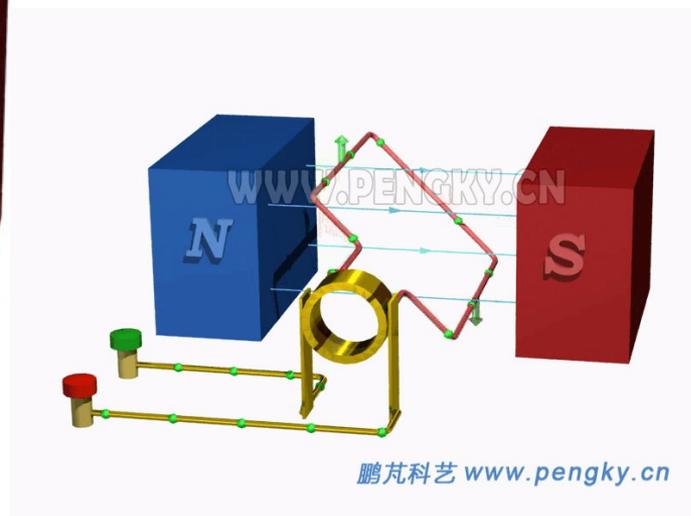
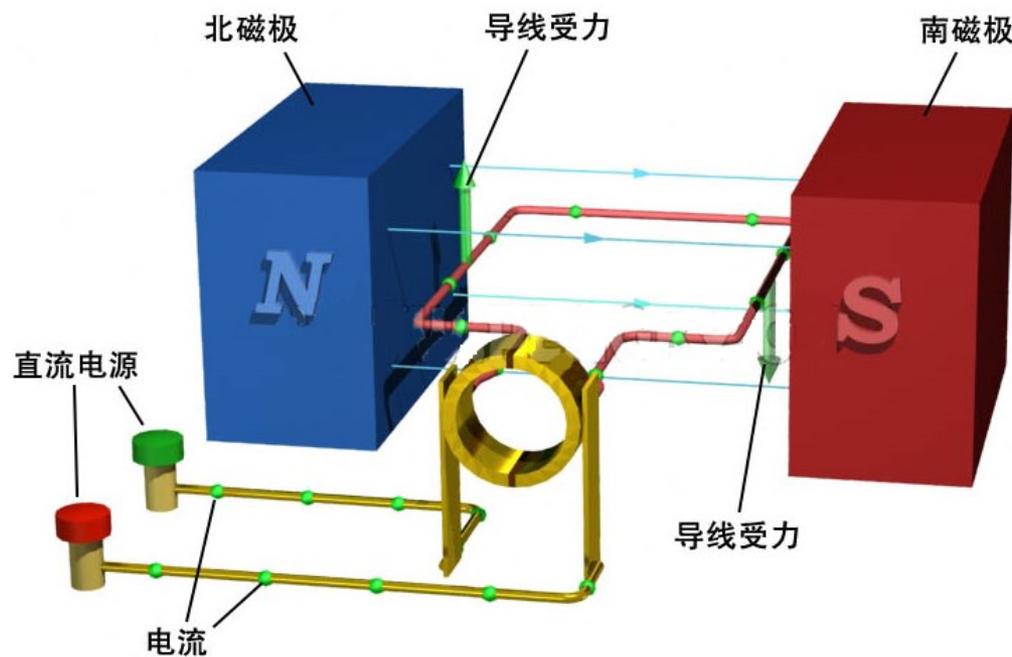




第3章 直流电机原理

Chapter 3 Direct Current Machines





概述

直流电机是电机的主要类型之一。一台直流电机既可作为**发电机**使用，也可作为**电动机**使用，用作**直流发电机**可以得到直流电源；而作为**直流电动机**，由于其具有良好的调速性能，在许多调速性能要求较高的场合，得到广泛应用。



- 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



- 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



一. 直流电机的用途及基本工作原理

本节学习要点：

1. 了解**直流发电机**的直流电机的**特点**、**用途**及**发展趋势**
2. 掌握**直流发电机**的基本**工作原理**



1. 直流电机的特点及用途

特点：

- ① 调速范围广，易于平滑调速；
- ② 启动、制动和过载转矩大；
- ③ 易于控制，可靠性高。

优点：

缺点：

- ① 结构复杂，成本高，可靠性比交流电机差；
- ② 有电刷，存在换向问题，限制容量，增加维护工作量和成本。



用途:

电 源

直流发电机

机械能



电能

直流电动机和交流励磁机提供电源

动 力

直流电动机

电能



机械能

调速要求较高的场合：
轧钢机、电车、电气铁道牵引、挖掘机械、纺织机械等

测量元件

直流测速发电机

机械信号



直流电信号

执行元件

直流伺服电动机

直流电信号

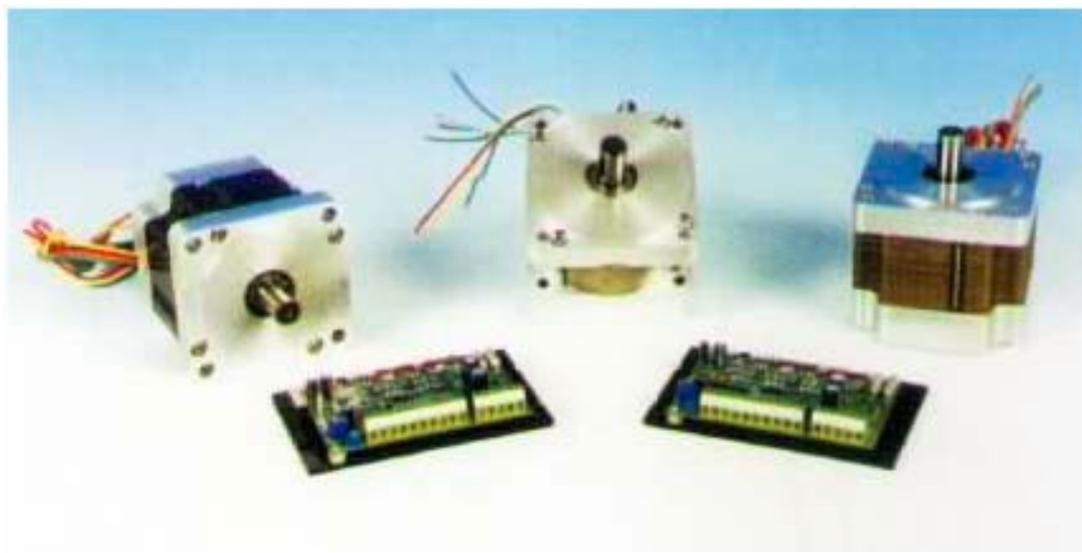


机械信号

👉 直流电机的发展趋势

直流发电机有逐步被采用电力电子器件的整流电源 (Rectifier)所替代的趋势，但在某些场合仍有应用（如作为同步发电机的励磁机）。

与电力电子装置结合而具有直流电动机性能的电机的出现（如无刷直流电动机），使得传统的直流电动机有被取代的趋势。

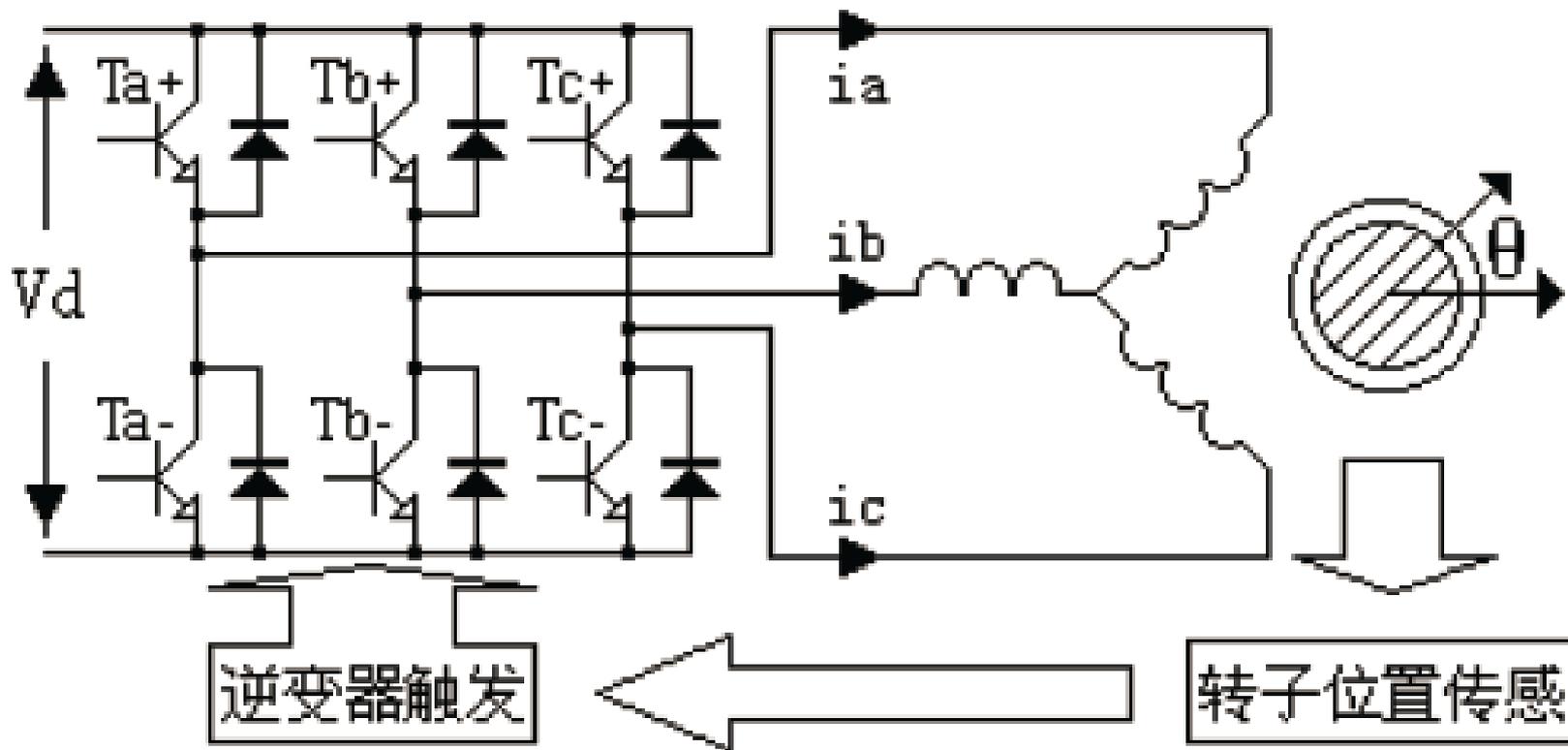




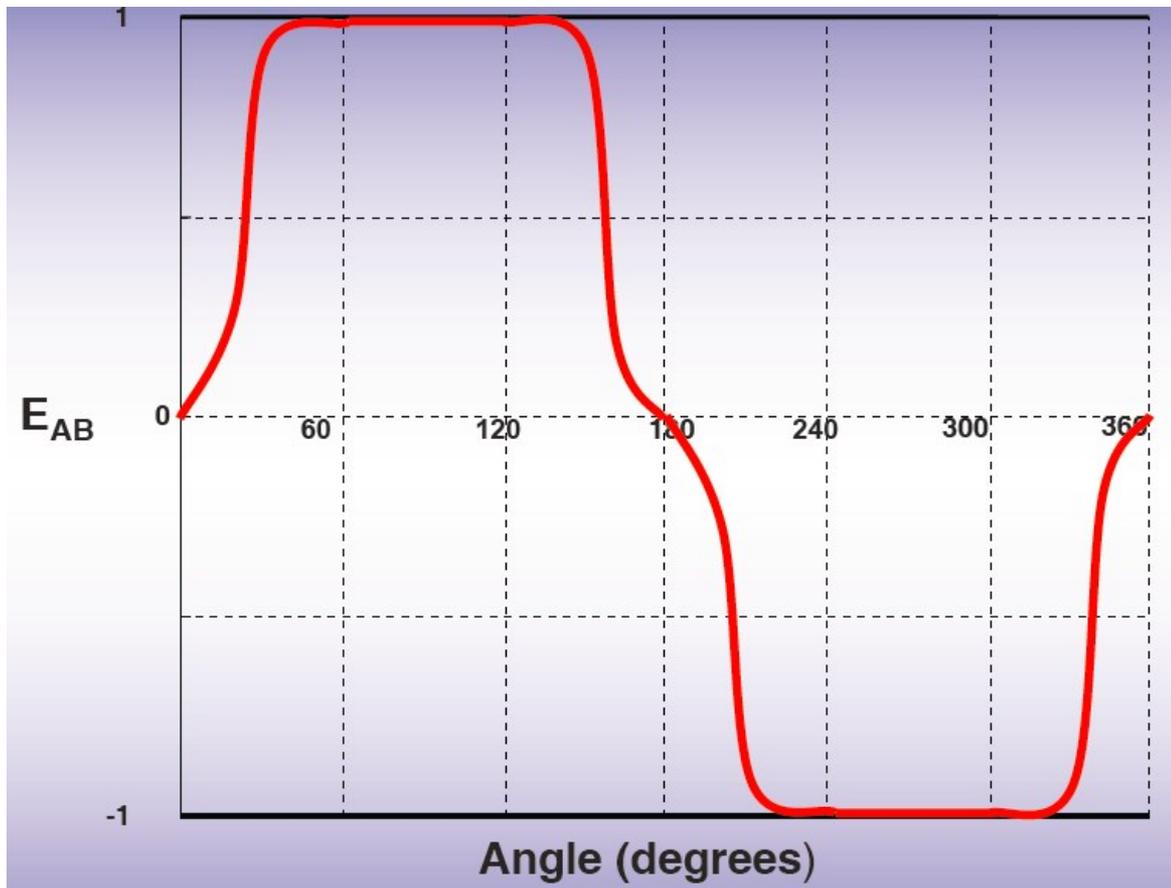
无刷直流电动机 Brushless Motors

无刷直流电动机是近年来发展起来的融合多学科技术的一种新型电机，是典型的机电一体化产品。既具备有刷直流电动机效率高、启动和调速性能好的优点，由于取消了电刷和换向器，又具有寿命长、可靠性高、噪音低等优点。😊

目前**BLDCM** 广泛应用于**航空航天**、**军事**、**医疗器械**、**仪器仪表**、**过程控制**、**机车工业**、**纺织工业**以及**家用电器**等领域。

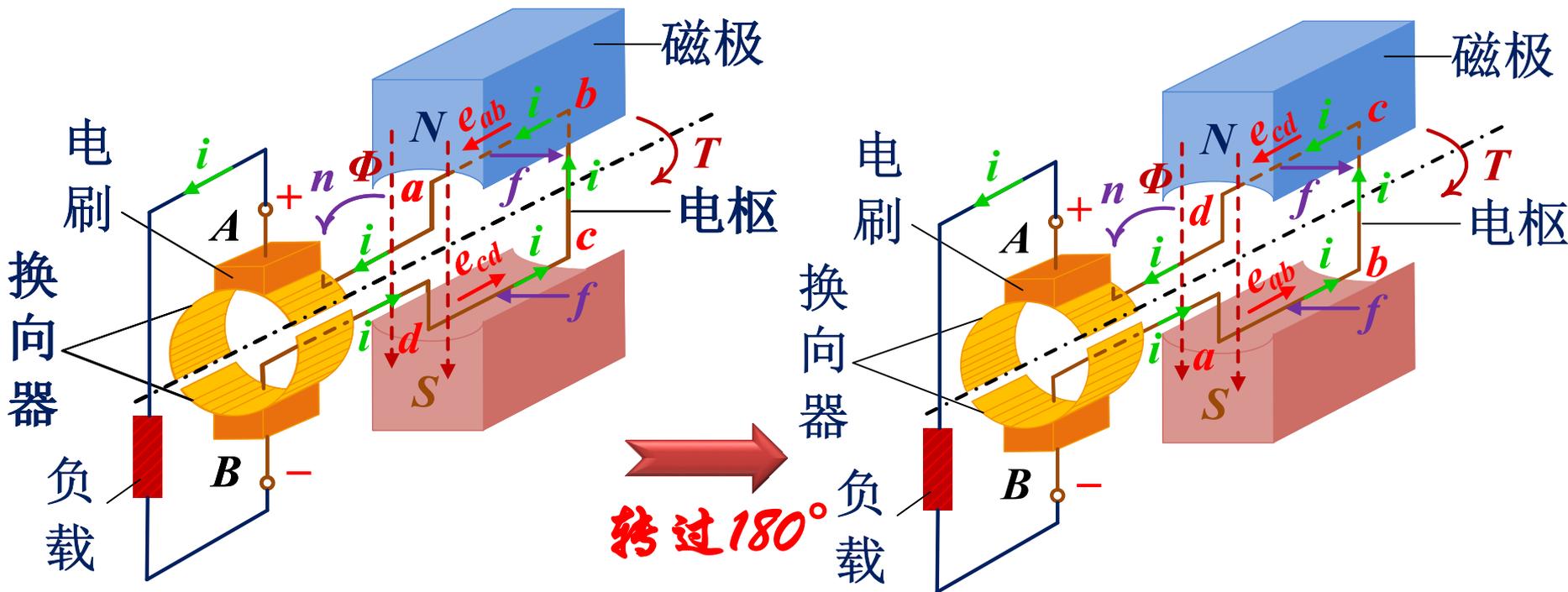


BLDCM 系统结构示意图



交流发电机电刷间电动势 E_{AB}

直流发电机工作模型



线圈电动势: $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ 线圈电动势: $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$

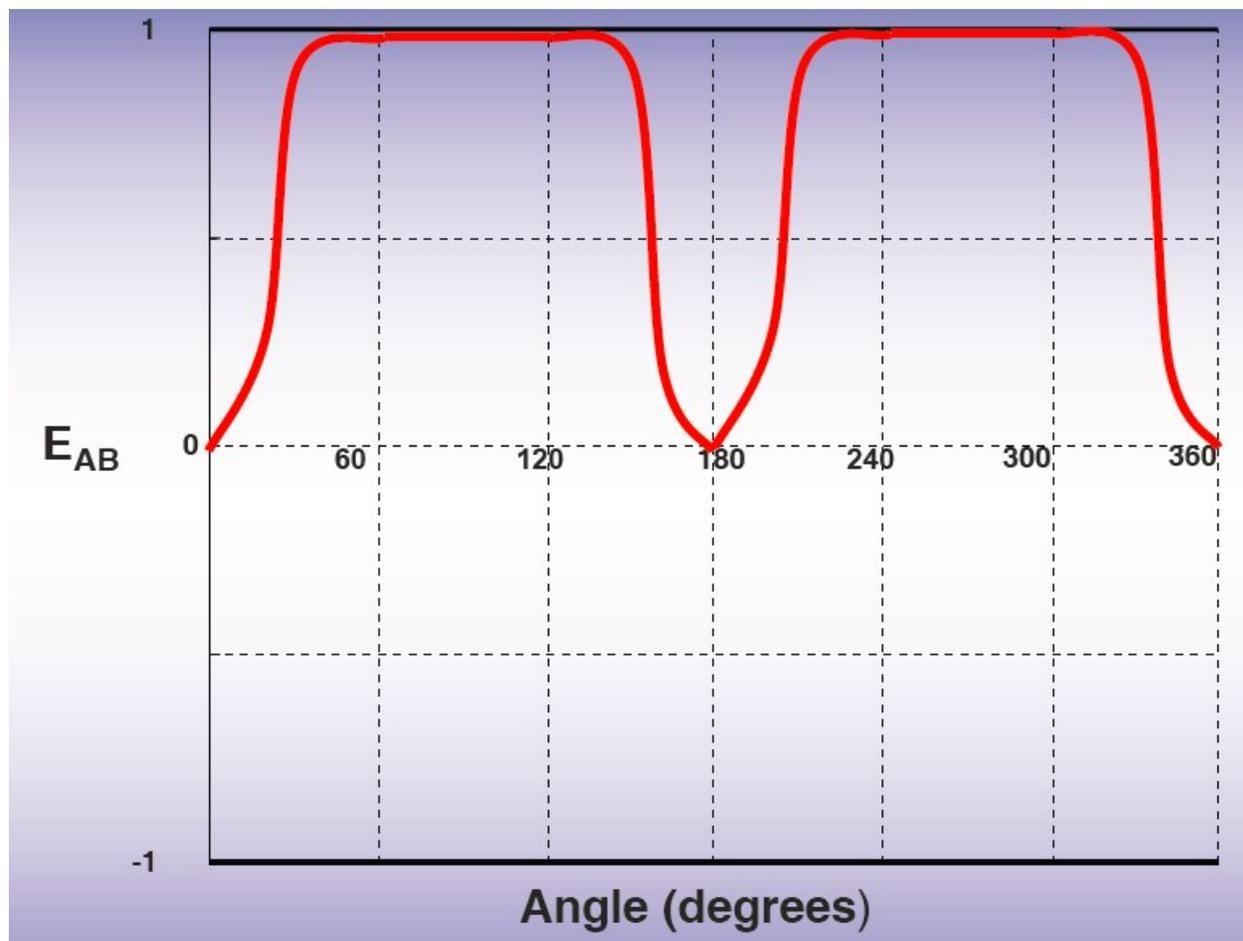
电刷 A: +

电刷 B: -

刷间电动势 E_{AB}

电刷 A: +

电刷 B: -



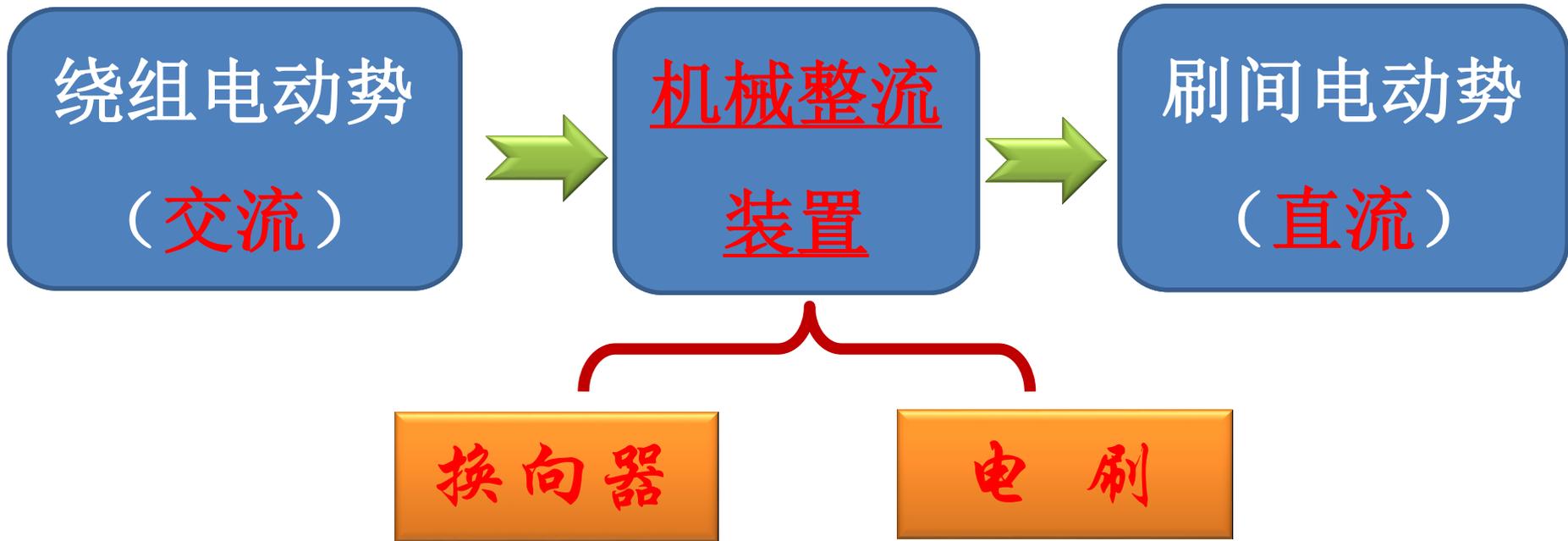
机械整流

结论

直流发电机电刷间电动势 E_{AB}



机械整流



与电枢同轴旋转

空间静止不动

(即与磁极相对静止)

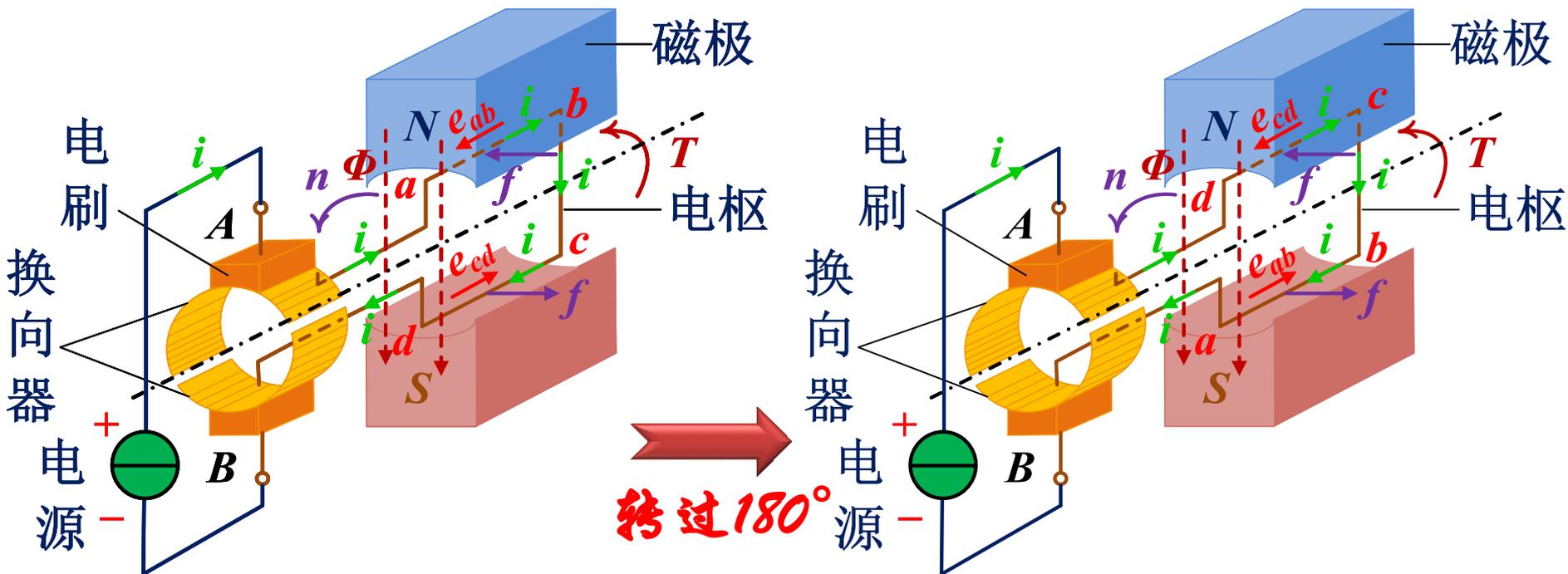
返回



结论

- ☞ e_{ab} 交流 \rightarrow 整流作用 (电刷、换向器) $\rightarrow E_{AB}$ 直流
- ☞ e 与 i 方向始终一致, 对外电路可看成电源。
- ☞ 从空间看, N 极下和 S 极下电枢 电流方向不变 (始终 N 极出、 S 极进), 则 电枢电流产生的磁场在空间是恒定不变的。
- ☞ 电刷A、B间接负载后, 电枢绕组中有 电流 i 流过, 根据电磁力定律, 绕组受到 电磁力 f 作用, 产生 电磁转矩 T , 作用方向与电枢转向 n 相反, 起制动作用。
- ☞ 原动机的机械能 \rightarrow 发电机的电能

直流电动机工作模型



$$i_{ab}: a \rightarrow b \quad i_{cd}: c \rightarrow d$$

空间电流方向：N极进，S极出
 电池转矩 T ：逆时针

$$i_{ab}: b \rightarrow a \quad i_{cd}: d \rightarrow c$$

空间电流方向：N极进，S极出
 电池转矩 T ：逆时针



结论

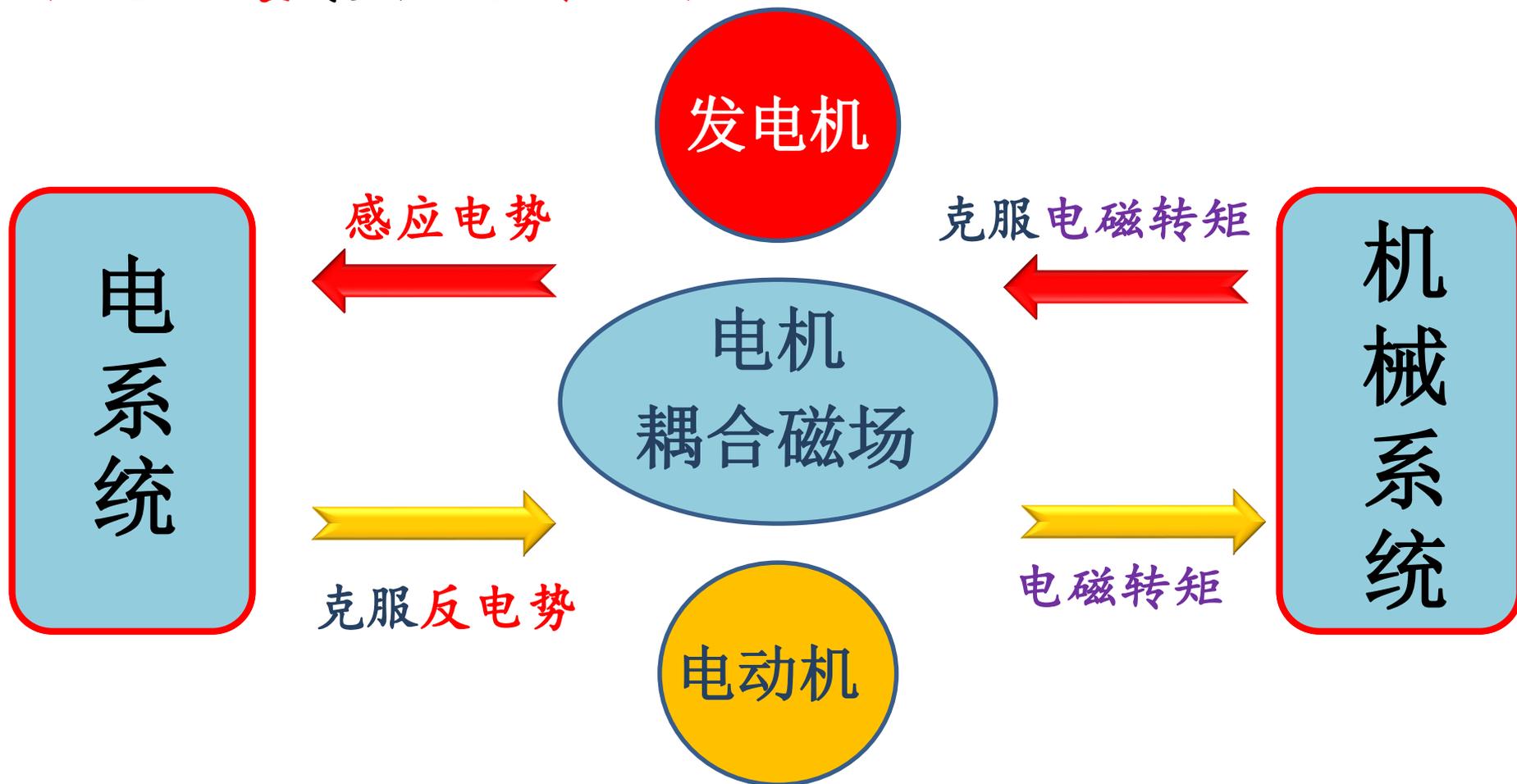
- ☞ 外加 U 、 I 直流 \rightarrow 逆变作用 (电刷、换向器)
 $\rightarrow i_{ab}$ 交流
- ☞ e 与 i 方向始终相反, 称反电势
- ☞ 从空间看, N 极下和 S 极下电枢 电流方向不变 (始终 N 极进、 S 极出), 则 电枢电流产生的磁场在空间是恒定不变的, 且产生的 电磁转矩是单方向的
- ☞ 电磁转矩 T 起驱动作用, 作用方向与电枢转向 n 一致
- ☞ 电源的电能 \rightarrow 电动机的机械能

直流电机的可逆性原理



同一台电机，外加条件不同，既可以作发电机运行，又可以作电动机运行，称为电机的可逆性。

机电能量转换的可逆性



机电能量转换的可逆性，是一切电机的普遍原理。



- 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



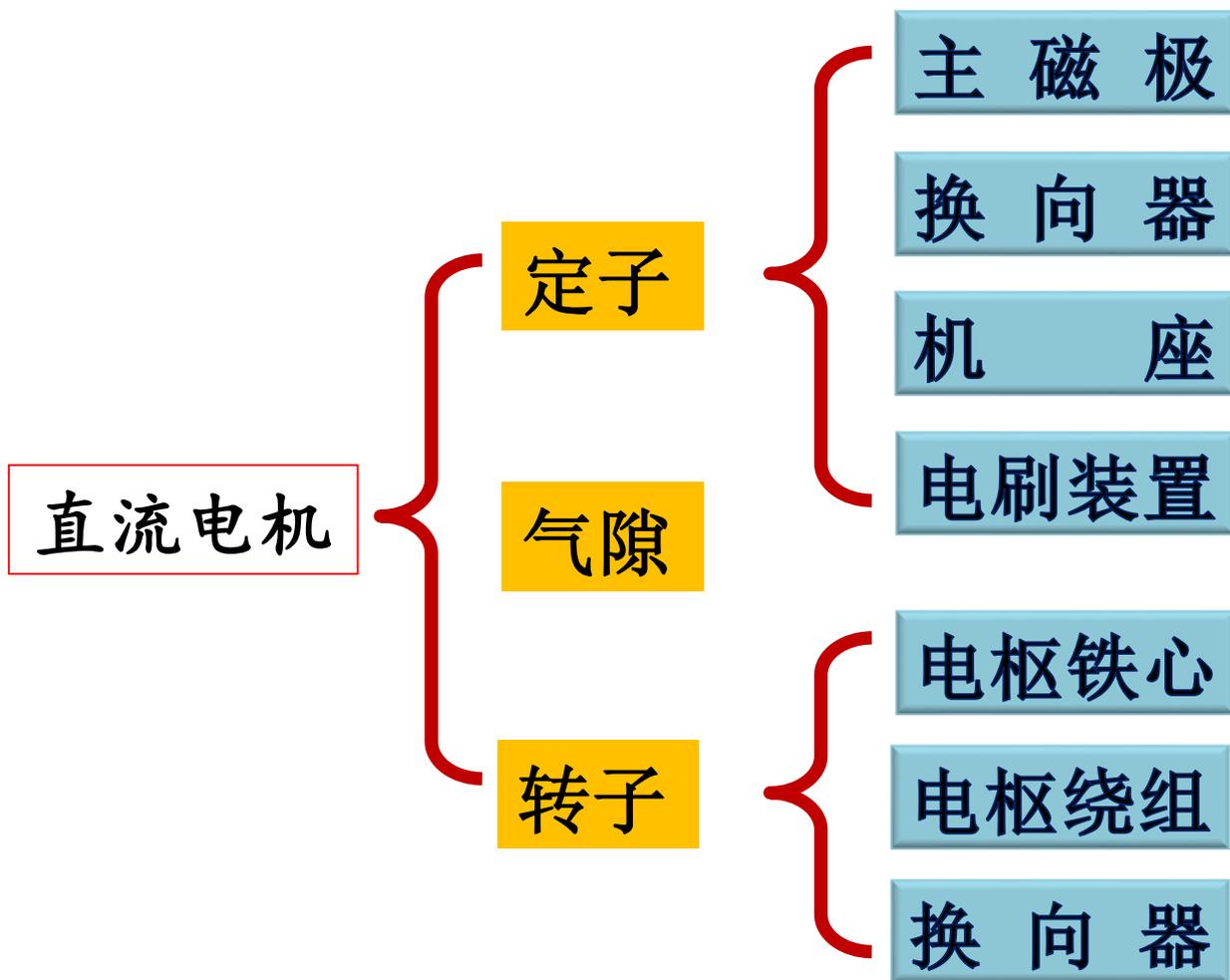
二. 直流电机的主要结构和型号

本节学习要点：

1. 了解**直流电机**的**基本结构**
2. 熟悉直流电机的**铭牌数据**



1. 直流电机的主要结构



主磁极

作用：在气隙中建立磁场

☞ 电励磁

主极铁心：由1~1.5mm钢片叠成

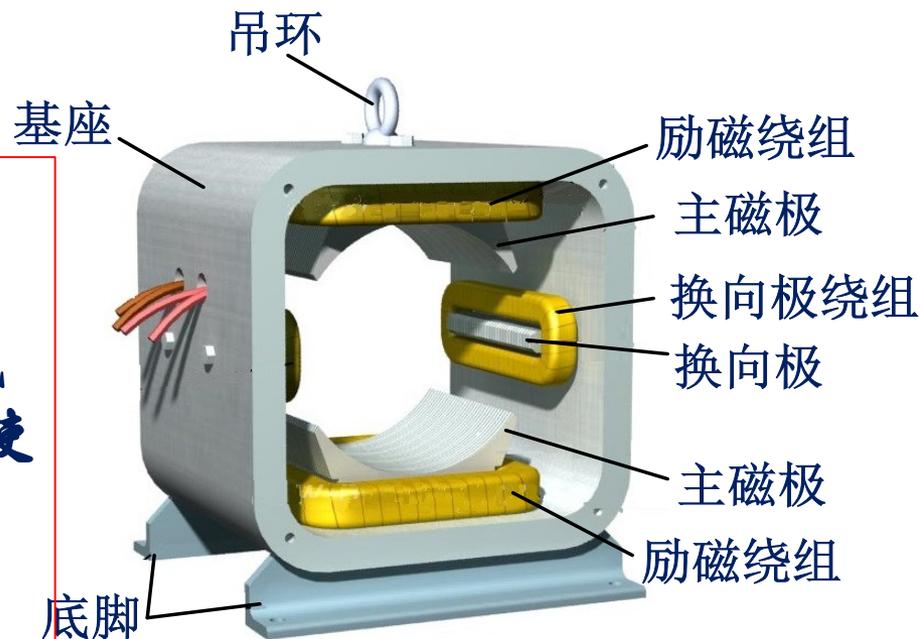
励磁绕组：预制，可串可并，使
N、S交替排列

☞ 永磁

N、S交替排列

换向极

作用：在两个主极之间，改善换向，也称附加极、间极。



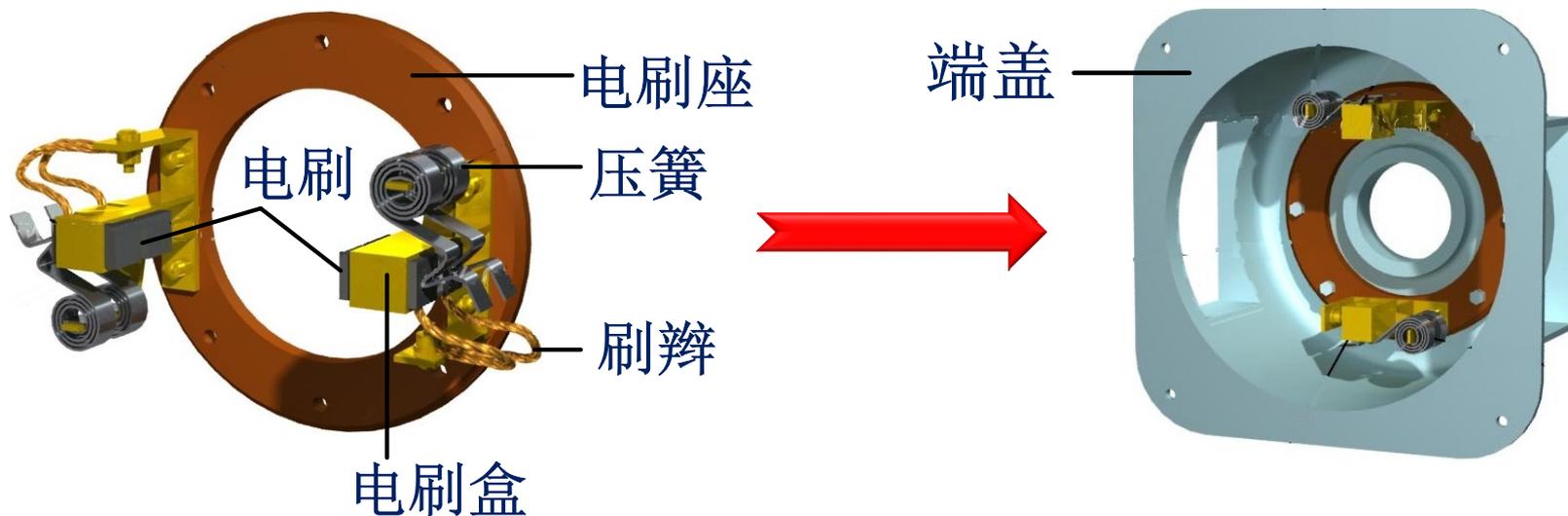
机座

厚钢板弯成或铸钢

作用：1、导磁→主磁路的一部分（磁轭）
2、固定→固定主极、端盖、换向极电刷装置

电刷装置

作用：电枢电路的引入、引出装置



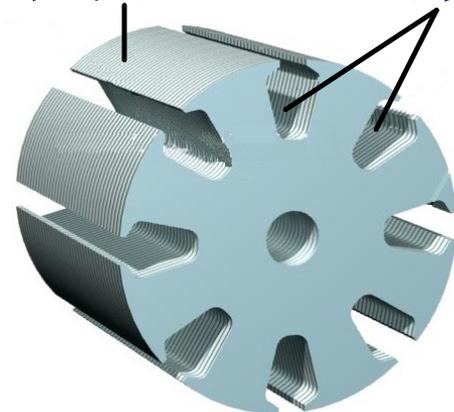
电枢铁心

作用：主磁路的一部分
为减小铁耗，用 $0.35/0.5 \text{ mm}$
硅钢片叠成，其上有齿槽。

电枢绕组

若干线圈按一定规律连接而成，产生感应电势与电磁转矩，是实现机电能量转换的关键部件。

转子铁芯 齿槽

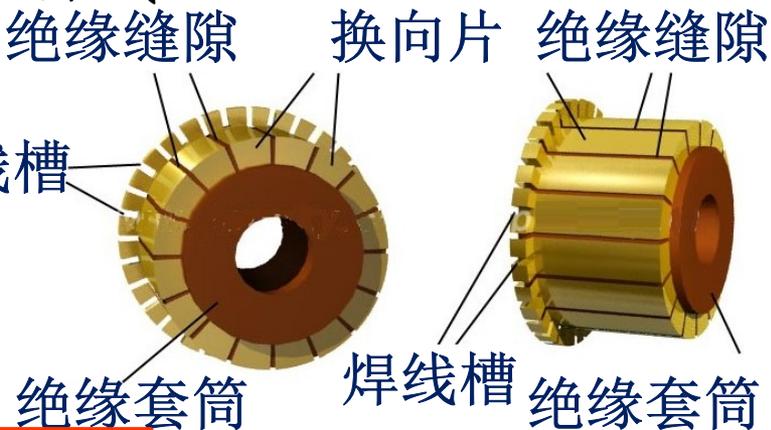


转子绕组（电枢绕组）



绕组引出线端

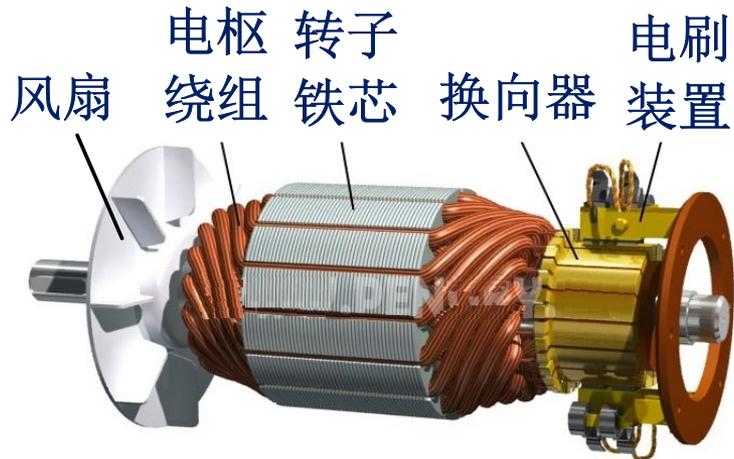
换向器 由相互绝缘的换向片构成



作用： 机械整流/逆变

气隙 定、转子之间自然形成的空气隙，**主磁路的一部分。**

作用： 气隙磁场是能量转换的媒介





2. 电机的铭牌数据 (额定值)

额定状态：电机制造厂按固定标准，根据电机设计的试验数据规定的每台电机正常运行的状态和条件。该状态下各物理量都符合额定值，运行可靠，性能优良。

额定值：表征额定状态的各种数值，电压、电流、功率、转速、励磁电流等，称**铭牌数据**。

额定容量（额定功率） P_N (kW/W)

发电机：引出端输出的电功率： $P_N = U_N I_N$

电动机：轴上输出的机械功率： $P_N = U_N I_N \eta_N$

额定电压 U_N (V)

电机出线端电压

额定电流 I_N (A)

电机出线端电流

额定转速 n_N (r/min)

额定运行时的转速



例题 3-1 一台直流发电机，其额定功率 $P_N=145\text{kW}$ ，额定电压 $U_N=220\text{V}$ ，额定转速 $n_N=1450\text{r/min}$ ，额定效率 $\eta_N=90\%$ ，求该发电机的输入功率 P_1 及额定电流 I_N 为多少？

解：额定输入功率 P_1 ：

$$P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{145}{0.9} = 161 \text{ kW}$$

额定电流 I_N ：

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{145 \times 10^3}{220} = 630.4 \text{ A}$$



例题 3-2 一台直流电动机，其额定功率 $P_N=160\text{kW}$ ，额定电压 $U_N=220\text{V}$ ，额定转速 $n_N=1500\text{r/min}$ ，额定效率 $\eta_N=90\%$ ，求该电动机的输入功率 P_1 及额定电流 I_N 及额定输出转矩 T_{2N} 各是多少？：

解：额定输入功率 P_1 ：

$$P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{160}{0.9} = 177.8 \text{ kW}$$

额定电流 I_N ：

$$I_N = \frac{P_1}{U_N} = \frac{177.8 \times 10^3}{220} = 808.1 \text{ A}$$

$$\text{或, } I_N = \frac{P_N}{\eta_N U_N} = \frac{160 \times 10^3}{0.9 \times 220} = 808.1 \text{ A}$$

额定输出转矩 T_{2N} ：

$$T_{2N} = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{P_N}{\frac{2\pi n_N}{60}} = 9.55 \frac{P_N}{n_N} = 9.55 \times \frac{160 \times 10^3}{1500} = 1018.7 \text{ N} \cdot \text{m}$$



- 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



三. 直流电机的磁路、空载时的气隙磁密与空载磁化特性

本节学习要点：

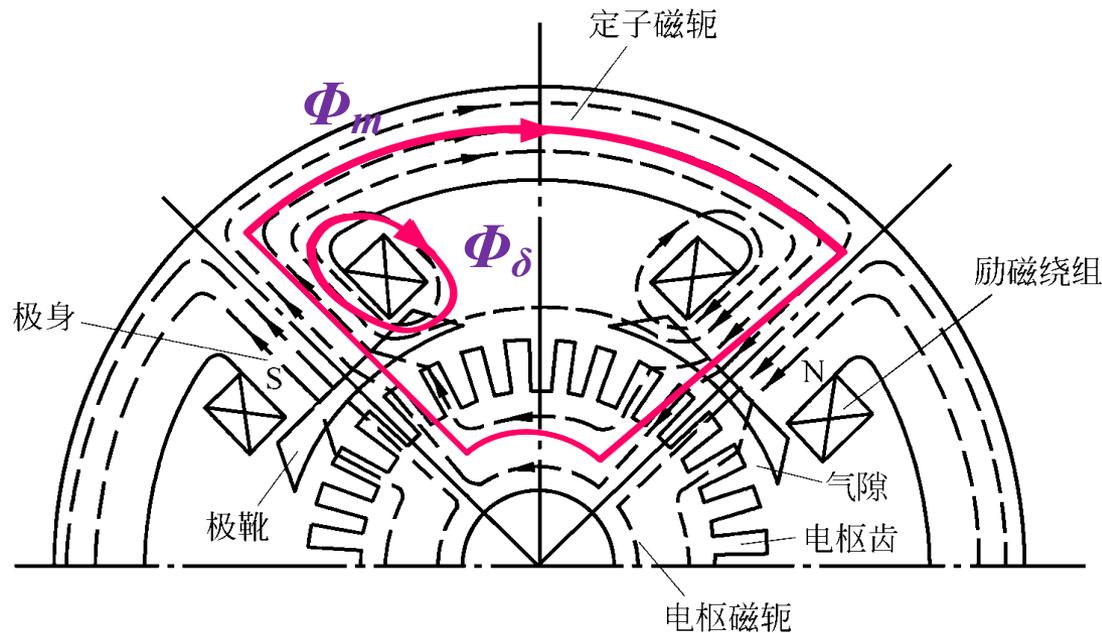
1. 掌握直流电机磁路基本概念
2. 掌握直流电机**空载时**的气隙磁通密度分布特点
3. 掌握直流电机**空载磁化特性**
4. 直流电机的**励磁方式**

1. 直流电机的磁路

主磁路

Φ_m

气隙
电枢齿
电枢轭
主极铁心
定子轭



四极直流电机空载时的磁场示意图

主磁路

从主极经气隙到电枢，因而同时与励磁绕组及电枢绕组交链，构成机电能量转换的耦合场。

漏磁路

Φ_δ

通过主极间的空气闭合，仅与定子匝链，不交链电枢绕组，不在电枢绕组中感应电势和产生电磁转矩。但会增加主磁路的饱和程度。

2. 空载时气隙磁通密度的分布波形

空 载

G: 出线端无电流输出

$\rightarrow I_a \approx 0$ 或很小, 可忽略。

M: 轴端不带负载

空载磁场

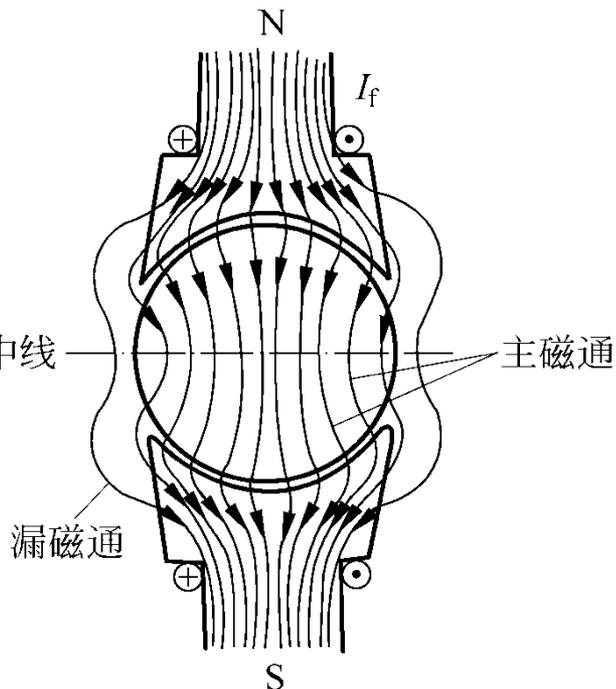
仅由励磁磁动势单独建立, 又称 **励磁磁场**。

分布特点

主极极靴下: 气隙小, 磁场较强。

主极极靴外: 气隙大, 磁场较弱。

极间几何中心线: 磁场等于零。



气隙磁密分布波形

主磁路磁通 Φ' :

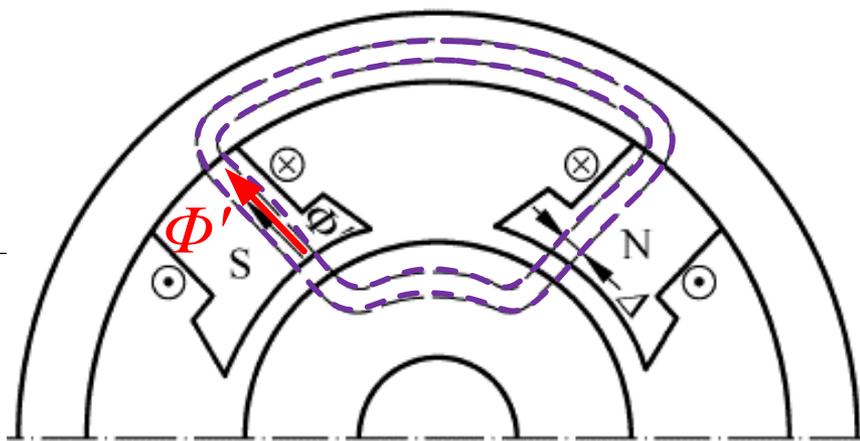
$$\Phi' = \frac{2F_f}{2R_{m\delta} + 2R_{mt} + R_{ma} + 2R_{mm} + R_{mf}}$$

式中： $2F_f = 2N_f I_f$

其中， $R_{m\delta}$ 、 R_{mt} 、 R_{ma} 、 R_{mm} 、 R_{mf} 分别为气隙、电枢齿、电枢轭、主磁极和定子轭等段的磁阻。

只考虑气隙磁阻， Φ' 可简化为：

$$\Phi' = \frac{2F_f}{2R_{m\delta}} = \frac{F_f}{R_{m\delta}} \quad (A)$$



直流电机的主磁路

磁管气隙段的磁阻为：

$$R_{m\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 \Delta l_i} \quad (B)$$

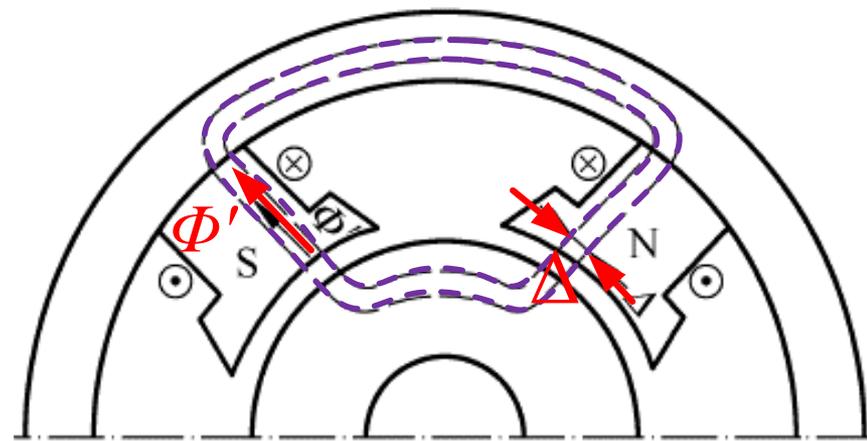
式中， δ 为气隙长度，
 Δ 为磁管宽度，
 l_i 为电枢轴向有效长度。

气隙处的磁密 B_x ：

$$B_x = \frac{\Phi'}{\Delta l_i} = \frac{F_f}{\frac{\delta}{\mu_0 \Delta l_i} \Delta l_i} = \mu_0 \frac{F_f}{\delta}$$

由(A)和(B)两式得：

$$\Phi' = \frac{F_f}{\frac{\delta}{\mu_0 \Delta l_i}}$$



直流电机的主磁路

$$F_f = N_f I_f \rightarrow B_x \rightarrow \Phi_m \rightarrow$$

$$\Phi_m = f(F_f)$$

$$\Phi_m = f(I_f)$$

磁化曲线

3. 空载磁化特性

在实际电机中, Φ_0 随 F_f 或 I_f 的改变而改变, 称空载时 Φ_0 与 F_f (或 I_f) 的关系为 **电机的磁化曲线**。

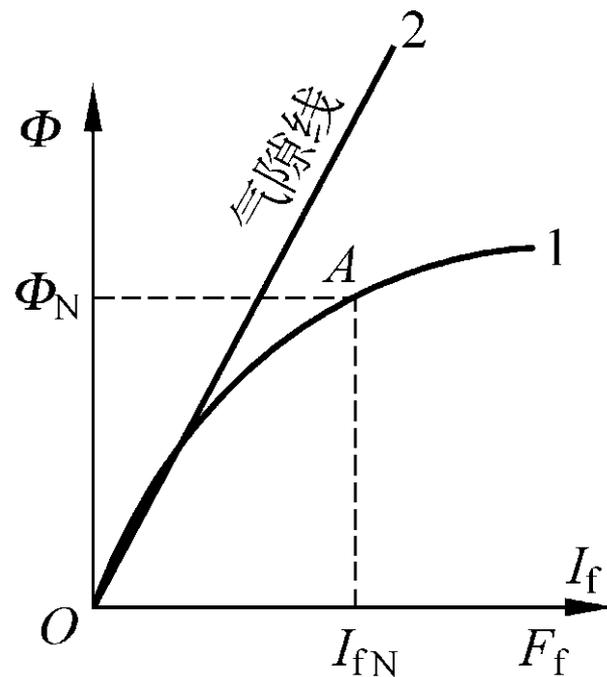
Φ_0 正比于 B
 F_f 正比于 H ➔ $B-H$ 曲线

$B=f(H)$

某种铁磁材料的磁化曲线, 有其固定的值。

$\Phi_0=f(I_f)$

五段磁路串联而成, 各段材料及几何尺寸均不同, 磁化曲线各不相同。对不同的电机, 其磁化曲线亦不同。



直流电机空载磁化特性

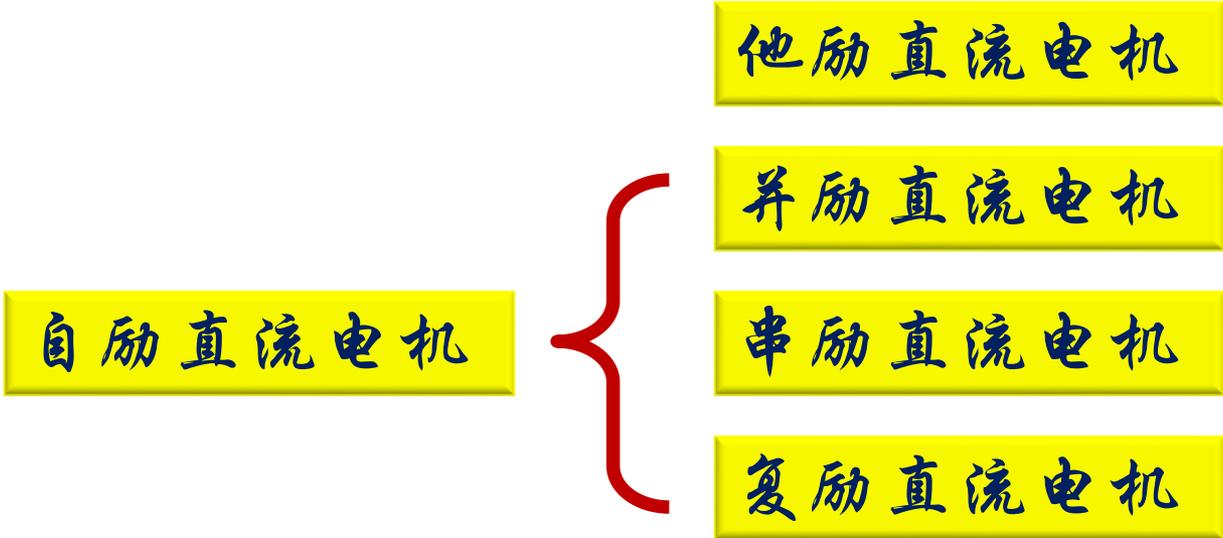
注意

直流电机空载磁化曲线仅与电机的尺寸及所用材料的性质有关, 而与**励磁方式无关**。



4. 直流电机的励磁方式

气隙磁场是实现机电能量转换的媒介，直流电机气隙磁场可以由永磁体建立，也可以在主磁极的励磁绕组中通以直流电流建立，此电流称励磁电流 I_f ，该励磁流的获得方式（励磁方式）不同，直流电机的运行性能亦有很大差别。



他励直流电机

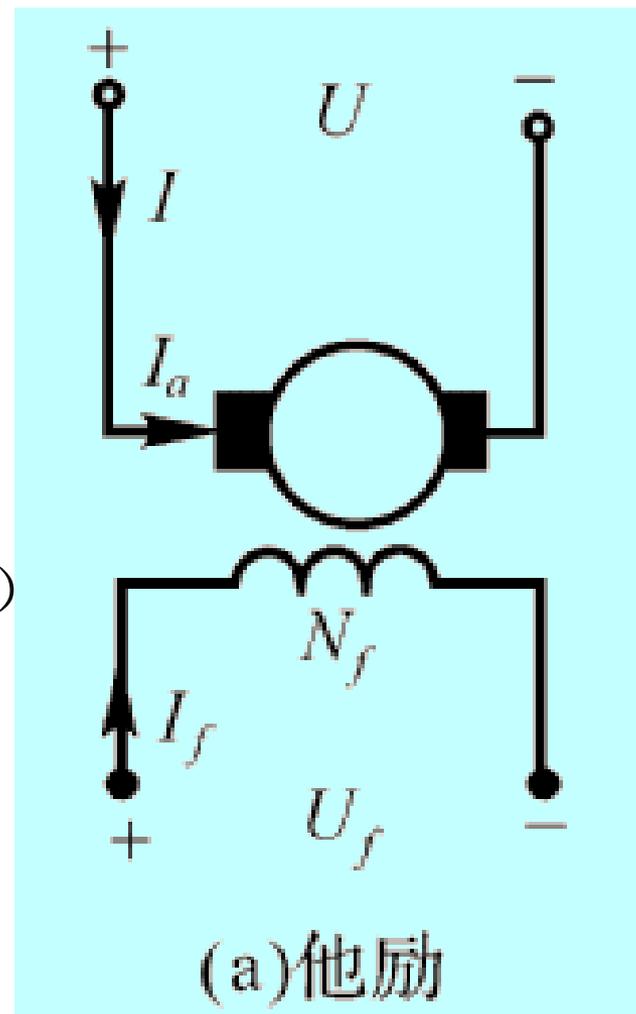
励磁回路和电枢回路分别用直流电源 U_f 和 U 供电。

电机出线端电流: $I = I_a$ (电枢电流)

励磁电流: $I_f = U_f / R_f$ (与 U 及 I_a 无关)

注意

永磁直流电机可看作他励

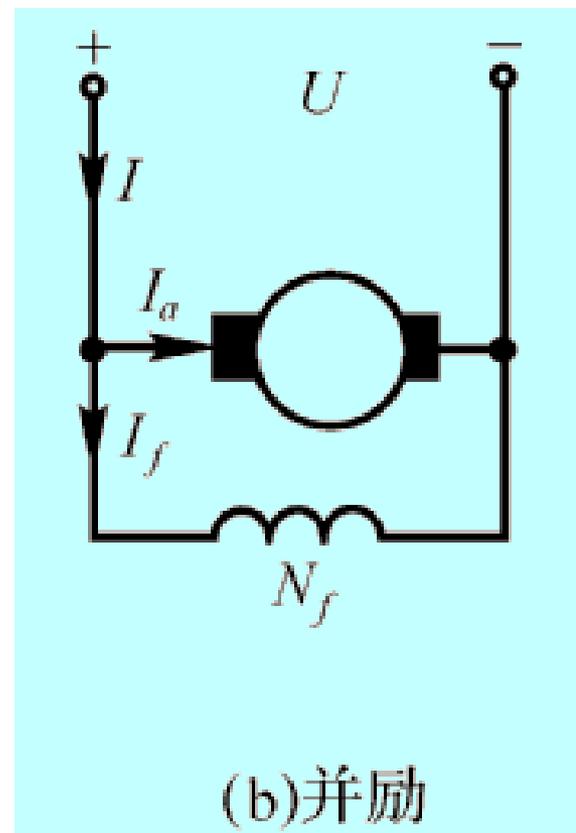


并励直流电机

励磁绕组和电枢绕组并联后用同一直流电源供电。

电机出线端电流： $I = I_a + I_f$

励磁电流： $I_f = U_f / R_f$

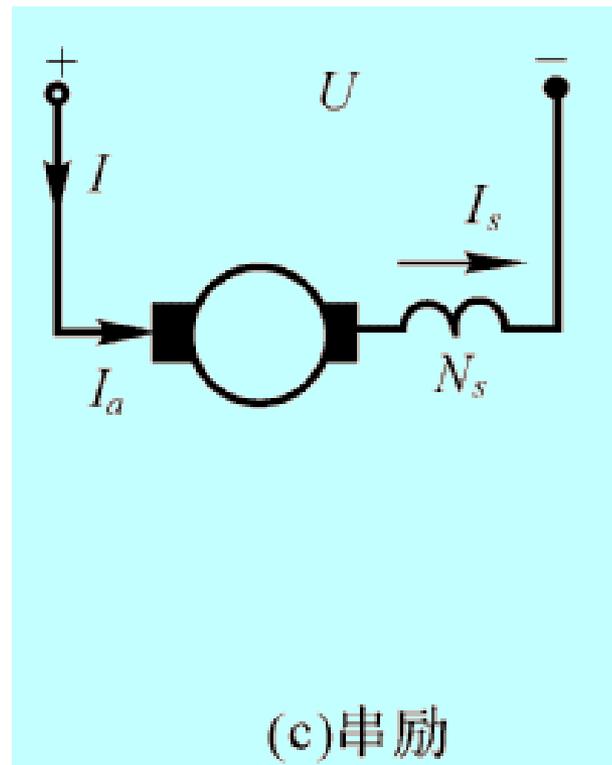


串励直流电机

励磁绕组和电枢绕组串并联后
用同一直流电源供电。

电机出线端电流 = 电枢电流 = 励磁电流

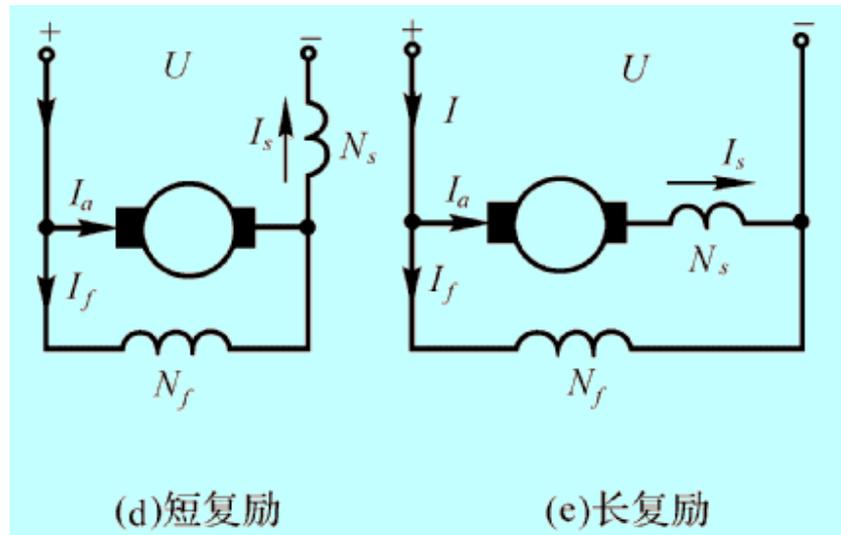
$$I = I_a = I_f$$



复励直流电机

主磁极有两套励磁绕组：

- 一套与电枢绕组并联，称并励绕组 N_f
- 一套与电枢绕组串联，称串励绕组 N_s

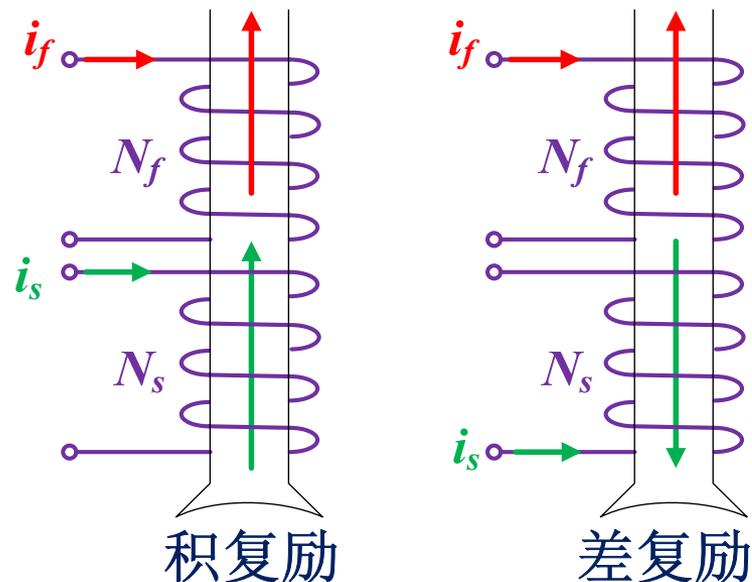


短复励: $I = I_a + I_f \quad I_s = I$

长复励: $I = I_a + I_f \quad I_s = I_a$

积复励: $\sum F = F_f + F_s$

差复励: $\sum F = F_f - F_s$





本章结束

作业：3.1