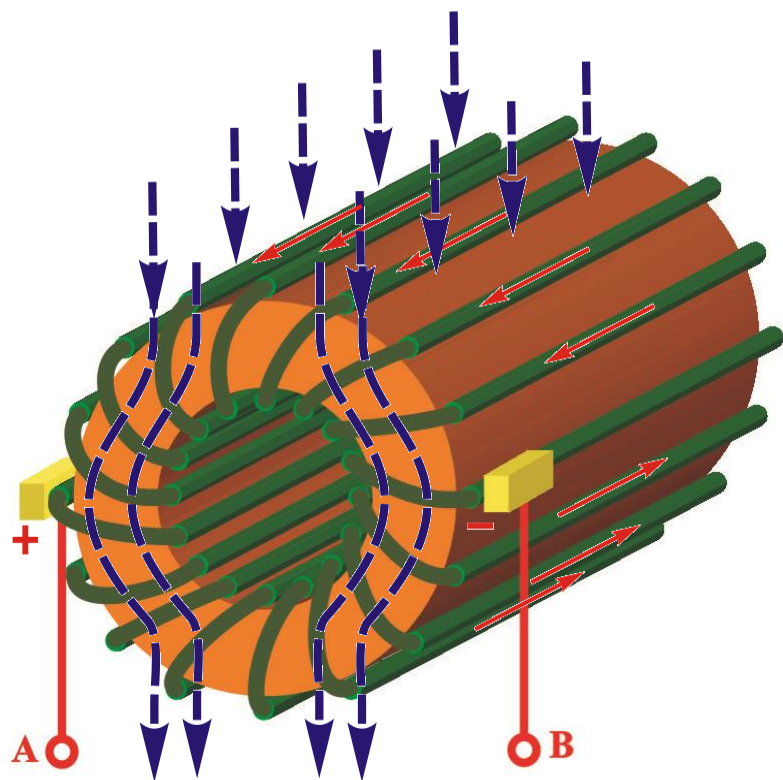
电机在工况时的输出转矩。

$$\begin{aligned} T_N &= P_N / \omega_N \\ &= \frac{P_N}{\left(\frac{2\pi n_N}{60} \right)} \end{aligned}$$

西门子子公司的一台电机的铭牌

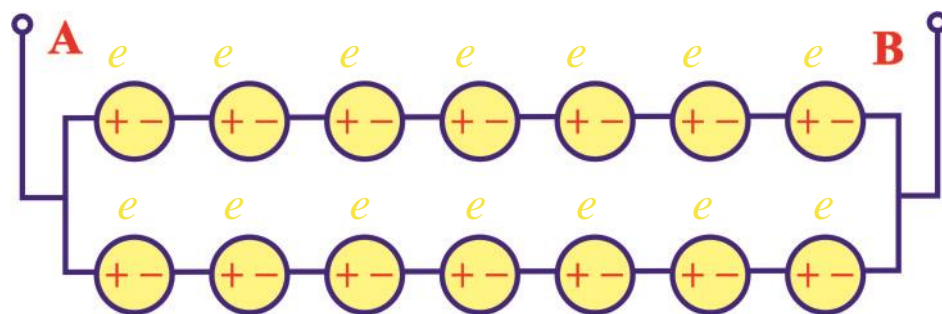
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|--|-------------|---------|--|--|--|--|----|----|-----|------|-------|-----|----------|------|-------|-------|--|--|----------|---------|--------------|-----|--|--|-------------|---|------|------|-------------|-------|-----------|---------|--|--|--|--|------|---|------|----|-------|--|-----|--|-----|--|--|--|--------------|--|--|--|--|--|
| 额定功率7457W | 额定转速 1180r/min | 额定电压500V | 工作制：连续 | 最高环境温度：40度 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 额定电流17A | 励磁方式：并励 | 励磁电流： 1.4/2.8A | 励磁电阻166欧姆 | 绝缘等级F | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table><tr><td colspan="5">SIEMENS</td></tr><tr><td>HP</td><td>10</td><td>RPM</td><td>1180</td><td>VOLTS</td><td>500</td></tr><tr><td>ARM AMPS</td><td>17.0</td><td>WOUND</td><td>SHUNT</td><td></td><td></td></tr><tr><td>FLD AMPS</td><td>1.4/2.8</td><td>FLD OHMS 25C</td><td>166</td><td></td><td></td></tr><tr><td>INSUL CLASS</td><td>F</td><td>DUTY</td><td>CONT</td><td>MAX AMBIENT</td><td>40° C</td></tr><tr><td>FLD VOLTS</td><td>300/150</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>TYPE</td><td>E</td><td>ENCL</td><td>DP</td><td>INSTR</td><td></td></tr><tr><td>MOD</td><td></td><td>SER</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td colspan="3">HPSWARMINGUP</td><td colspan="3">DIRECT CURRENT MOTOR MADE IN U.S.A.</td></tr></table> | | | | | SIEMENS | | | | | HP | 10 | RPM | 1180 | VOLTS | 500 | ARM AMPS | 17.0 | WOUND | SHUNT | | | FLD AMPS | 1.4/2.8 | FLD OHMS 25C | 166 | | | INSUL CLASS | F | DUTY | CONT | MAX AMBIENT | 40° C | FLD VOLTS | 300/150 | | | | | TYPE | E | ENCL | DP | INSTR | | MOD | | SER | | | | HPSWARMINGUP | | | DIRECT CURRENT MOTOR MADE IN U.S.A. | | |
| SIEMENS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| HP | 10 | RPM | 1180 | VOLTS | 500 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ARM AMPS | 17.0 | WOUND | SHUNT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| FLD AMPS | 1.4/2.8 | FLD OHMS 25C | 166 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| INSUL CLASS | F | DUTY | CONT | MAX AMBIENT | 40° C | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| FLD VOLTS | 300/150 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TYPE | E | ENCL | DP | INSTR | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MOD | | SER | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| HPSWARMINGUP | | | DIRECT CURRENT MOTOR MADE IN U.S.A. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 励磁电压300/150V | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

直流电机绕组

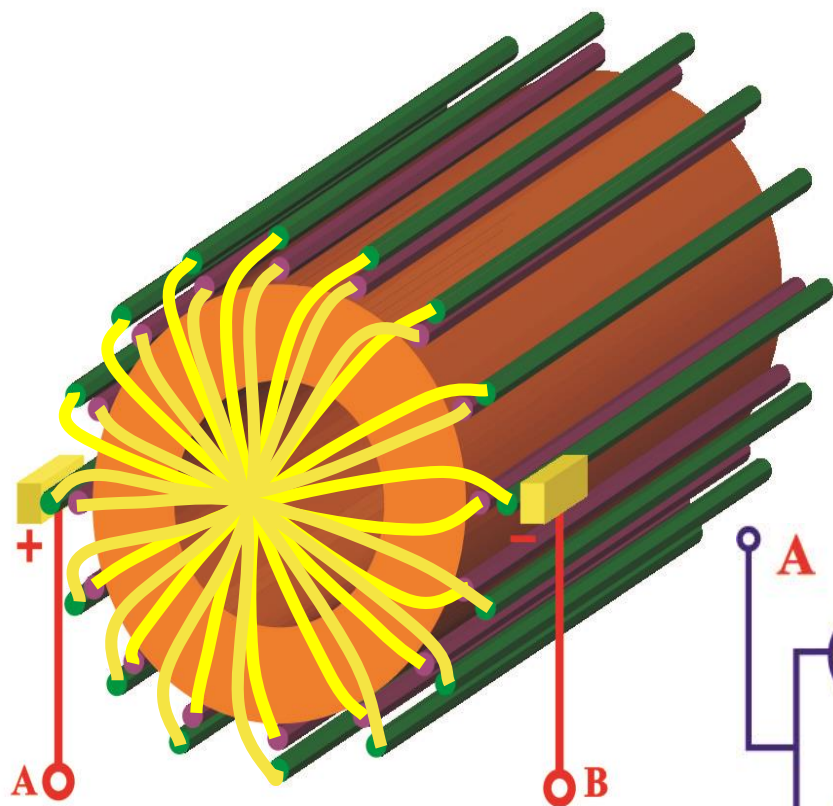


❖ 环形电枢绕组

- 只有一半的导体产生感应电动势，导体利用率低。

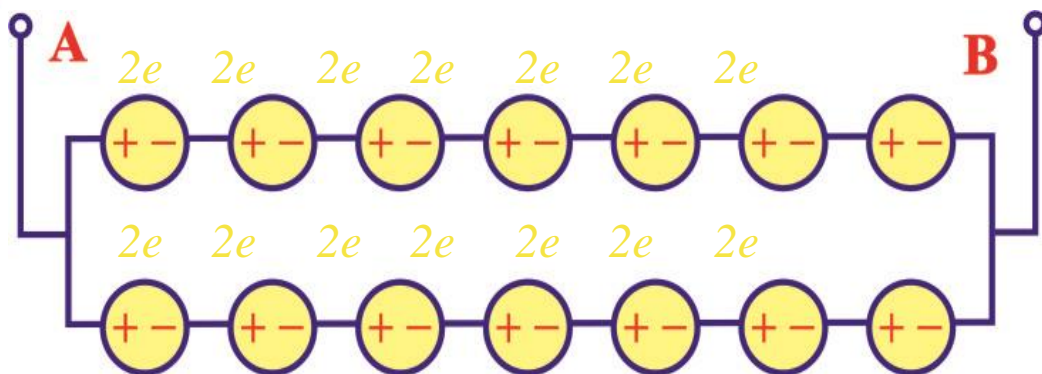


直流电机绕组

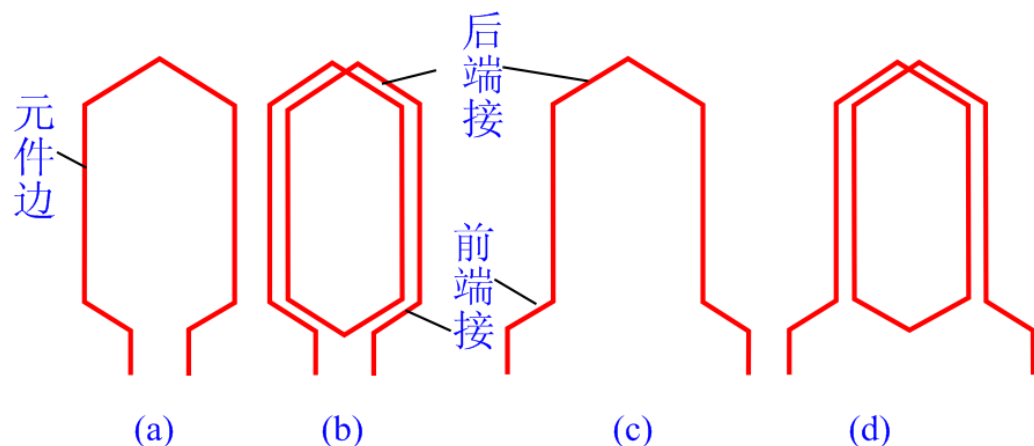


❖ 鼓形电枢绕组

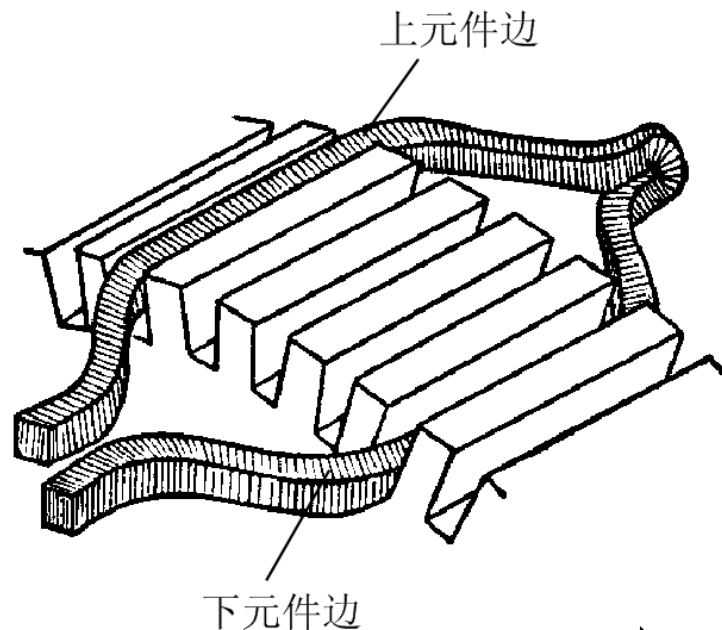
- 所有导体都产生感应电动势，导体利用率高。



直流电机绕组

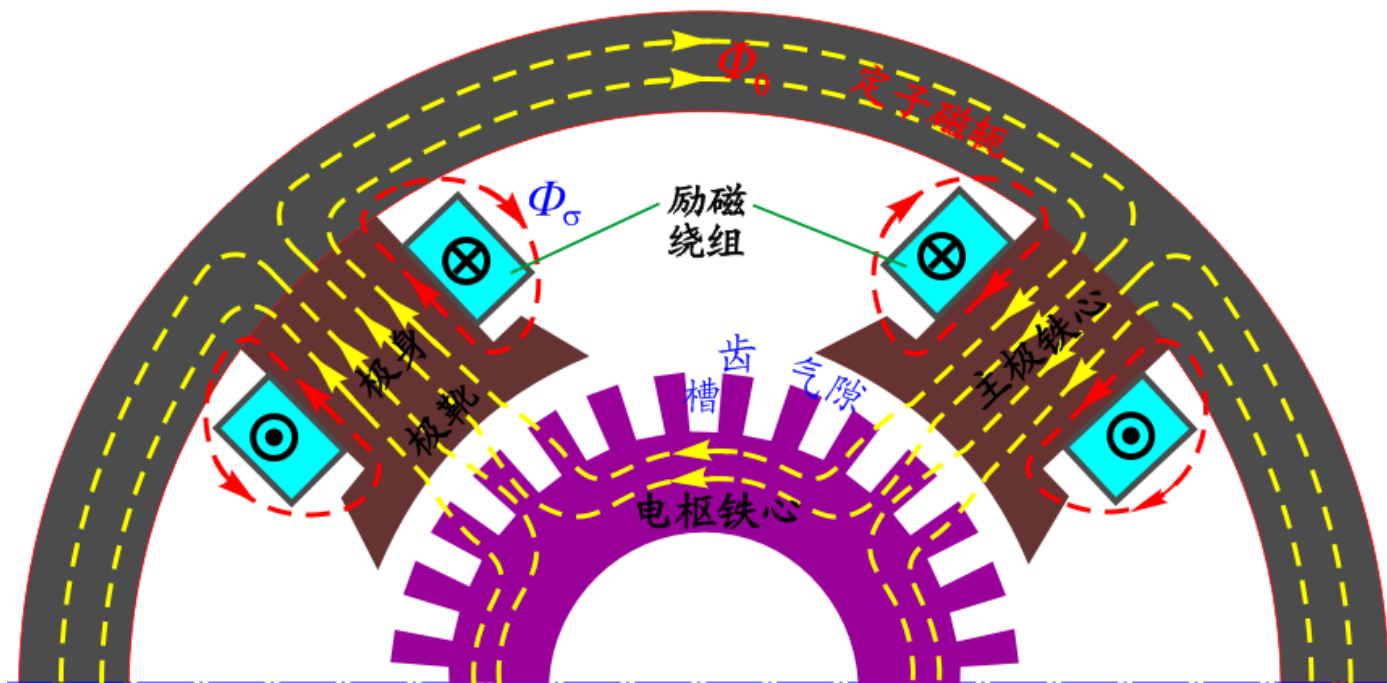


直流电机电枢绕组元件
(a) 单匝叠绕组元件 (b) 两匝叠绕组元件
(c) 单匝波绕组元件 (d) 两匝波绕组元件



- ❖ 构成直流电机电枢绕组的基本单元为元件；
- ❖ 一台电机的元件数一般等于电机的槽数。

直流电机空载时的磁场

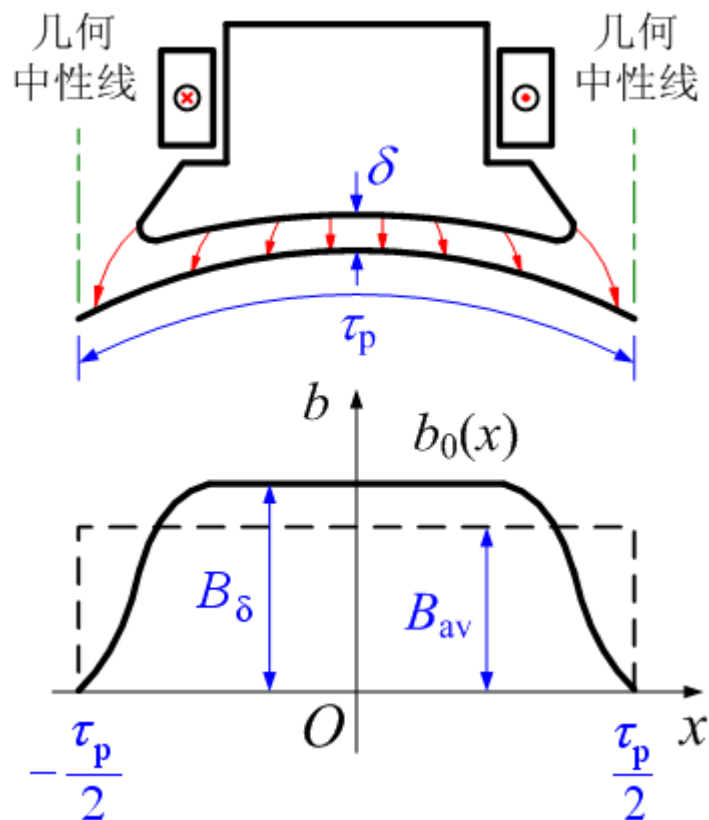
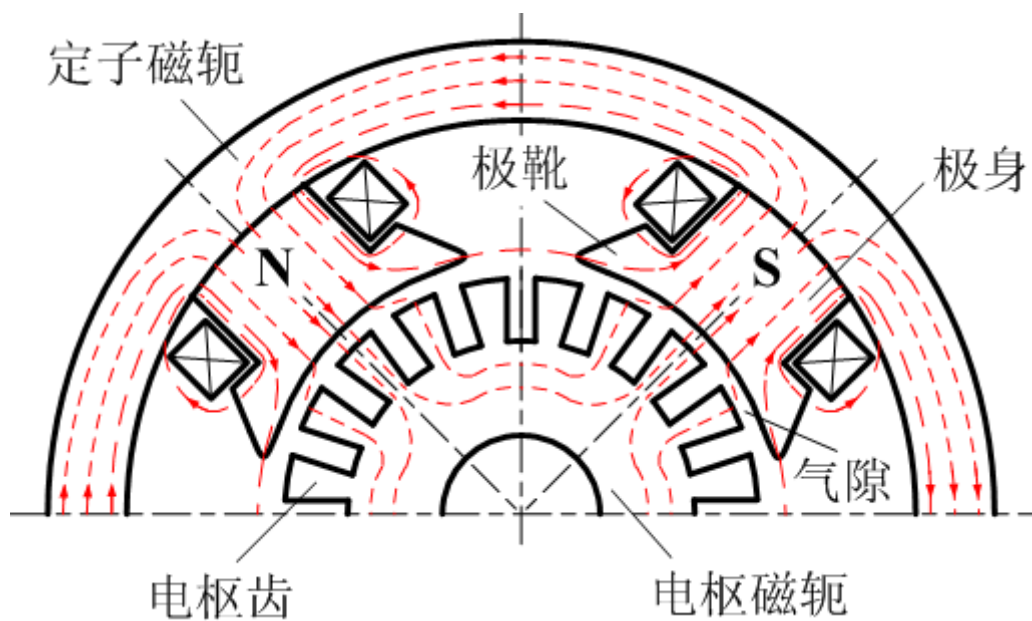


一台四极直流电机中的空载磁场分布(1/2模型)

- ❖ 励磁绕组通直流电产生的磁场；
- ❖ 空载时电机中的磁场分布是对称的；
- ❖ 主磁通；漏磁通。

直流电机空载时的磁场

直流电机空载时 ($I_a=0$) 的气隙磁场仅由励磁电流 I_f 产生的励磁磁动势 F_f 建立。



磁动势 F_f 产生的磁场

直流电机空载时的磁场

漏磁通

磁力线不进入电枢铁心，直接经过气隙、相邻磁极或定子铁轭形成闭合回路

漏磁路

主磁通

磁力线由N极出来，经气隙、电枢齿部、电枢铁心的铁轭、电枢齿部、气隙进入S极，再经定子铁轭回到N极

主磁路

直流电机中，主磁通是主要的，它能在电枢绕组中感应电动势或产生电磁转矩，而漏磁通没有这个作用，它只是增加主磁极磁路的饱和程度。在数量上，漏磁通比主磁通小得多，大约是主磁通的20%。

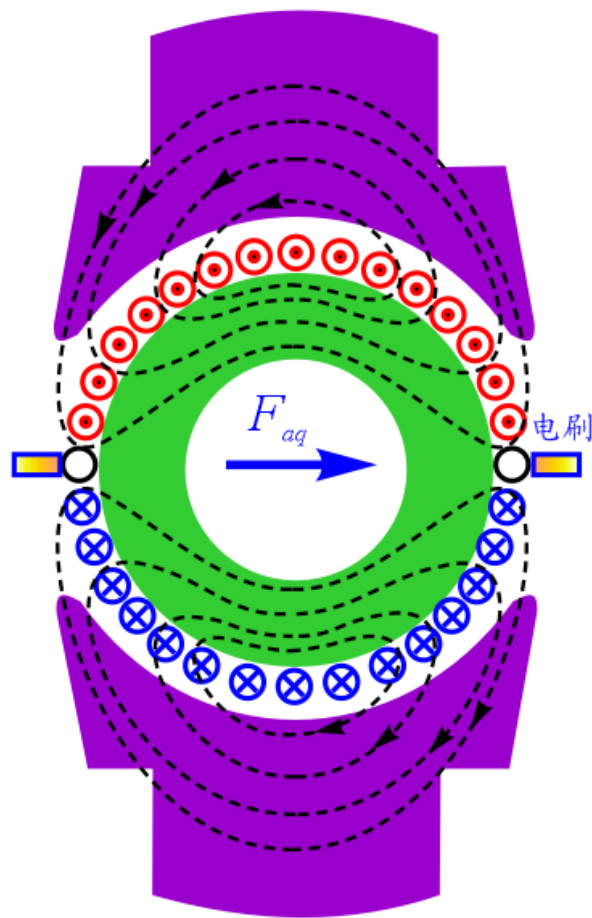
直流电机负载时的气隙磁场



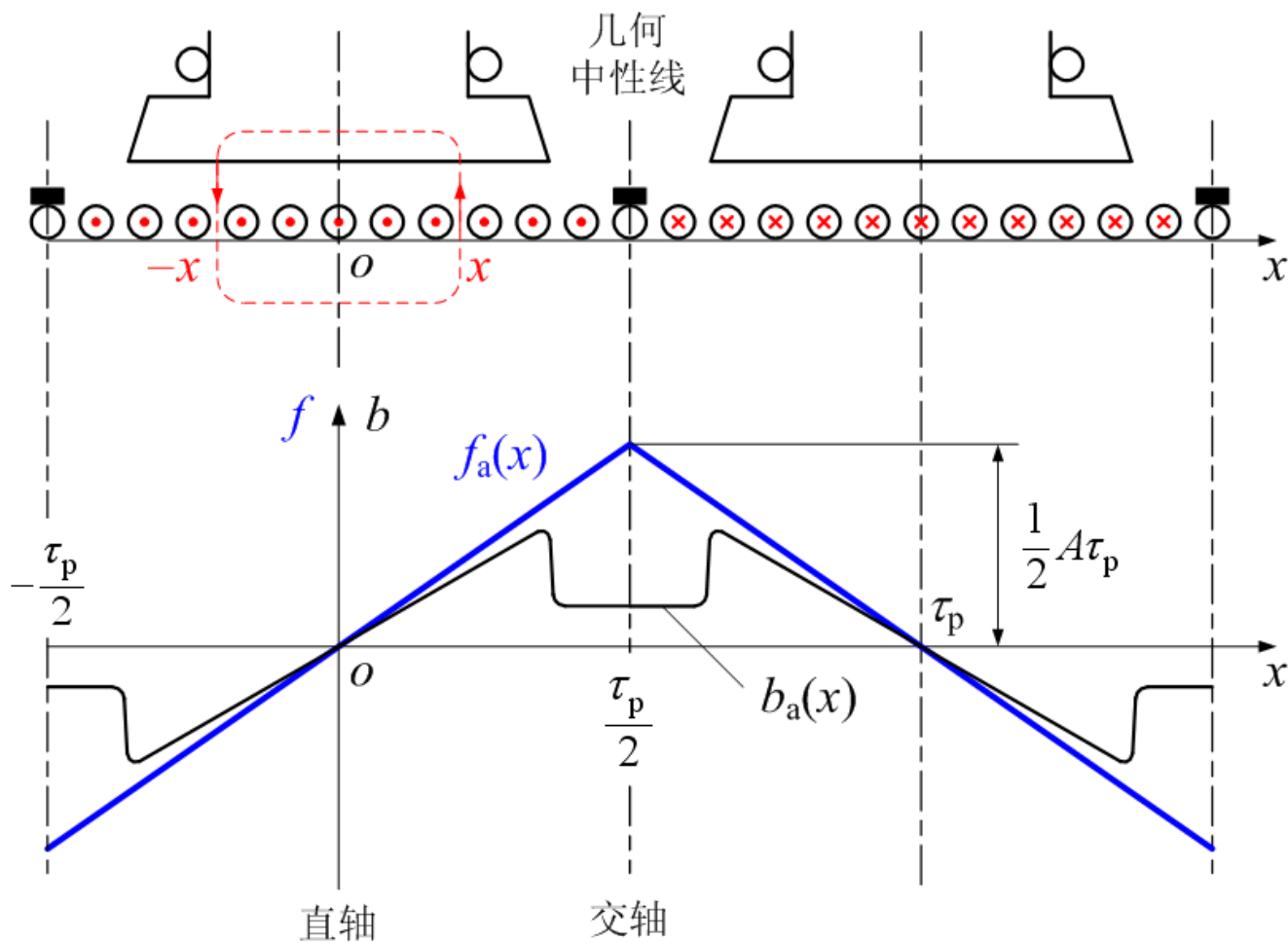
- ❖ 主要分析电枢绕组流过负载电流时产生的电枢磁动势及其作用。
- ❖ 电枢磁动势对励磁电流建立的气隙磁场产生影响，称为电枢反应。
- ❖ 电枢反应对气隙磁通密度的大小、分布、电机的换向、运行性能都有影响。

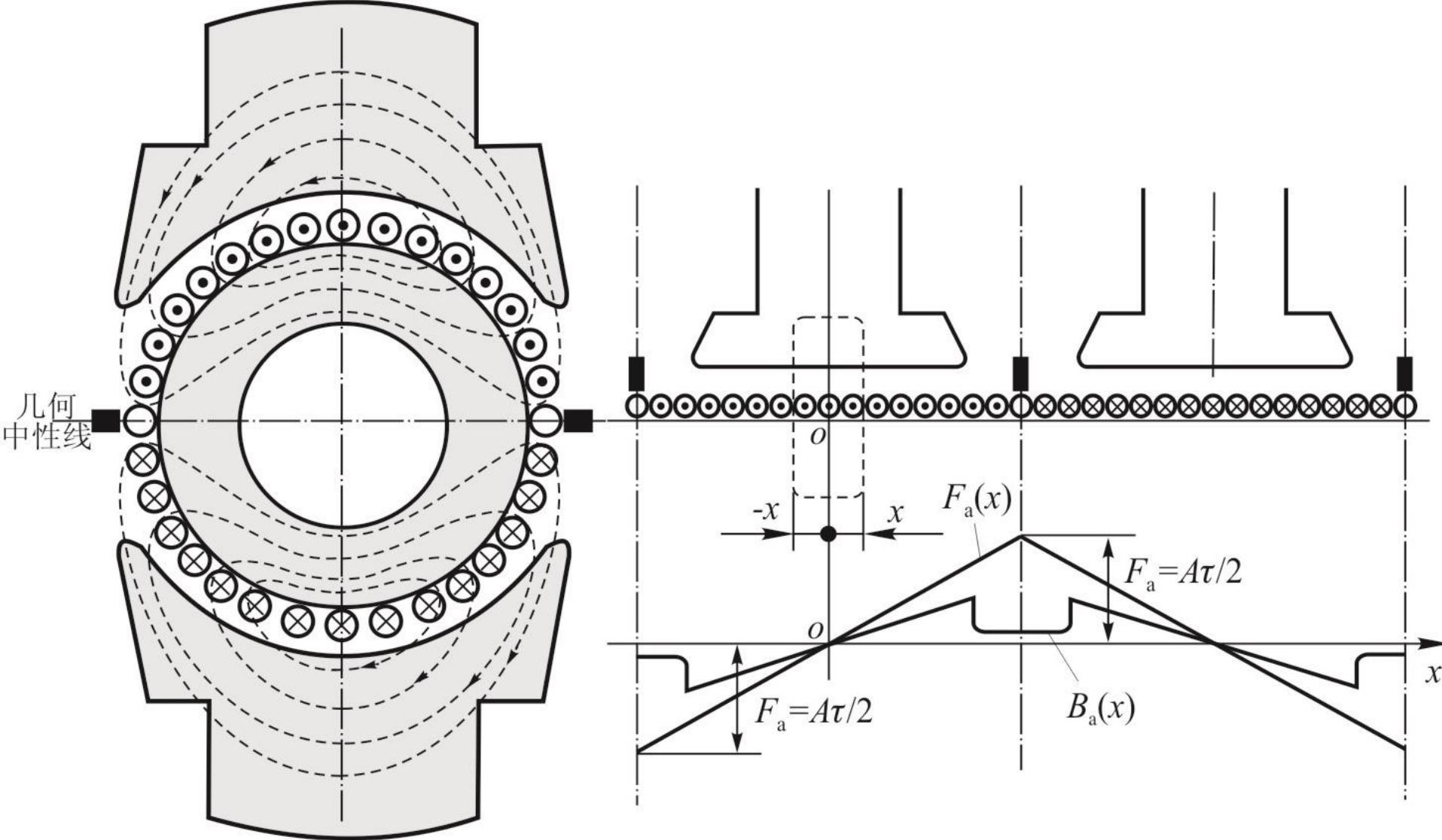
直流电机电枢磁场

- ❖ 直流电机带上负载后，电枢绕组中有电流，电枢电流产生的磁动势称为电枢磁动势。电枢磁动势的出现使电机的磁场发生变化。
- ❖ 主磁极的中心线称为直轴，相邻N极和S极的分界线称为交轴。
- ❖ 一般情况下，直流电机电枢磁场方向总是对准交轴，称为交轴电枢反应。



电枢磁动势的空间分布





$$A = \frac{N_a^{(a)} i_a}{\pi D_a}$$

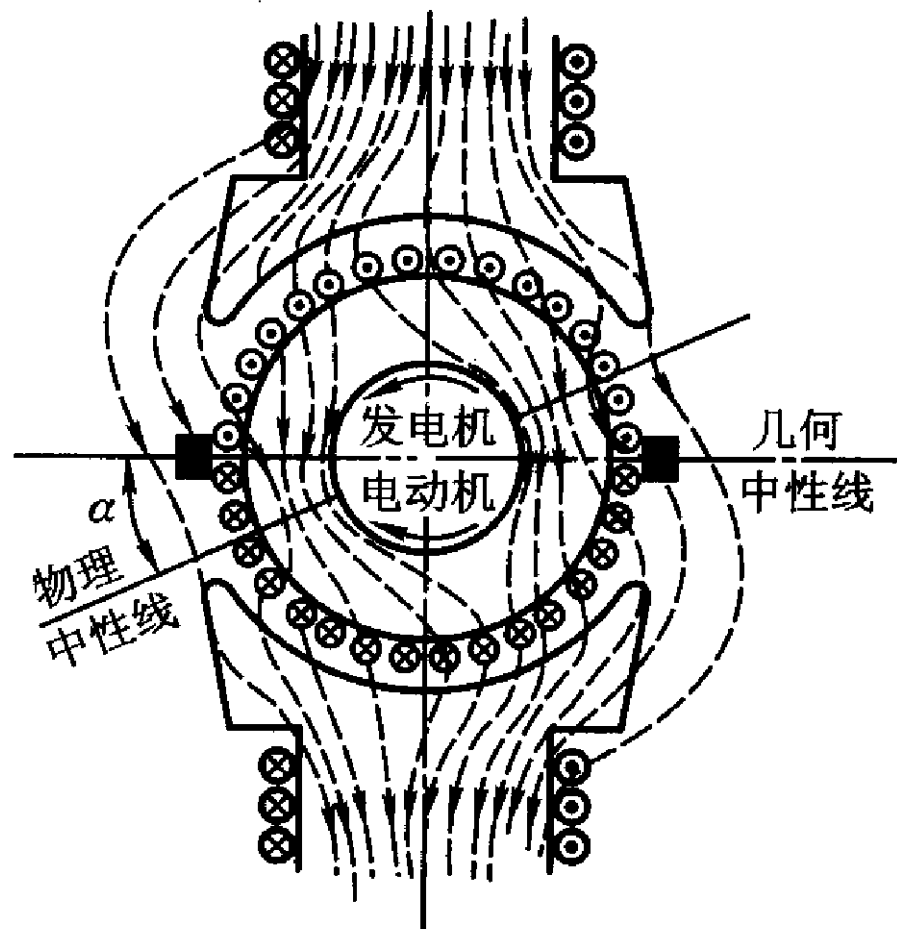
$$F_{aq} = F_a = \frac{A\tau}{2}$$

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p}$$

直流电机的磁场

直流电机的电枢反应

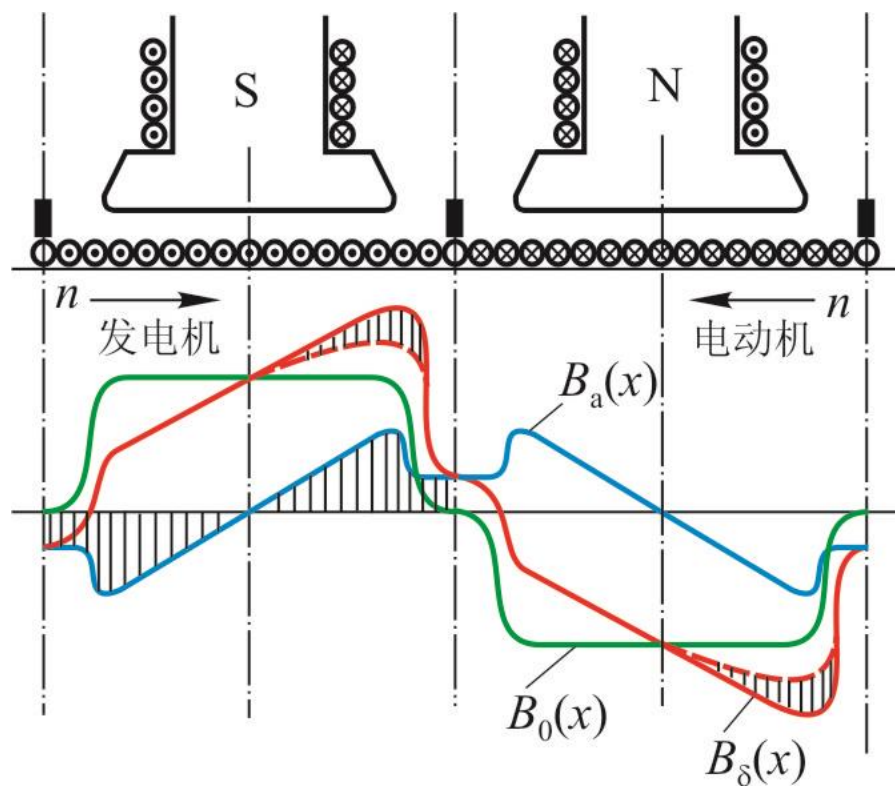
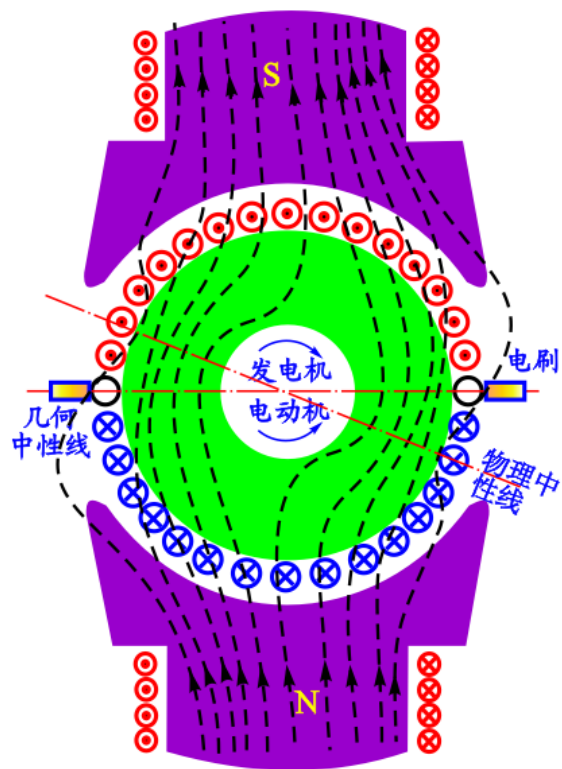
当励磁绕组中有励磁电流，电机带上负载后，气隙中的磁场是励磁磁动势与电枢磁动势共同作用的结果。电枢磁场对气隙磁场的影响称为电枢反应。



(a) 磁场分布

直流电机的磁场

直流电机的交轴电枢反应



直流电机的磁场

1)、使气隙磁场发生畸变

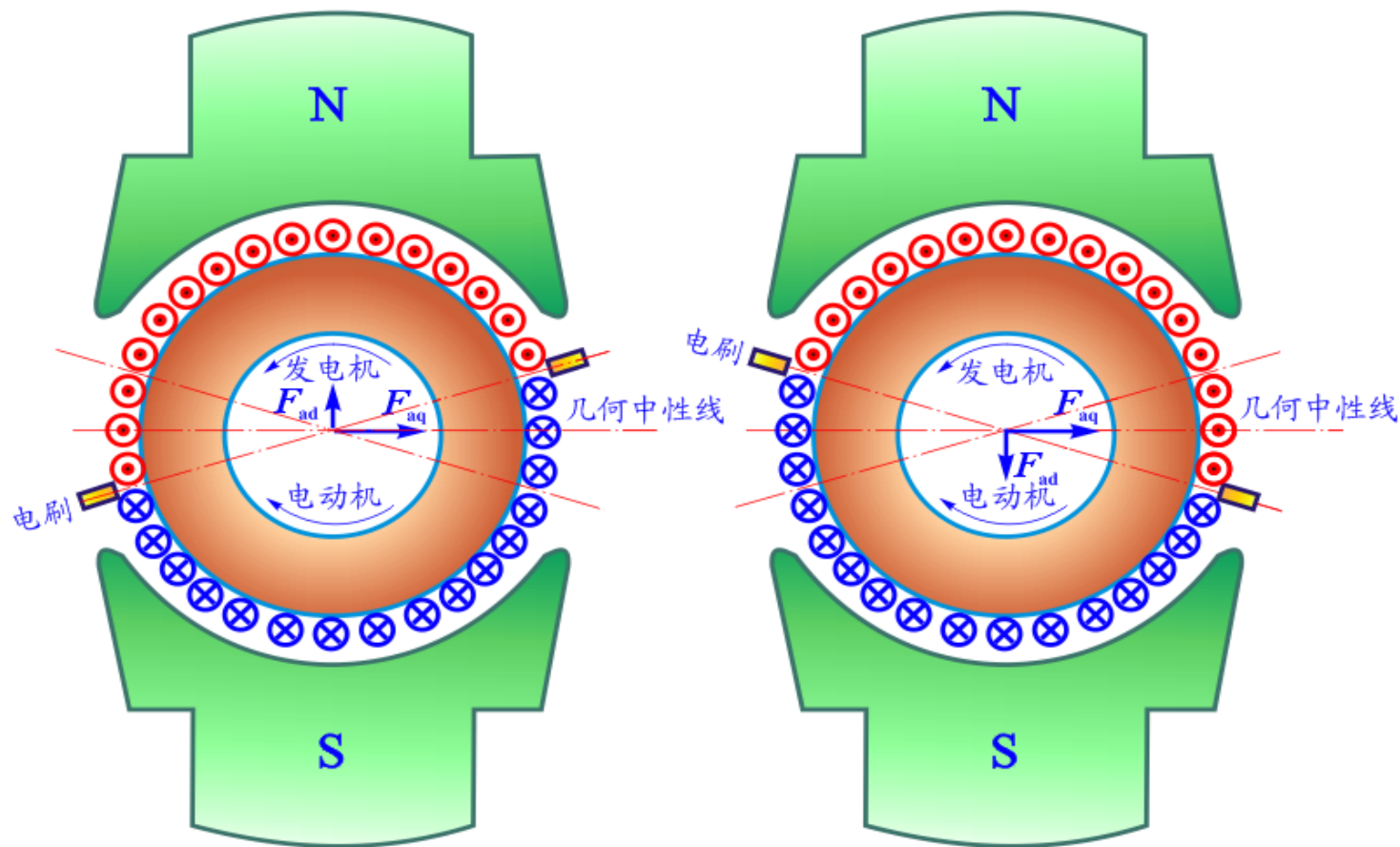
空载时电机的物理中性线与几何中性线重合。负载后由于电枢反应的影响，每一个磁极下，一半磁场被增强，一半被削弱，物理中性线偏离几何中性线 α 角，磁通密度的曲线与空载时不同。

2)、对主磁场起去磁作用

磁路不饱和时，主磁场被削弱的数量等于加强的数量，因此每极量的磁通量与空载时相同。饱和时，主磁极增磁部分因磁密增加使饱和程度提高，铁心磁阻增大，增加的磁通少些，因此负载时每极磁通略为减少。即电刷在几何中性线时的电枢反应为交轴去磁性质。

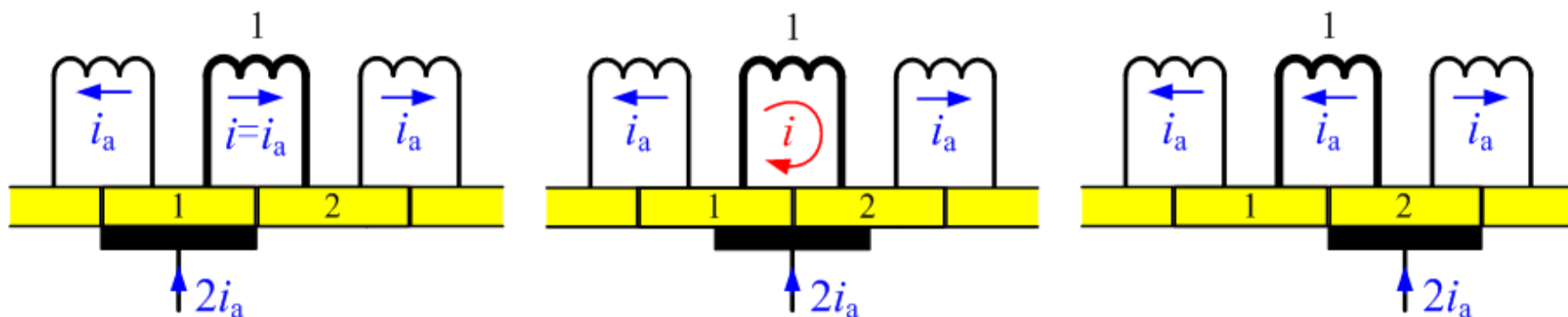
直流电机的磁场

直流电机的直轴电枢反应



直流电机的换向

直流电机电枢旋转时，构成电枢绕组的各线圈，依次从一条支路经由电刷短路后转入电流方向相反的另一条支路。这种电流方向的改变称为换向。



开始换向

换向过程中

换向结束

直流电机的换向



- ❖ 换向性能是直流电机运行品质的重要指标。
- ❖ 换向不好会在电刷与换向片间产生有害的火花。
- ❖ 当火花超过一定限度时，会加剧电刷和换向器的磨损，可能损坏电刷和换向器表面，甚至产生环火，使电机不能正常运行甚至损坏。
- ❖ 产生换向火花的原因有多方面，受电磁、机械、电刷材质、电化学、电热以及环境等多种因素影响。

直流电机的换向

换向的电磁理论

换向元件中的电动势：

自感电动势 e_L 和 互感电动势 e_M ：换向元件（线圈）在换向过程中电流改变而产生的。

切割电动势 e_a ：在几何中性线处，由于电枢反应存在，电枢反应磁密不为零，在换向元件中感应切割电动势。

根据楞次定律，自感电动势、互感电动势和切割电动势总是阻碍换向的。

换向电动势 e_k ：在几何中性线处，换向元件在换向磁场中感应的电动势。换向电动势是帮助换向的。

换向元件中的合成电动势为：
$$\sum e = e_L + e_M + e_a - e_k$$

直流电机的换向



改善换向的方法

- ❖ 移动电刷
- ❖ 选择合适的电刷
- ❖ 装设换向磁极
 - 位于几何中性线处装换向磁极。换向绕组与电枢绕组串联，在换向元件处产生换向磁动势抵消电枢反应磁动势
- ❖ 大型直流电机在主磁极极靴内安装补偿绕组
 - 补偿绕组与电枢绕组串联，产生的磁动势抵消电枢反应磁动势



本节问题：

- 1.在直流发电机或电动机中换向器的作用是什么？
- 2.直流电机中电枢绕组中的电流是直流电还是交流电？
- 3.电枢绕组指的是定子绕组还是转子绕组？
- 4.直流电机或者只能作为电动机，或者只能作为发电机运行？

直流电动机的基本关系式



电枢绕组的感应电动势

- ❖ 电枢绕组的感应电动势 E_a ，简称电枢电动势，是指正、负极性电刷间的电动势。
- ❖ E_a 就是电枢绕组任一条并联支路的电动势，等于一条并联支路串联的所有导体的电动势之和。

电枢电动势为

$$E_a = C_e \Phi n = K_e \omega$$

$$C_e = \frac{pN_a}{60a} \quad (\text{电动势常数}) \quad K_e = C_e \Phi \cdot \frac{60}{2\pi} \quad (\text{反电势系数})$$

电枢绕组的感应电动势

❖ 电枢电动势

$$E_a = C_e \Phi n$$

- 电枢电动势 E_a 与每极磁通量 Φ 、转速 n 成正比。
- 电动势常数 C_e 与极对数 p 、导体总数 z 、并联支路对数 a 有关。
- 如果线圈不是整距，而是短距的，则 E_a 会略有降低。但实际电机不允许短距太大，所以可不计其影响。
- 如果电刷不位于几何中性线， E_a 将会减小。

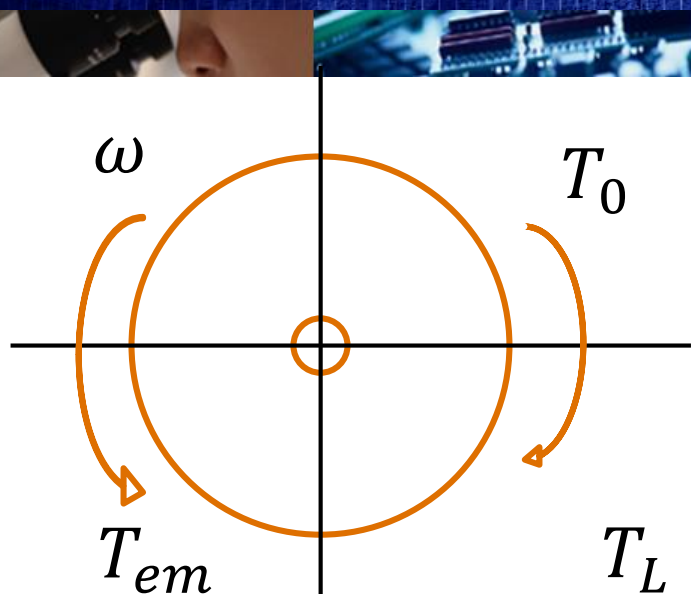
电枢绕组的电磁转矩

❖ 电枢绕组的电磁转矩 T 为电枢所有导体上产生的电磁转矩之和。

$$T = C_t \Phi I_a = K_t I_a$$

$$C_t = \frac{pN_a}{2\pi a} = \frac{60}{2\pi} C_e \text{ (转矩常数)} \quad K_t = C_t \Phi \text{ (转矩系数)}$$

转矩平衡方程式



❖ T_{em} — 电磁转矩

❖ T_L — 负载转矩

❖ T_0 — 空载阻转矩

❖ T_2 — 输出转矩

❖ J — 总转动惯量

❖ J_M — 转子转动惯量

❖ T_L — 负载转动惯量

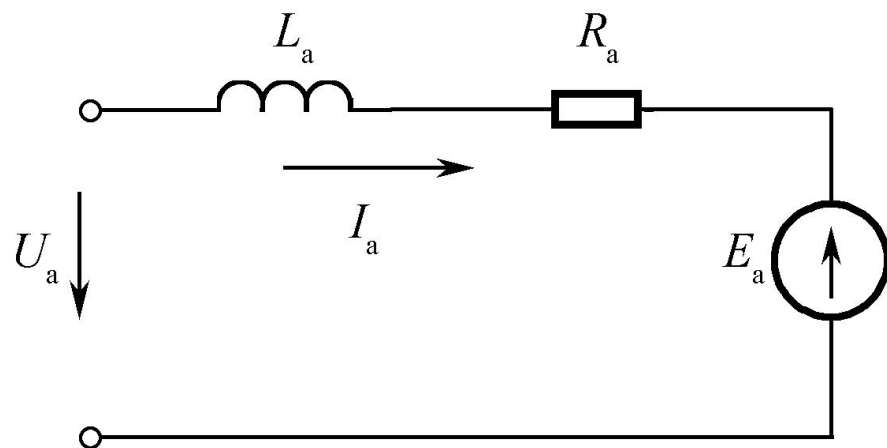
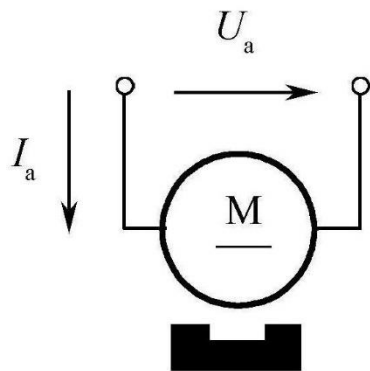
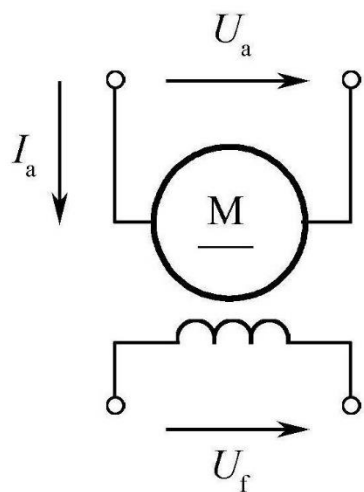
$$T_{em} = T_0 + T_L + J \frac{d\omega}{dt}$$

$$T_{em} = T_0 + T_L$$

动态转矩平衡方程式

静态转矩平衡方程式

电压平衡方程式



$$U_a = L_a \frac{dI_a}{dt} + R_a I_a + E_a$$

动态电压平衡方程式

$$U_a = R_a I_a + E_a$$

静态电压平衡方程式

直流电动机的基本关系式

❖ 四大关系式

■ 基本关系式

$$\begin{cases} T_{\text{em}} = C_t \Phi I_a = K_t I_a \\ E_a = C_e \Phi n = K_e \omega \end{cases}$$

■ 动态关系式

$$\begin{cases} T_{\text{em}} = T_0 + T_L + J \frac{d\omega}{dt} \\ U_a = L_a \frac{dI_a}{dt} + R_a I_a + E_a \end{cases}$$

■ 静态关系式

$$\begin{cases} T_{\text{em}} = T_0 + T_L \\ U_a = R_a I_a + E_a \end{cases}$$

■ 参数关系

$$K_e = K_t$$

感应电势与力矩波动

❖ 实际电机有齿槽存在，采用电磁场理论进行分析的结论：

■ 感应电势的平均值 $E_a = C_e \Phi n = K_e \omega$

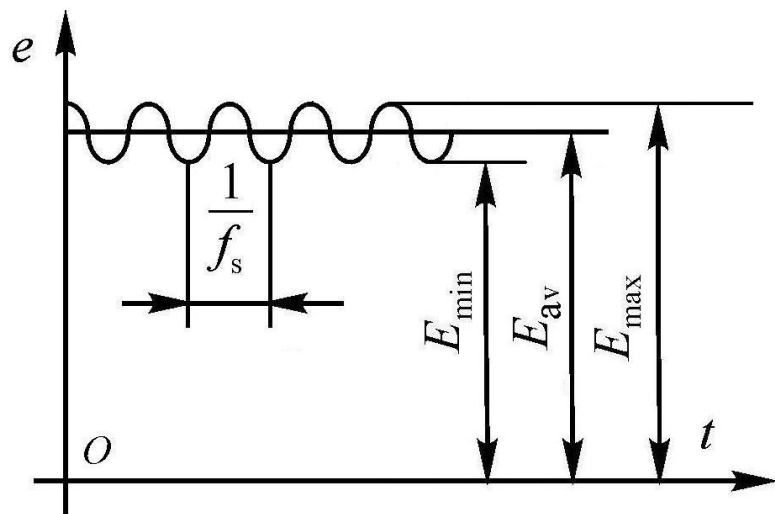
❖ 瞬时值随着电枢转动而上下波动。

■ 波动的频率为齿频率

$$f_s = \frac{zn}{60}$$

■ 纹波系数

$$\varepsilon_e = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}$$



感应电势与力矩波动

❖ 实际电机有齿槽存在，采用电磁场理论进行分析的结论：

■ 电磁转矩的平均值 $T_{\text{em}} = C_t \Phi I_a = K_t I_a$

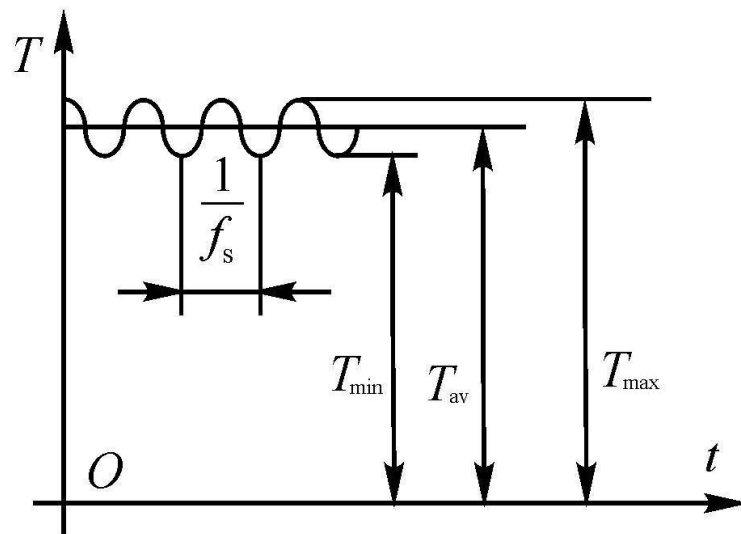
❖ 瞬时值随着电枢转动而上下波动。

■ 波动的频率为齿频率

$$f_s = \frac{zn}{60}$$

■ 纹波系数

$$\varepsilon_T = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}$$

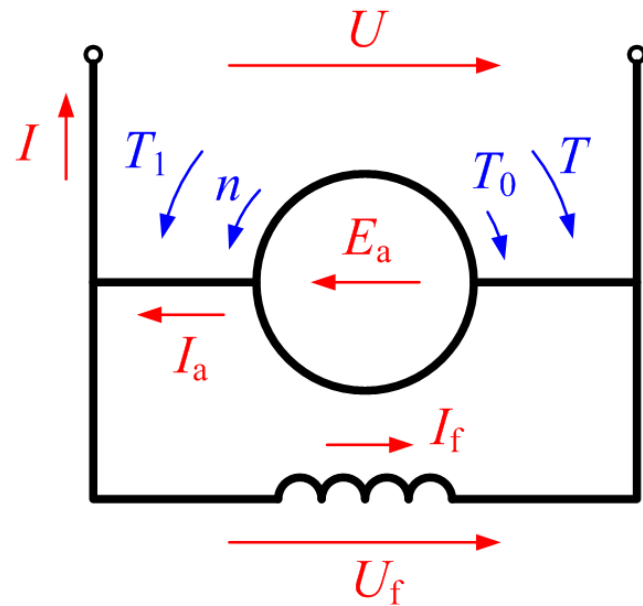


直流发电机的功率平衡方程式

❖ 电磁功率

$$P_{\text{em}} = T\Omega = \frac{pN_a}{2\pi a} \Phi I_a \frac{2\pi n}{60} = E_a I_a$$

- 电磁功率 P_{em} 是电磁转矩 T 吸收的机械功率，也是电枢回路获得的电功率。
- 说明原动机克服电磁转矩 T 所提供的机械功率 $T\Omega$ ，转换成了电枢回路的电功率 $E_a I_a$ ，即发电机转轴输入机械功率，电枢绕组输出电功率。



直流发电机的功率平衡方程式

❖ 直流发电机功率平衡方程式

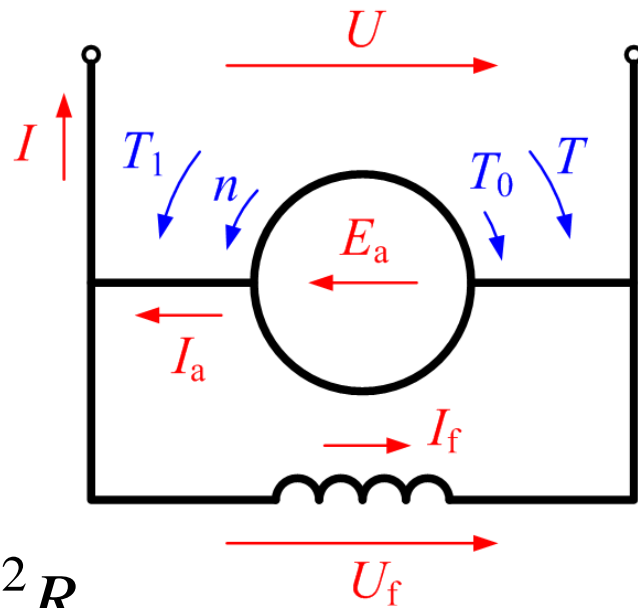
$$\underbrace{E_a = U + I_a R_a}_{I_a = I + I_f}$$

$$E_a I_a = U(I + I_f) + I_a^2 R_a$$

$$P_{em} = P_2 + p_{Cu} + p_{Cuf}$$

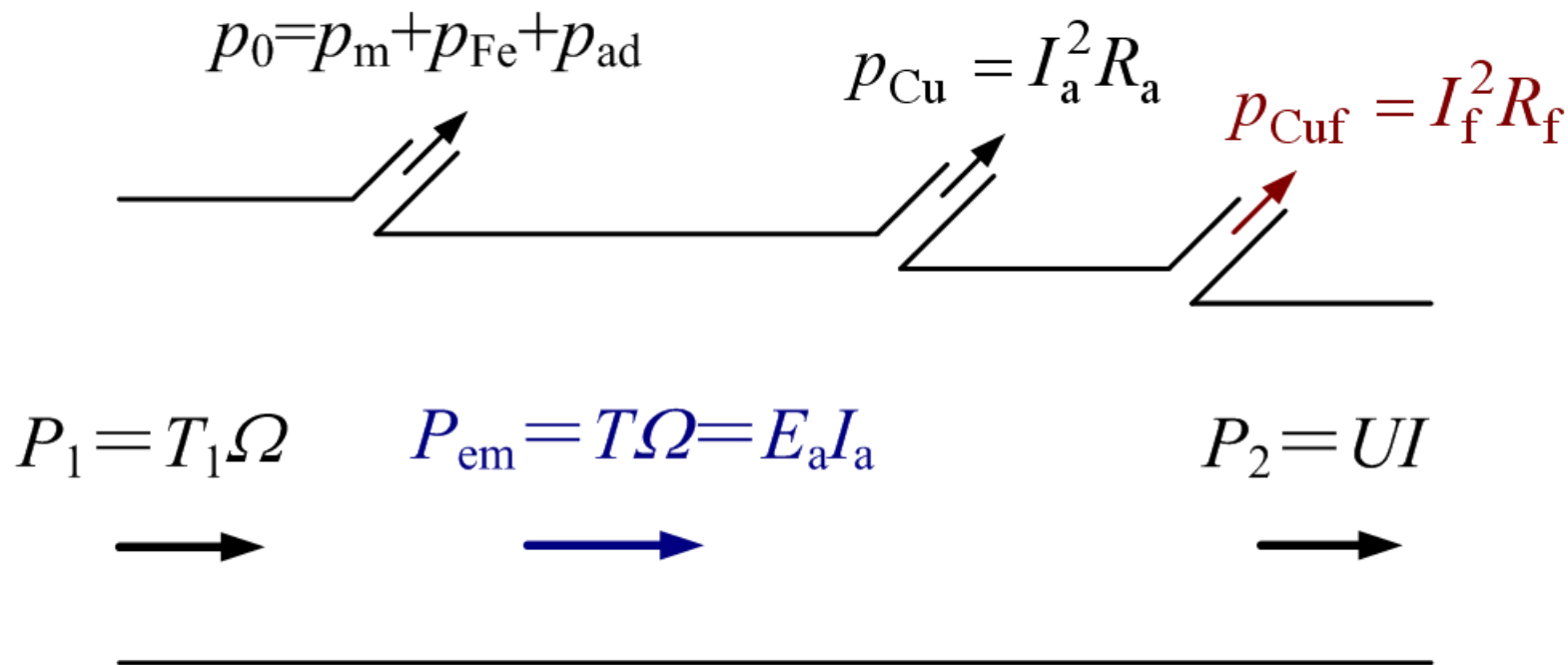
$$P_2 = UI, \quad p_{Cu} = I_a^2 R_a, \quad p_{Cuf} = UI_f = I_f^2 R_f$$

- 电枢得到的电磁功率 P_{em} 扣除电枢铜耗 p_{Cu} 和励磁铜耗 p_{Cuf} ，等于输出功率 P_2 。
- 他励时，功率平衡方程式中不计励磁铜耗 p_{Cuf} 。



直流发电机的功率平衡方程式

❖ 直流发电机功率流程图



直流电动机的功率平衡方程式

❖ 直流电动机功率平衡方程式

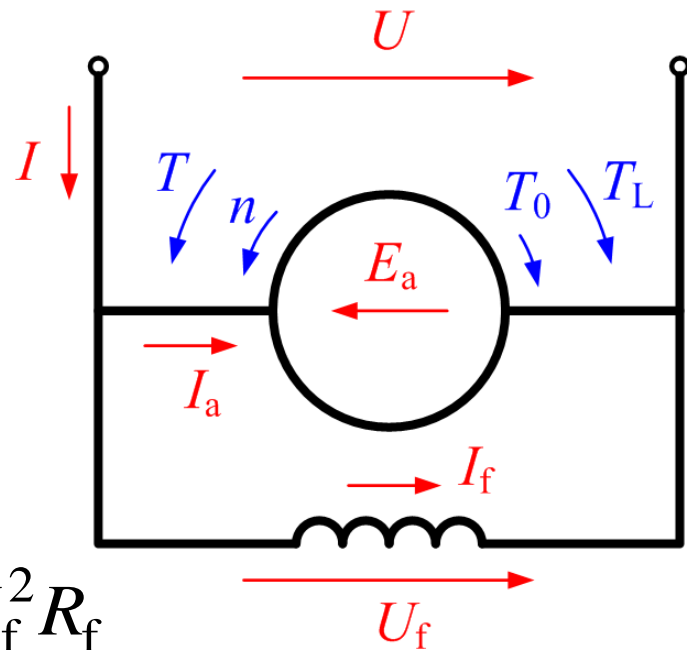
$$U = E_a + I_a R_a \quad I_a = I - I_f$$

$$U(I - I_f) = E_a I_a + I_a^2 R_a$$

$$P_1 = P_{em} + p_{Cu} + p_{Cuf}$$

$$P_1 = UI, \quad p_{Cu} = I_a^2 R_a, \quad p_{Cuf} = UI_f = I_f^2 R_f$$

- 输入功率 P_1 扣除电枢铜耗 p_{Cu} 和励磁铜耗 p_{Cuf} ，等于电磁功率 P_{em} 。
- 他励时，功率平衡方程式中不计励磁铜耗 p_{Cuf} 。

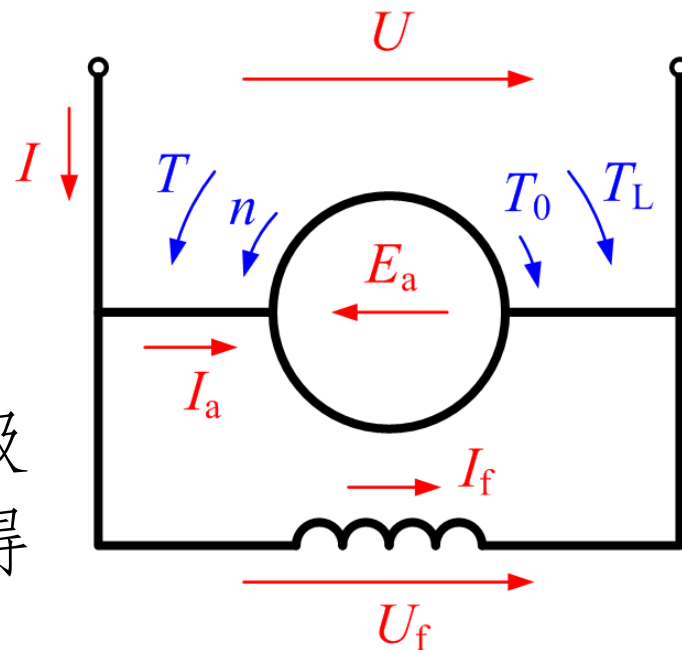


直流电动机的功率平衡方程式

❖ 电磁转矩

$$P_{\text{em}} = E_a I_a = \frac{pN_a}{60a} \Phi n I_a = T\Omega$$

- 电磁功率 P_{em} 是电枢回路吸收的电功率，也是电枢获得的机械功率。
- 说明端电压克服电枢电动势 E_a 所提供的电功率 $E_a I_a$ ，转换成了电枢的机械功率 $T\Omega$ ，即发电机电枢绕组输入电功率，转轴输出机械功率。



直流电动机的功率平衡方程式

- 直流电动机输出功率

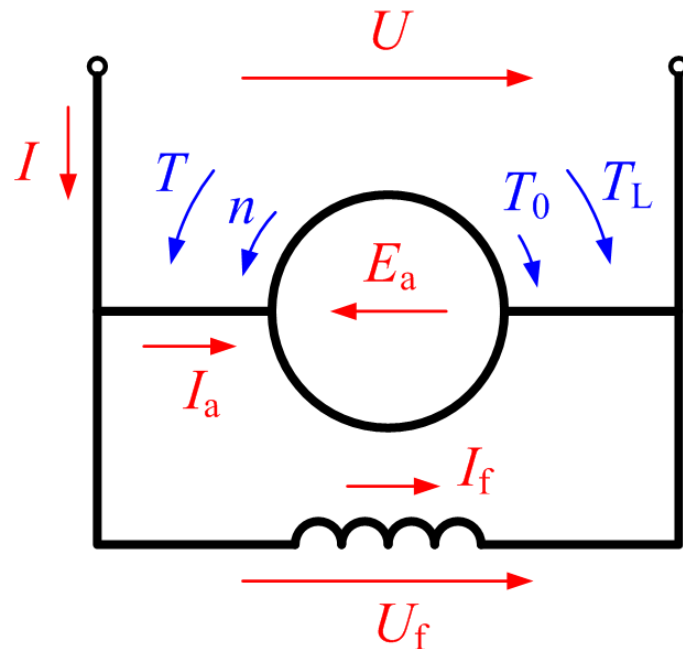
$$T = T_2 + T_0$$



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

$$P_{\text{em}} = P_2 + p_0$$

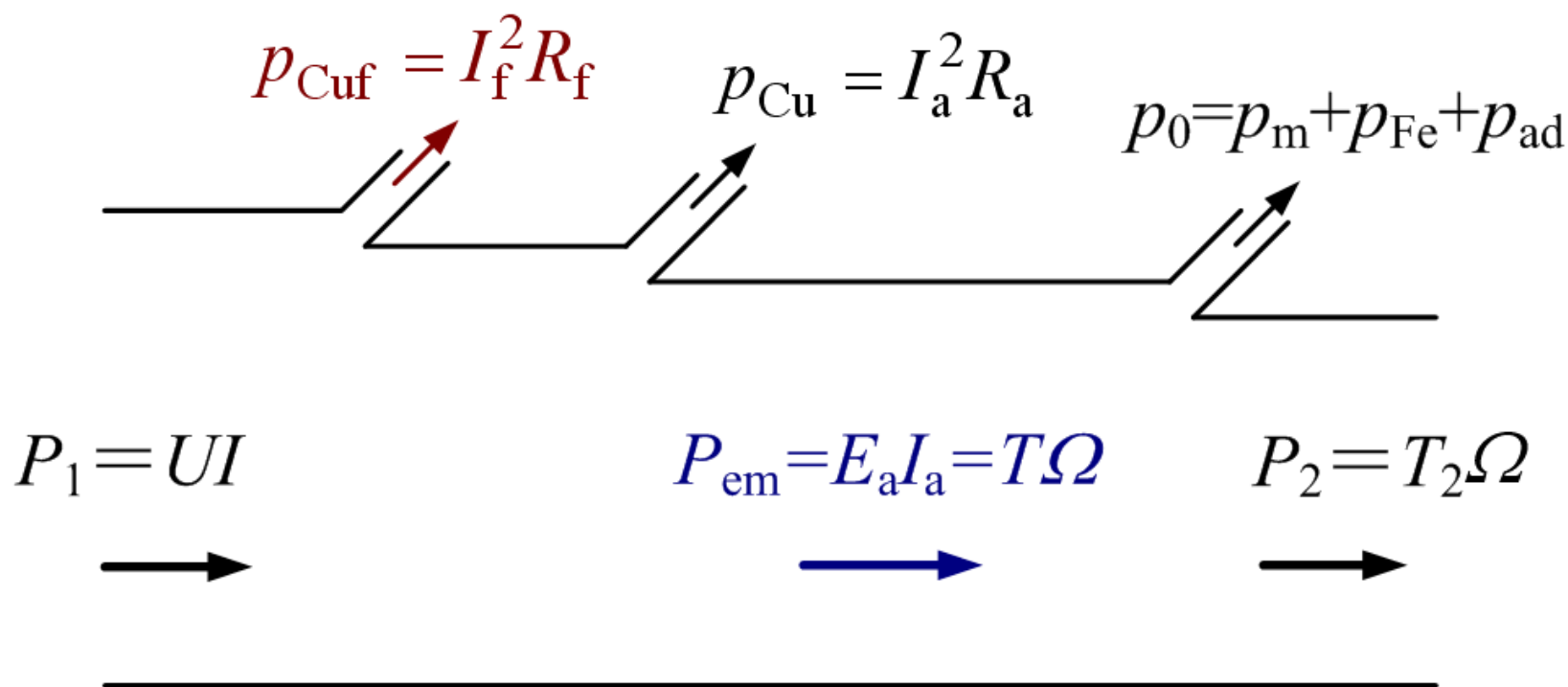
$$P_2 = T_2\Omega = T_L\Omega, \quad p_0 = T_0\Omega, \quad P_{\text{em}} = T\Omega$$



- 电磁功率 P_{em} 扣除空载损耗 p_0 ，等于轴上输出的机械功率 P_2 。

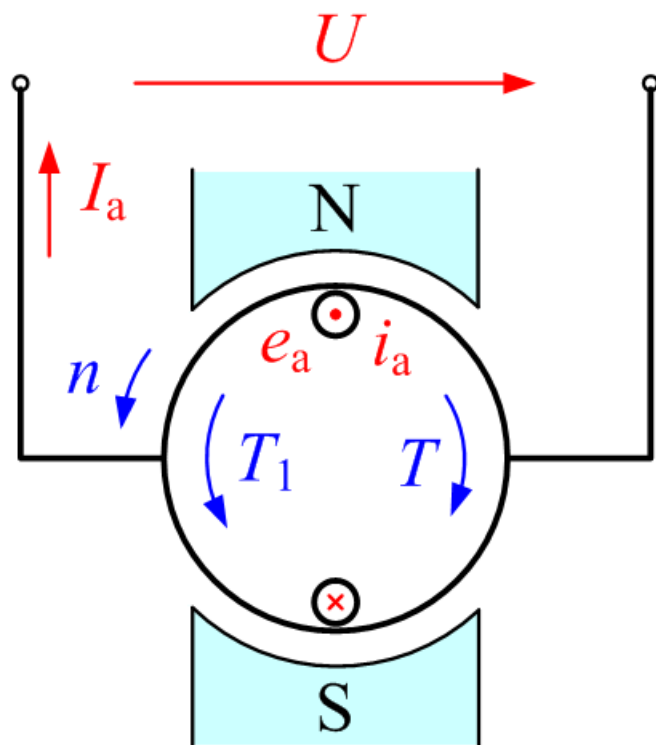
直流电动机的功率平衡方程式

❖ 直流电动机功率流程图

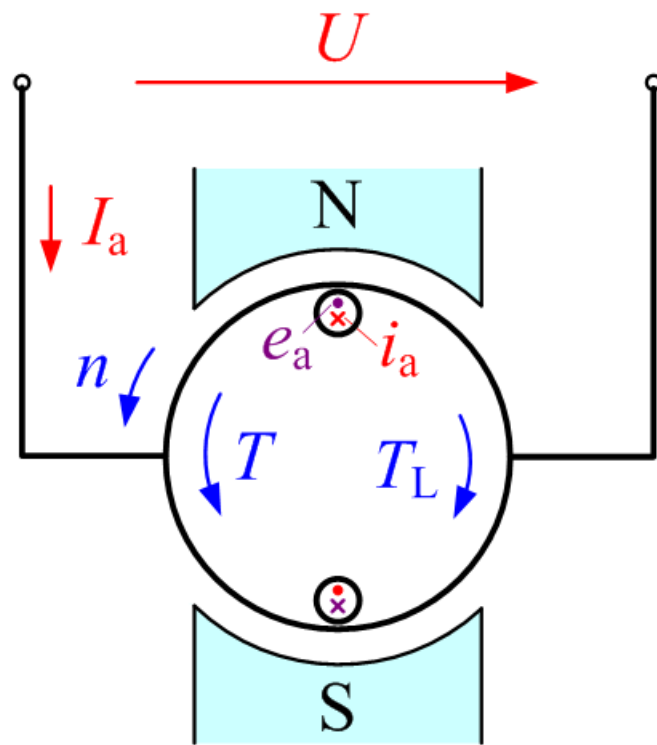


直流电机的可逆原理

- 直流电机的可逆原理



发电机状态



电动机状态

直流电机的可逆原理



以他励电机为例说明可逆原理：

把一台他励直流发电机并联于直流电网上运行， U 保持不变。

保持发电机的 U 不变，减少原动机的输出功率，发电机的转速下降。当 n 下降到一定程度时，使得 $E_a = U$ ，此时 $I = 0$ ，发电机输出的电功率 $P_2 = 0$ ，原动机输入的机械功率仅仅用来补偿电机的空载损耗。继续降低原动机的 n ，将有 $E_a < U$ ， I_a 反向，这时电网向电机输入电功率，电机进入电动机状态运行。同理，上述的物理过程也可以反过来，电机从电动机状态转变到发电机状态。

一台电机既可作为发电机运行，又可作为电动机运行，这就是直流电机的可逆原理。

Thank You !

伊国兴

ygx@hit.edu.cn

