



第二章 直流电机

重点内容:

- (1) 直流电机的工作原理
- (2) 直流电机的基本概念
- (3) 电枢感应电势和电磁转矩
- (4) 基本方程

难点:

- (1) 电枢绕组及电路图
- (2) 电刷位置放置
- (3) 电枢反应

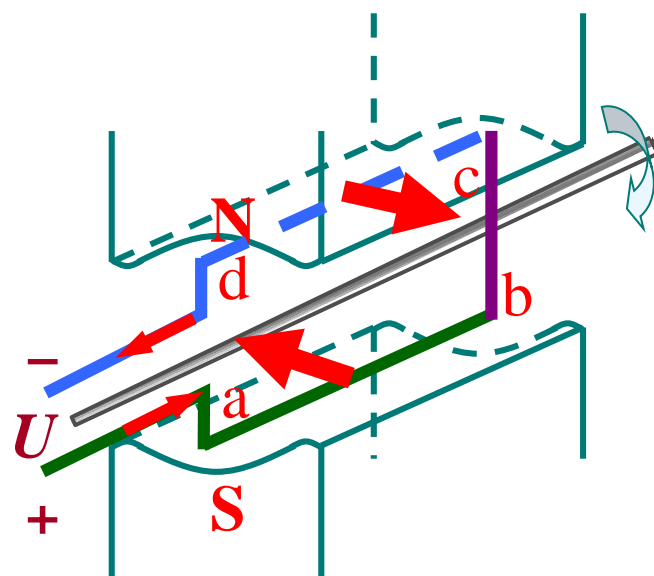
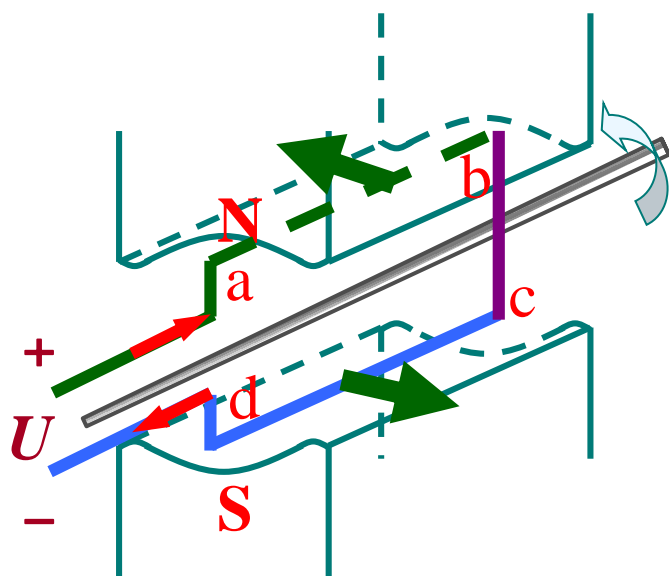


第二章 直流电机

- 3.1 直流电机的工作原理
- 3.2 直流电机的基本结构
- 3.3 直流电机的电枢反应
- 3.4 直流电机的电磁转矩和电动势
- 3.5 直流电动机的运行分析
- 3.6 直流电动机的功率和转矩
- 3.7 直流发电机的运行分析
- 3.8 直流发电机的功率和转矩



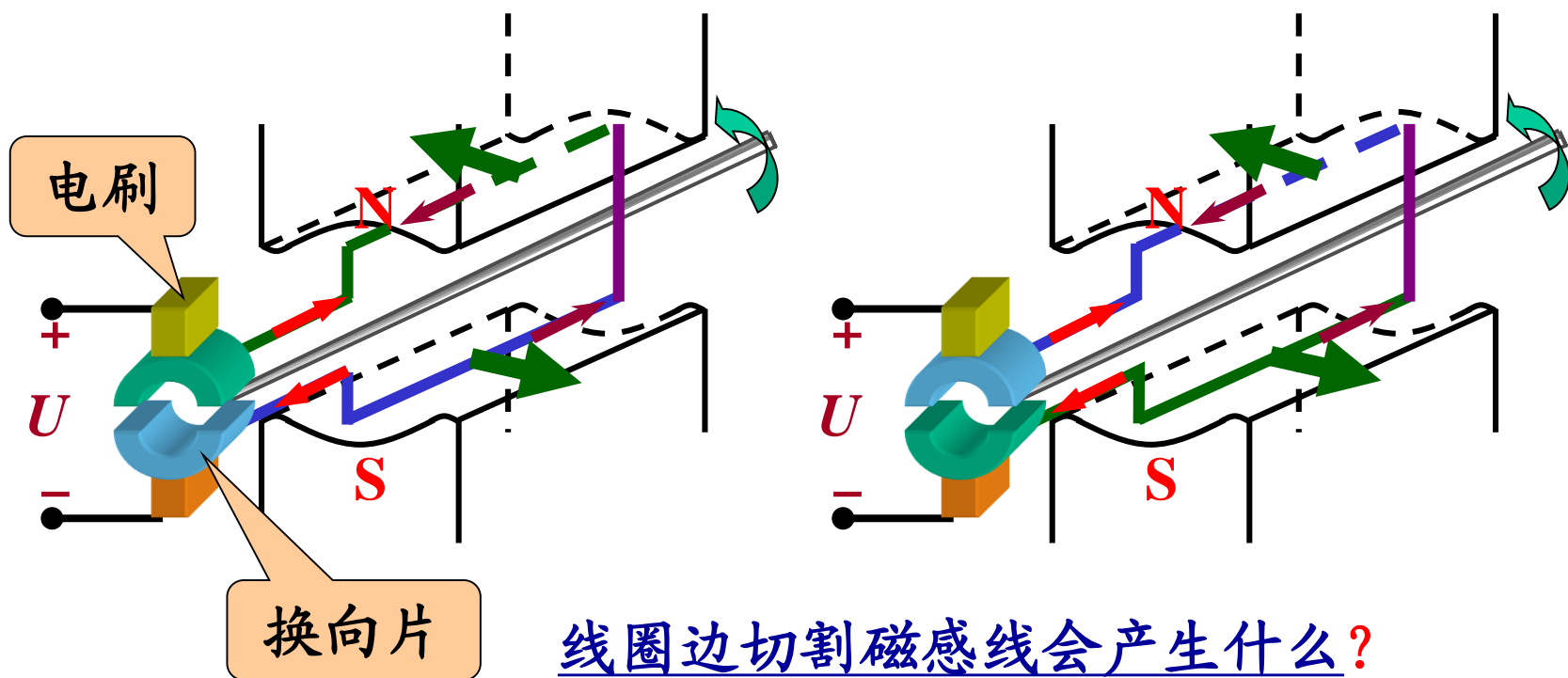
1. 直流电动机的工作原理





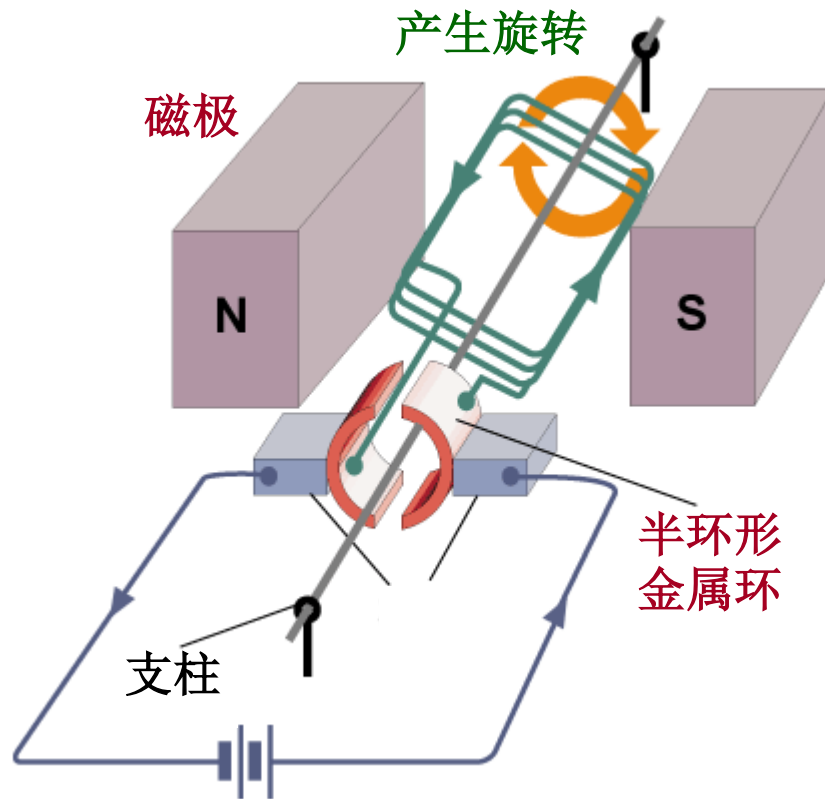
3.1 直流电机的工作原理及结构

1. 直流电动机的工作原理



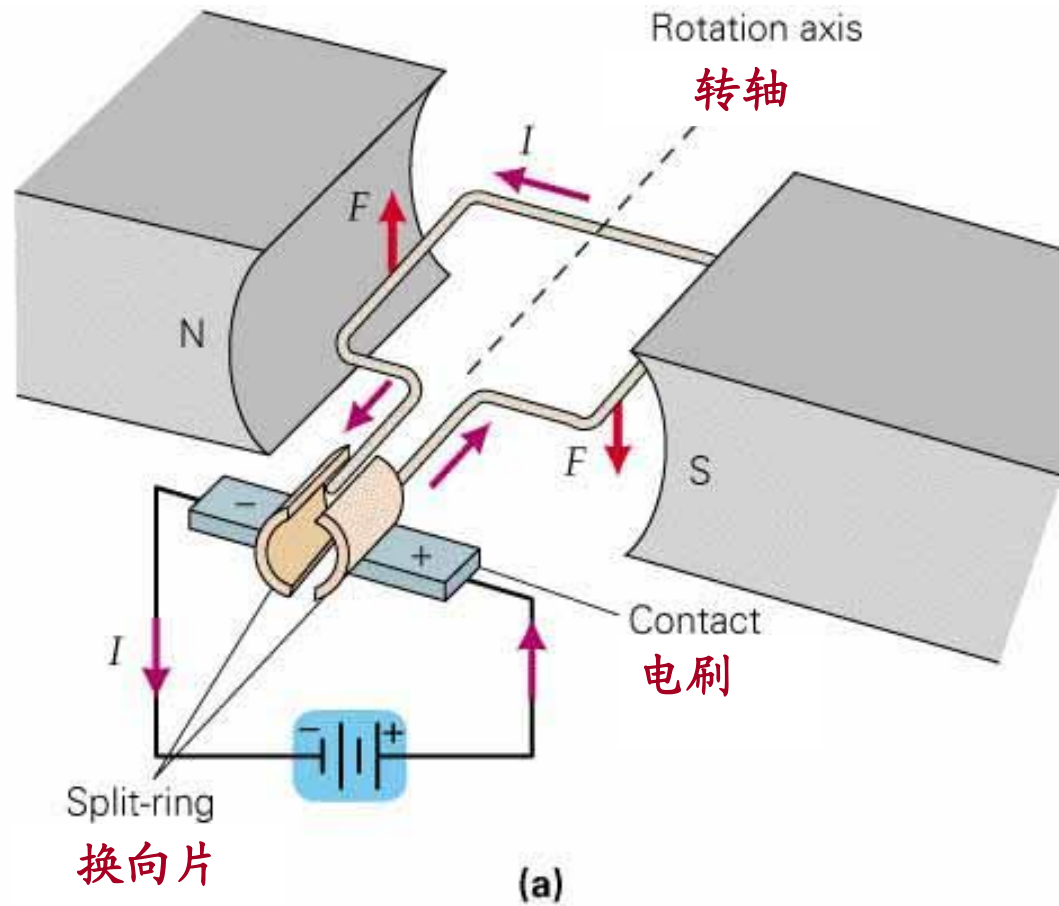


直流电机模型



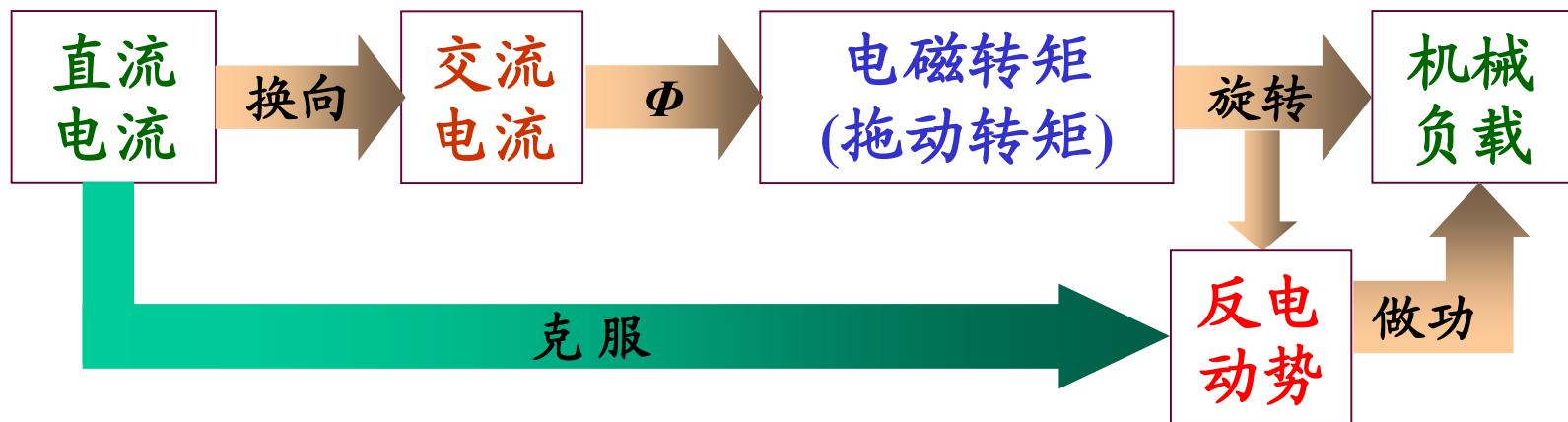


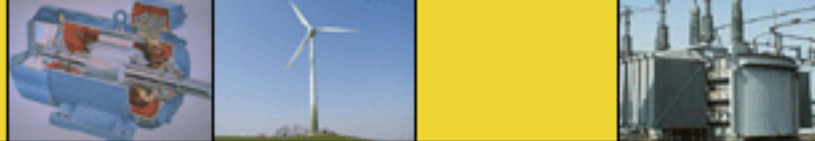
直流电机模型



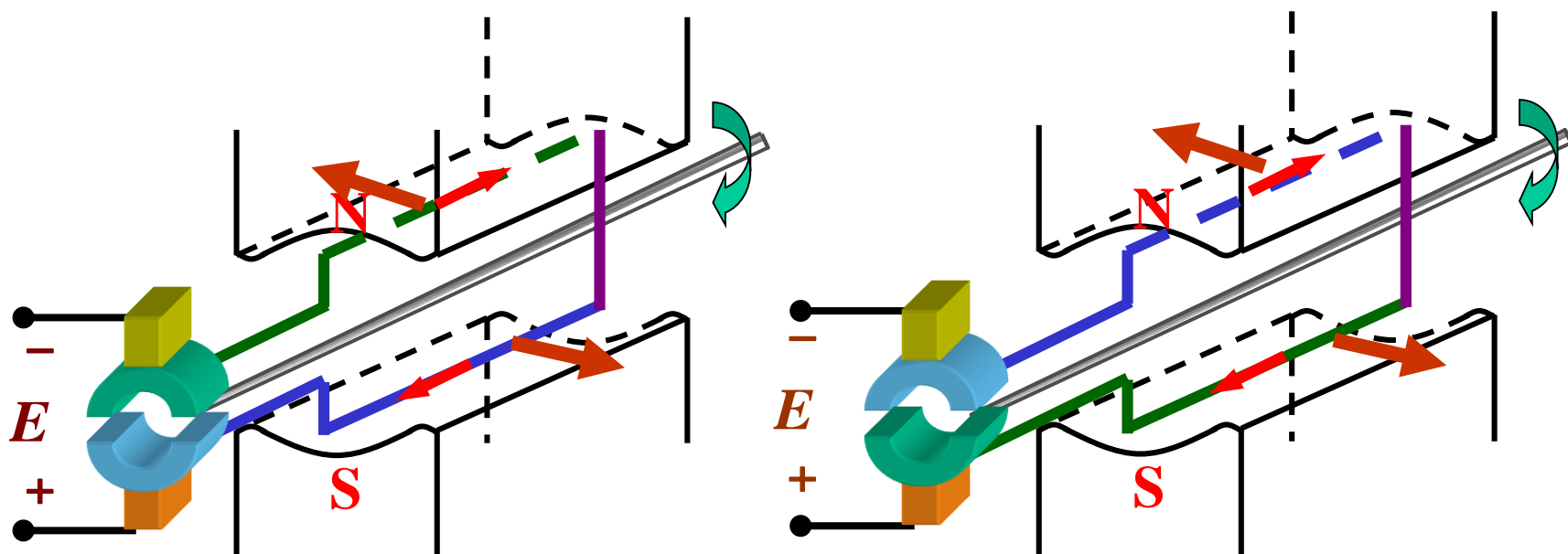


● 电磁关系

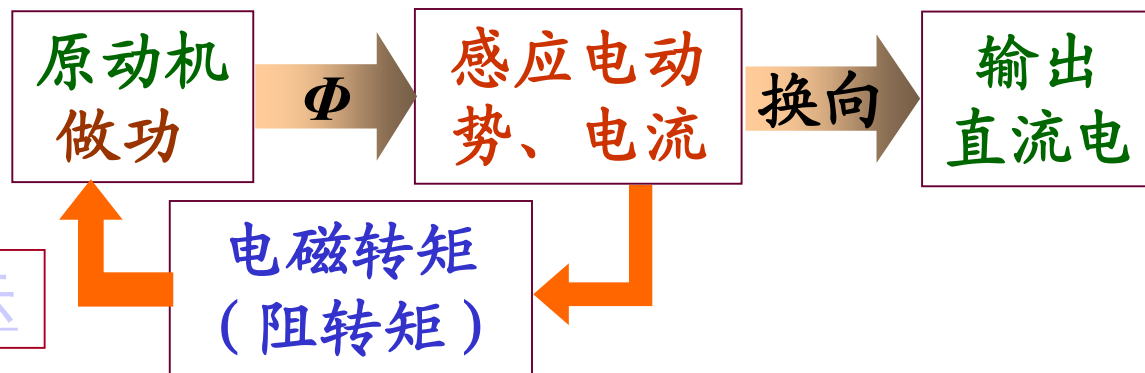




2. 直流发电机的工作原理



● 电磁关系



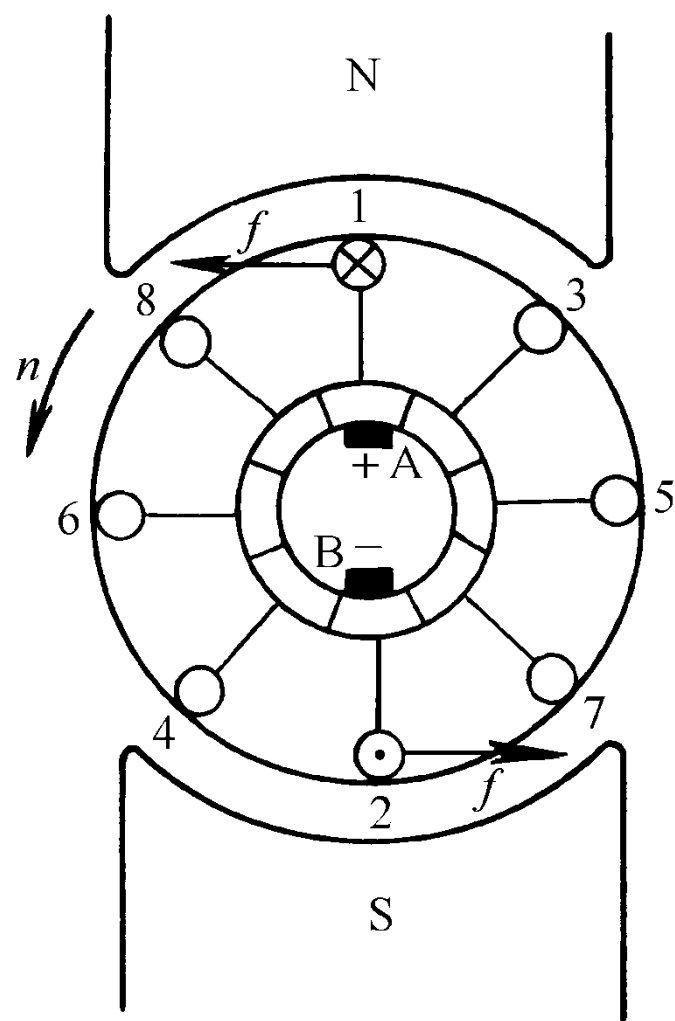
[发电机多媒体演示](#)



一、简单的绕组

右图只是说明原理的示意图。它的缺点是：随着电枢的转动，始终只有一个线圈有电流。这样的话，材料没有充分利用，产生的总转矩或电势均很小。

解决办法：用4个换向片将4个线圈都连接起来，成为一个闭合绕组，两个不同的元件边连接一个换向片。每个元件的两个元件边连接2个不同的换向片。共用了4个换向片，节省了材料，提高了输出转矩。

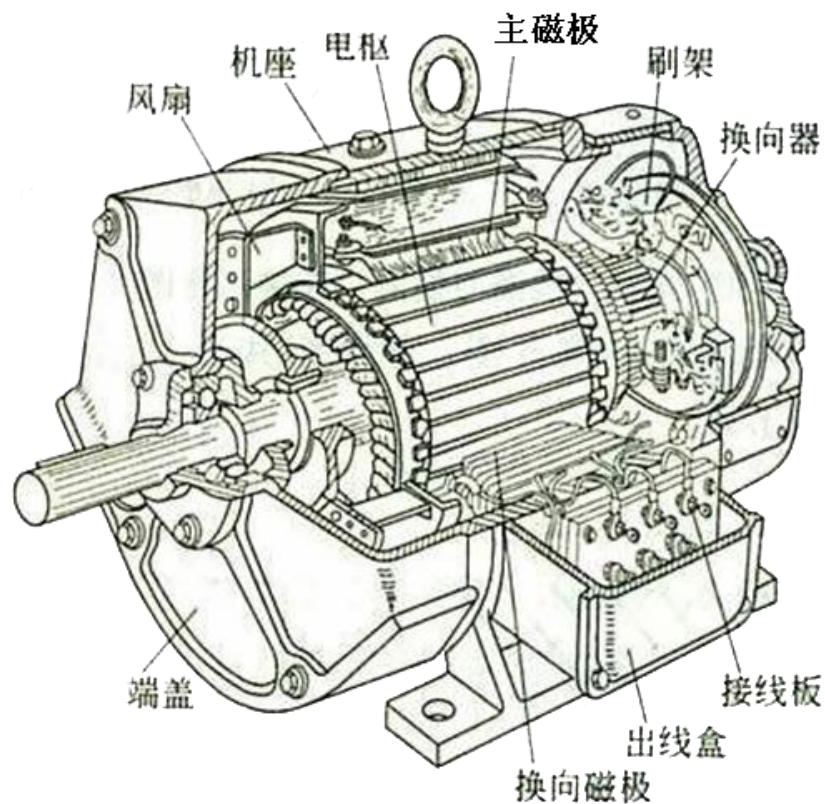


1-2、3-4、5-6、7-8
分别构成4个线圈

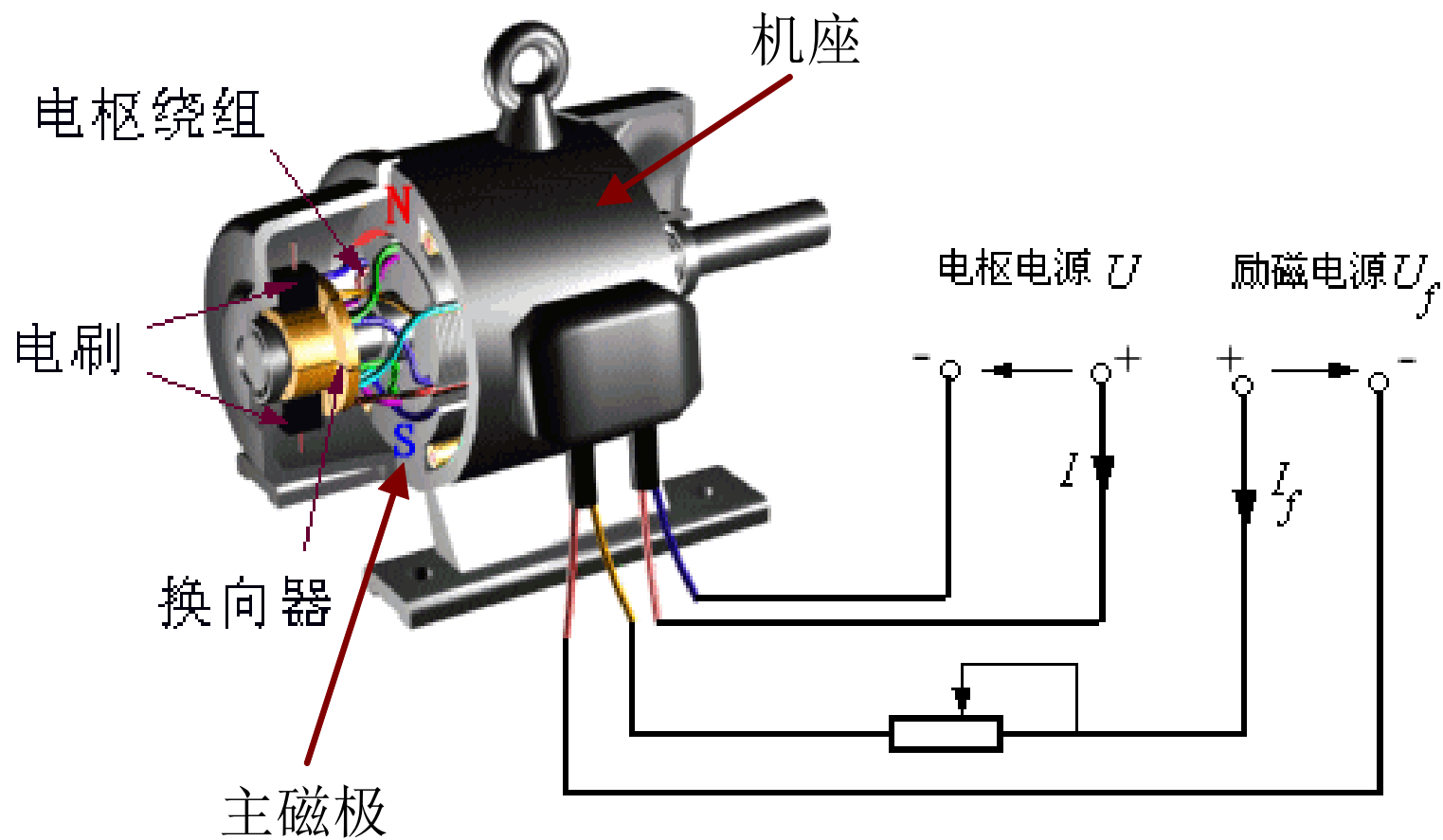


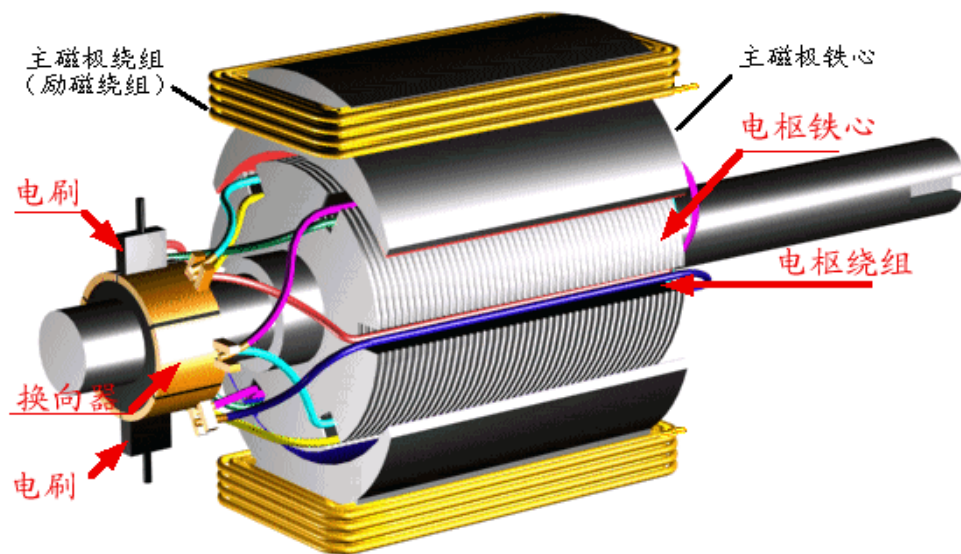
3. 直流电机的基本结构

● 直流电机的结构

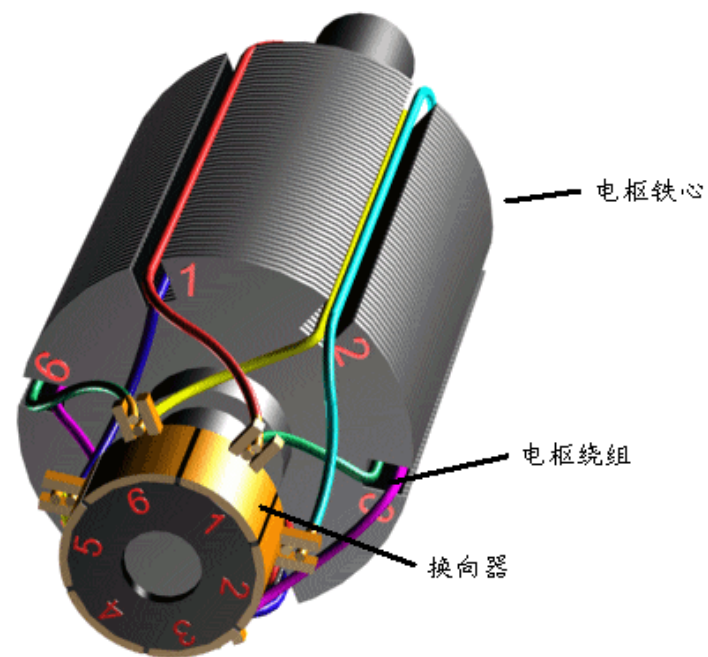


视频结构演示





(a) 整体结构

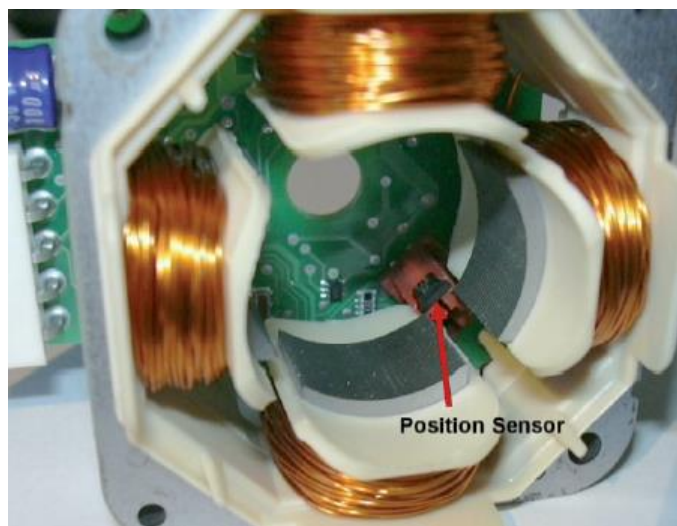
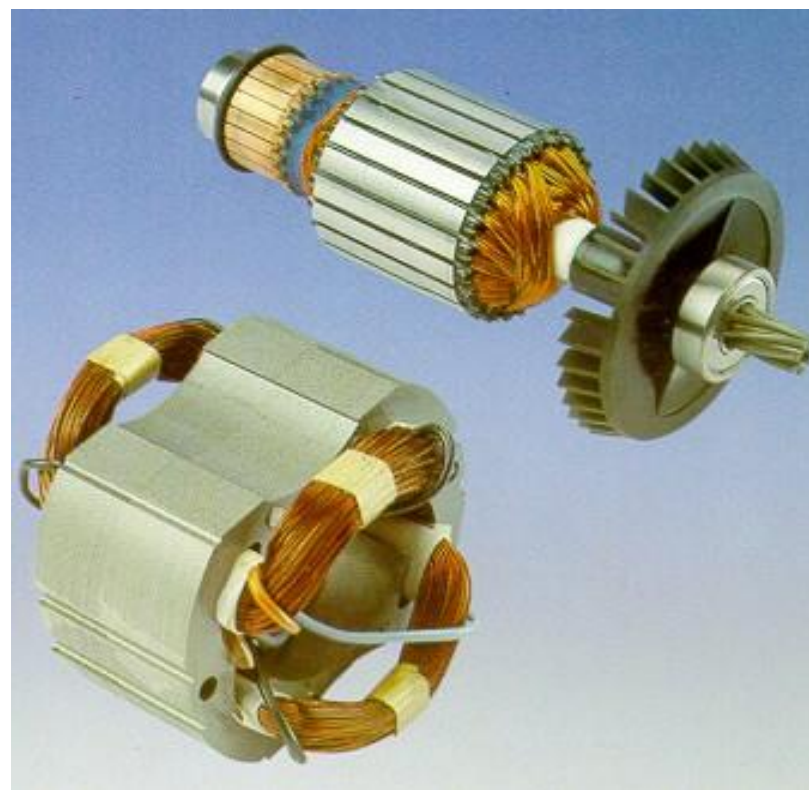


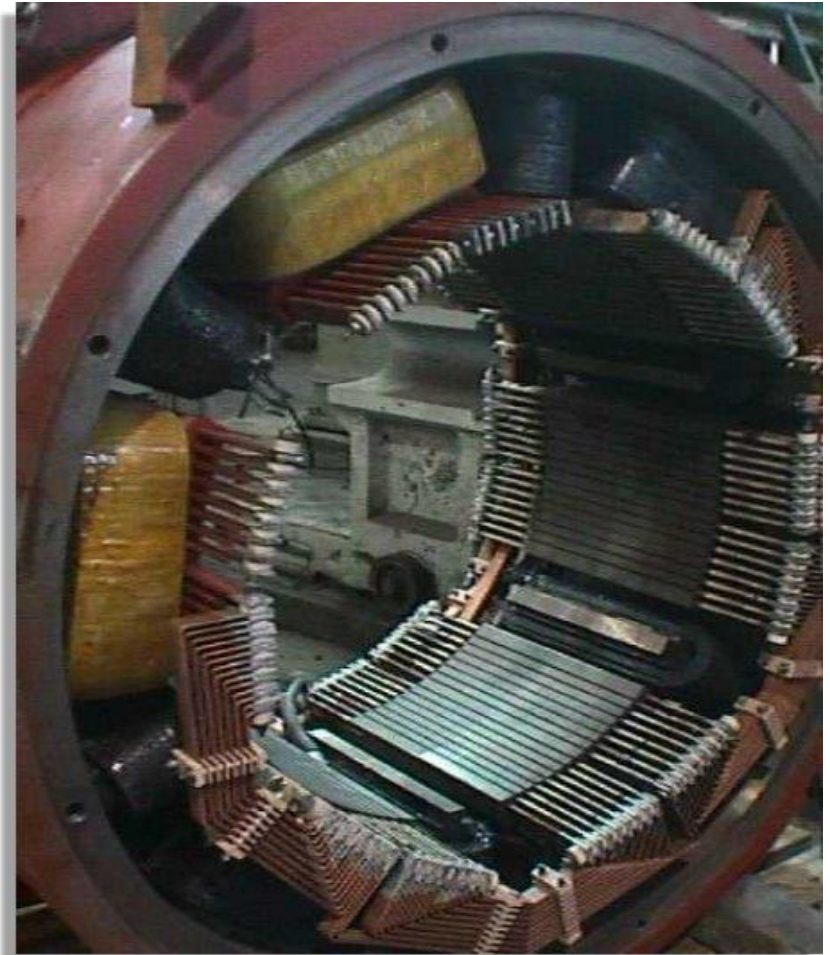
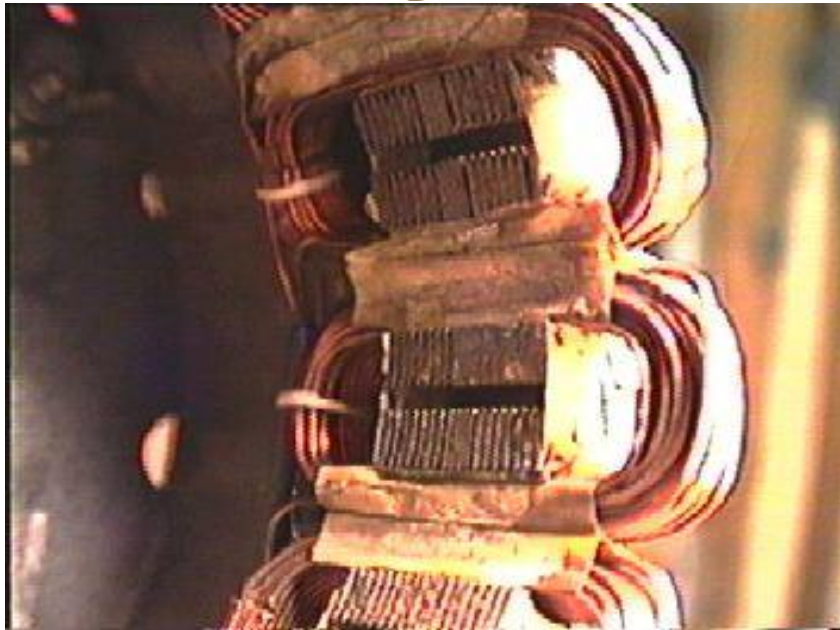
(b) 电枢结构



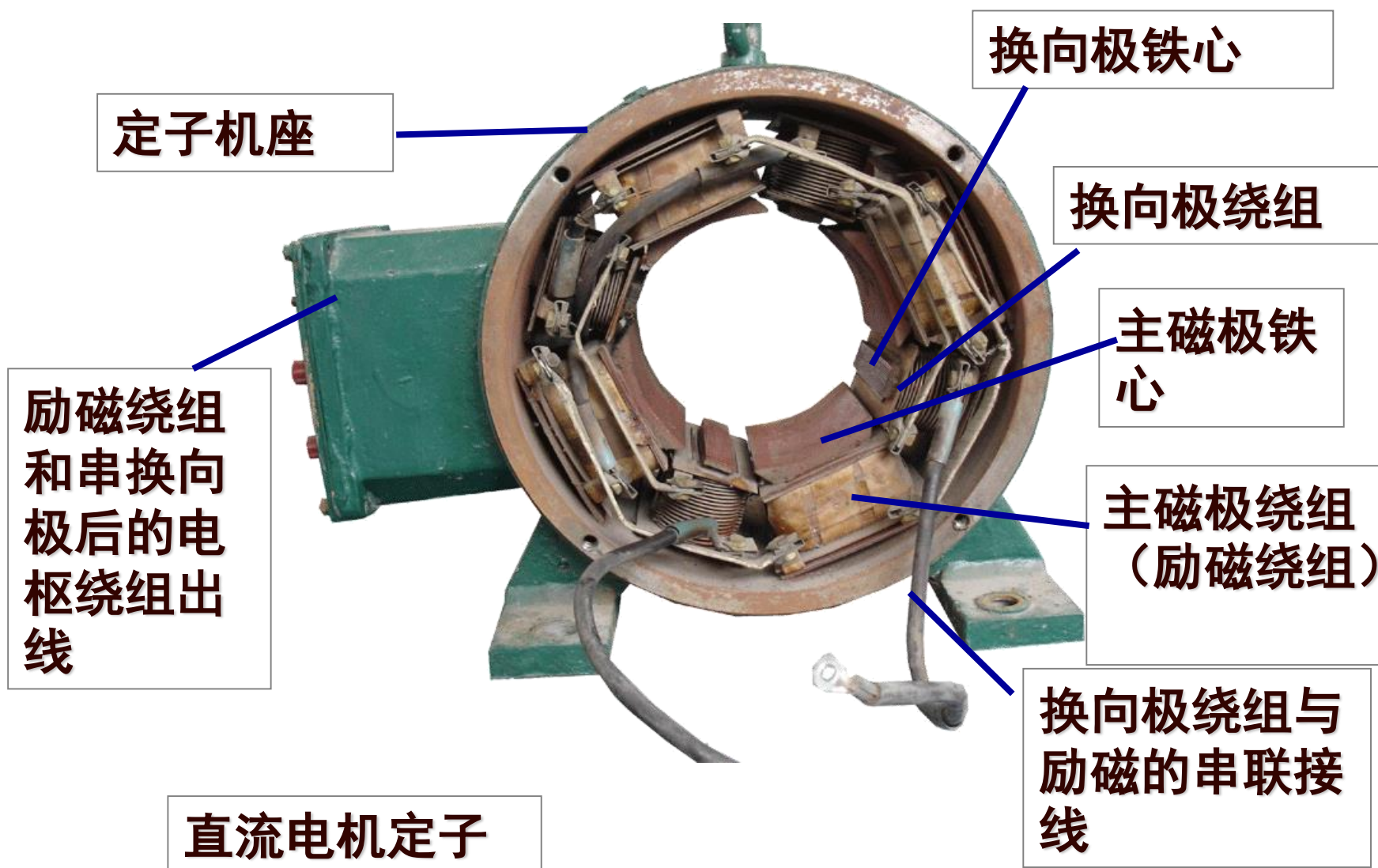
电机装配图

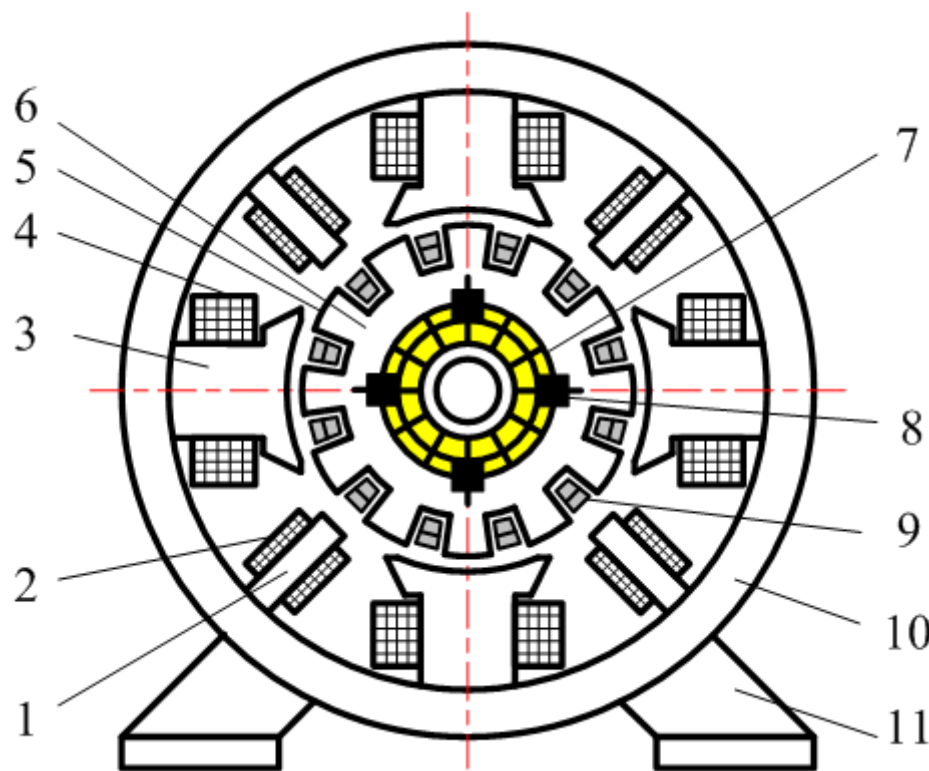
直流电机模型





直流电机的定子

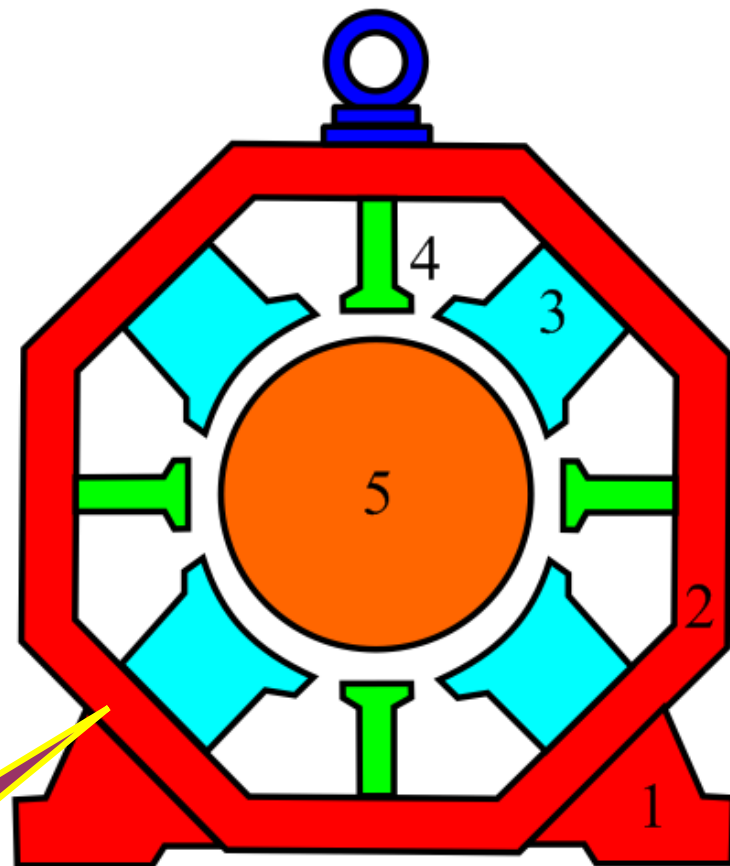




- 1—换向极铁心
- 2—换向极绕组
- 3—主极铁心
- 4—励磁绕组
- 5—电枢齿
- 6—电枢铁心
- 7—换向器
- 8—电刷
- 9—电枢绕组
- 10—机座
- 11—底脚



- ◆ 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 $2p$



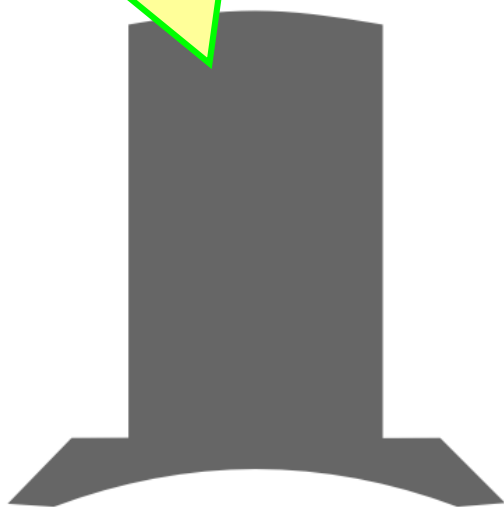
$p=2$
即4极电机

1-机座 2-磁轭 3-主极
4-换向极 5-电枢

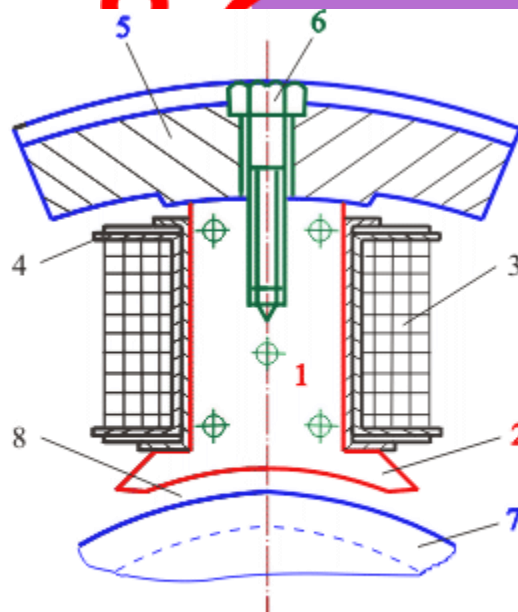


- 1) 主磁极
- 2) 励磁绕组

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

1-主极铁心 2-极靴 3-励磁绕组 4-绕组绝缘
5-机座 6-螺杆 7-电枢铁心 8-气隙

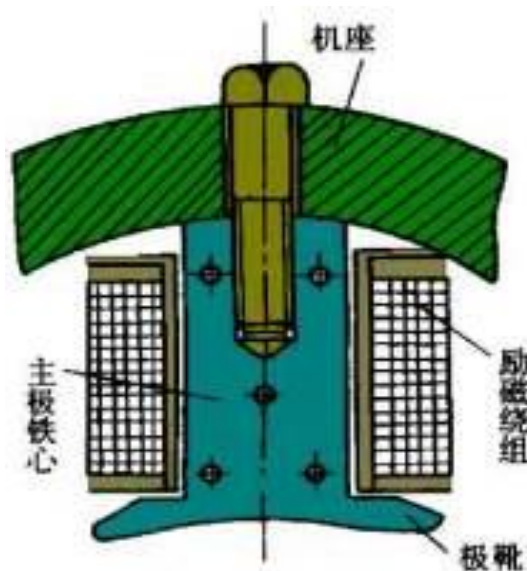
主磁极由钢板
冲片叠压而成



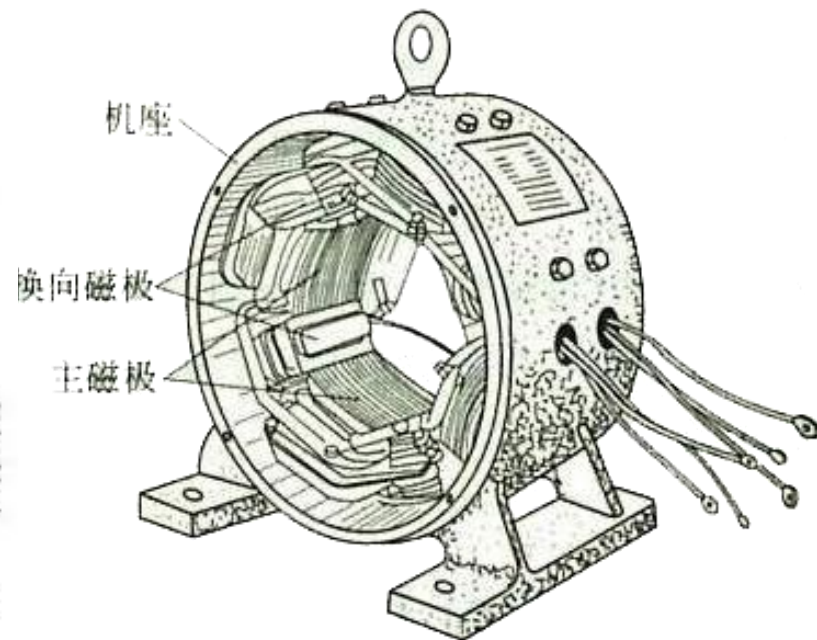
● 直流电机的主要部件

(1) 定子

- ① 主磁极
- ② 换向磁极
- ③ 机座
- ④ 端盖等



(a) 主磁极

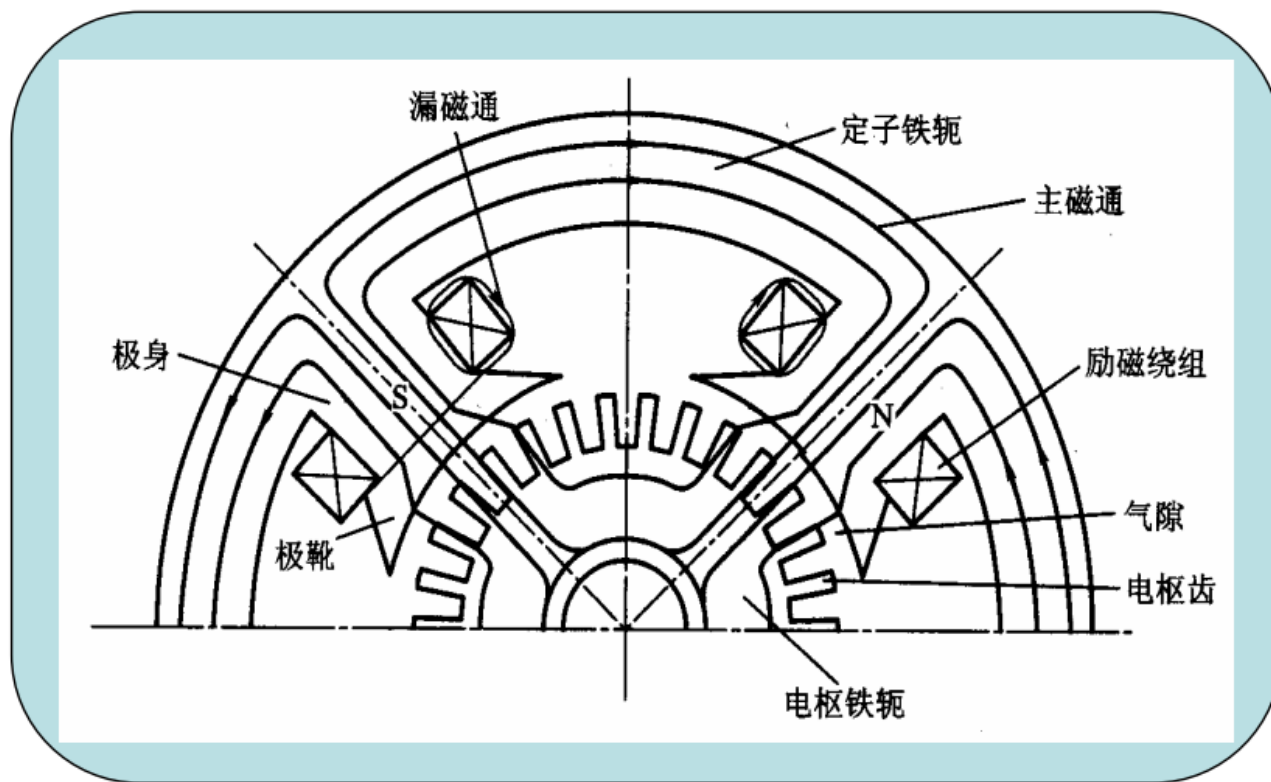


(b) 机座

直流电机的定子



磁场示意图：





●主磁极

作用：建立主磁场。

构成：主极铁心和套装在铁心上的励磁绕组。

●机座

作用：1、主磁路的一部分；
2、电机的结构框架。

构成：用厚钢板弯成筒形焊成或铸钢件制成。

●换向极

作用：改善换向。 构成：由铁心和绕组组成。



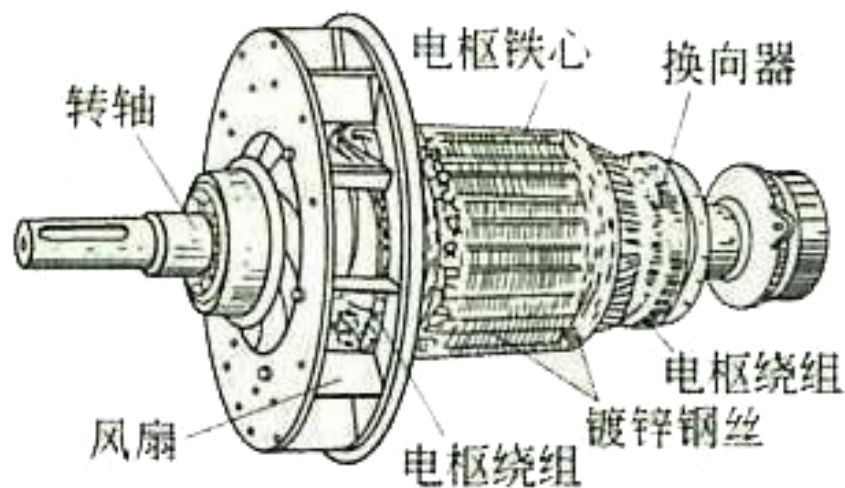
(2) 转子（电枢）

① 电枢铁心

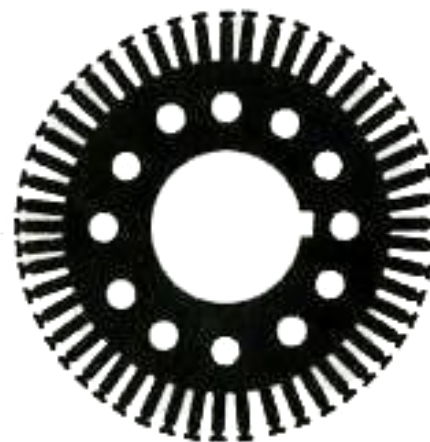
② 电枢绕组

③ 换向器

④ 转轴与风扇

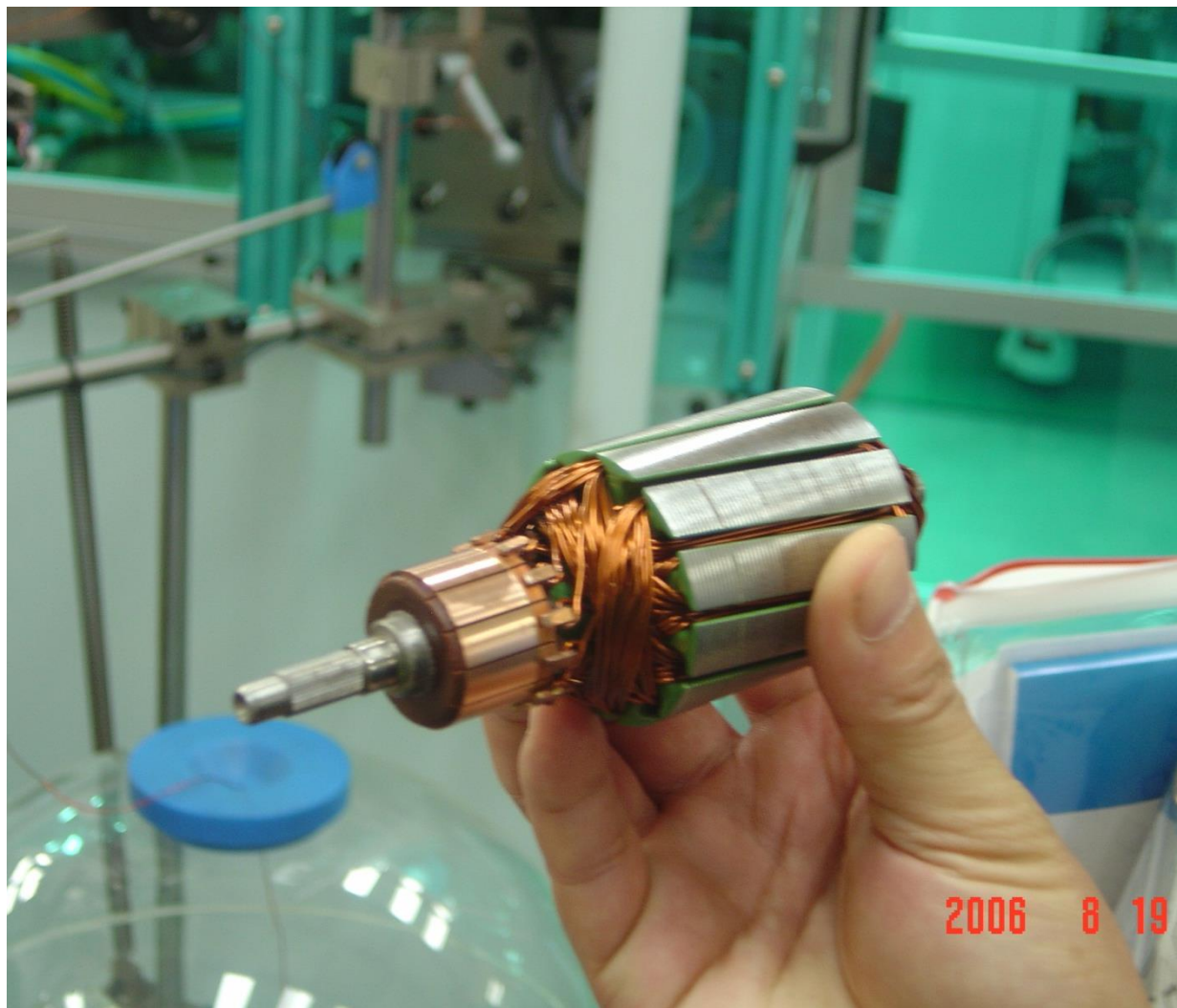


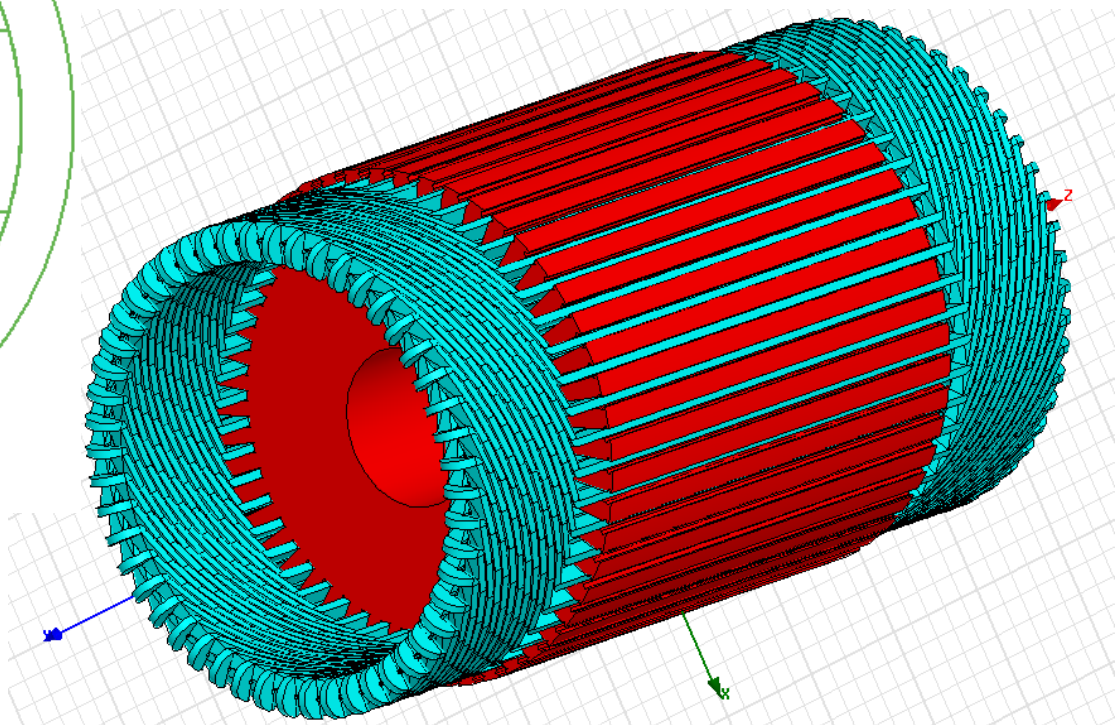
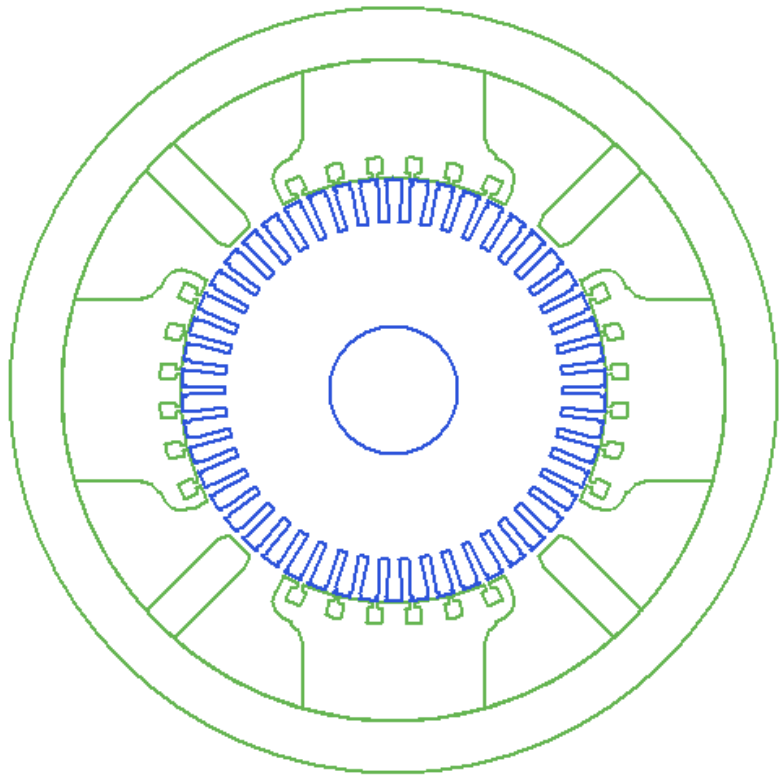
(a) 转子主体



(b) 电枢铁心冲片

直流电机的转子







●电枢铁心

作用：1、主磁路的一部分；
2、电枢绕组的支撑部件。

构成：一般用厚0.5mm且冲有齿、槽的DR530
或DR510的硅钢片叠压夹紧而成。

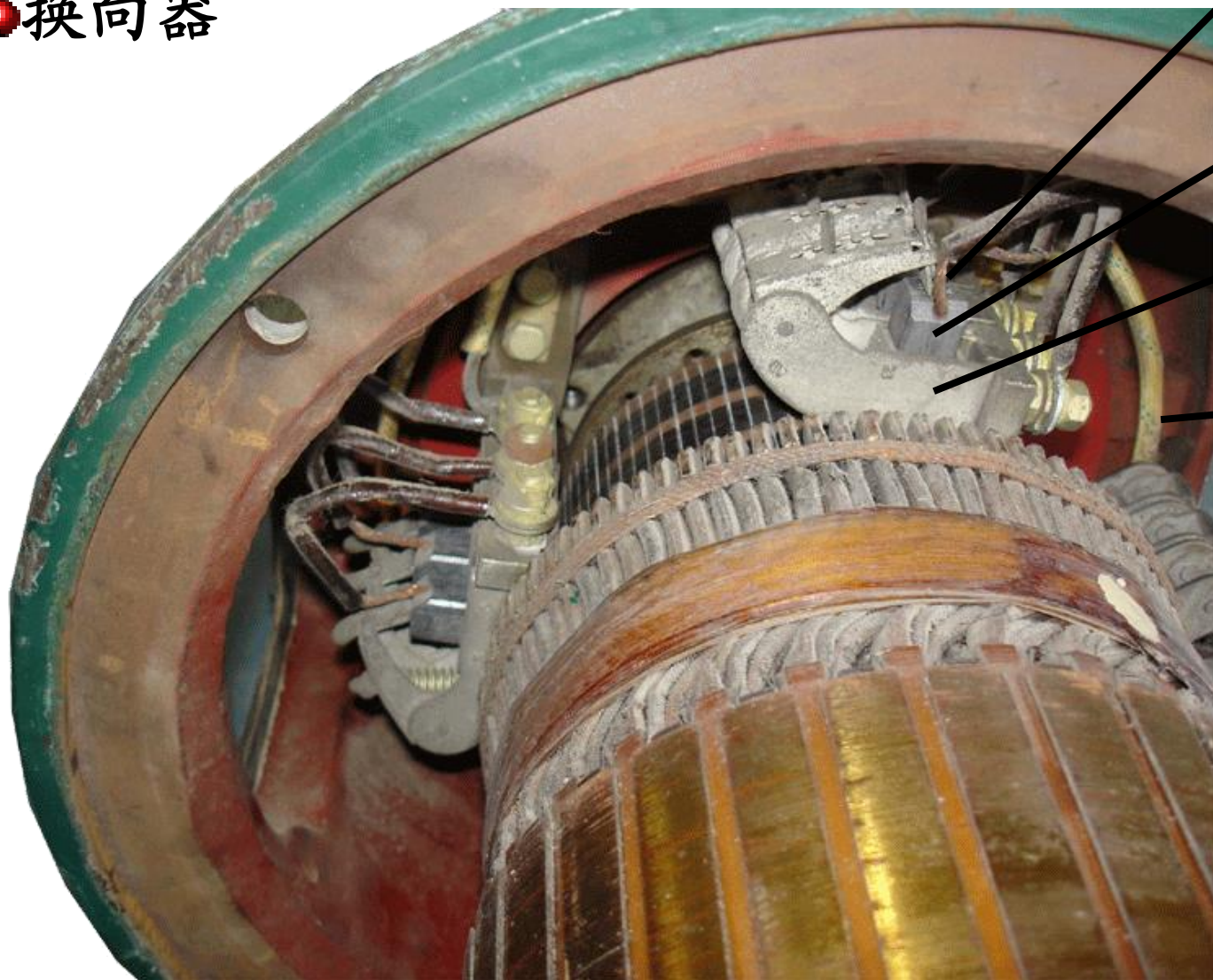
●电枢绕组

作用：直流电机的电路部分。

构成：用绝缘的圆形或矩形截面的导线绕成，上下层及线圈与铁心间要妥善绝缘，并用槽楔压紧。



●换向器



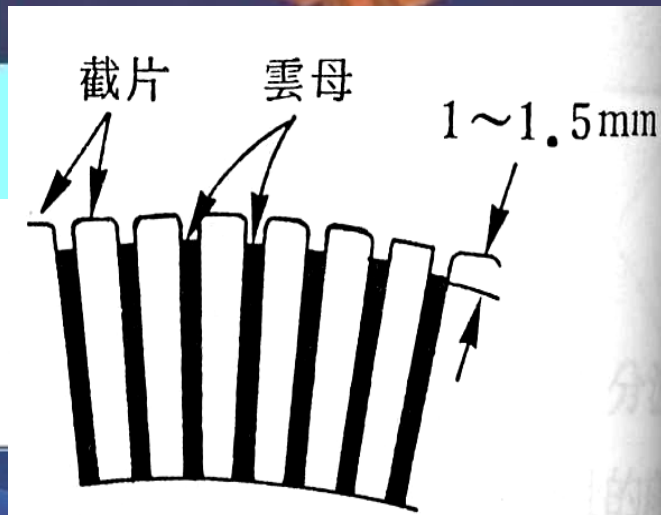
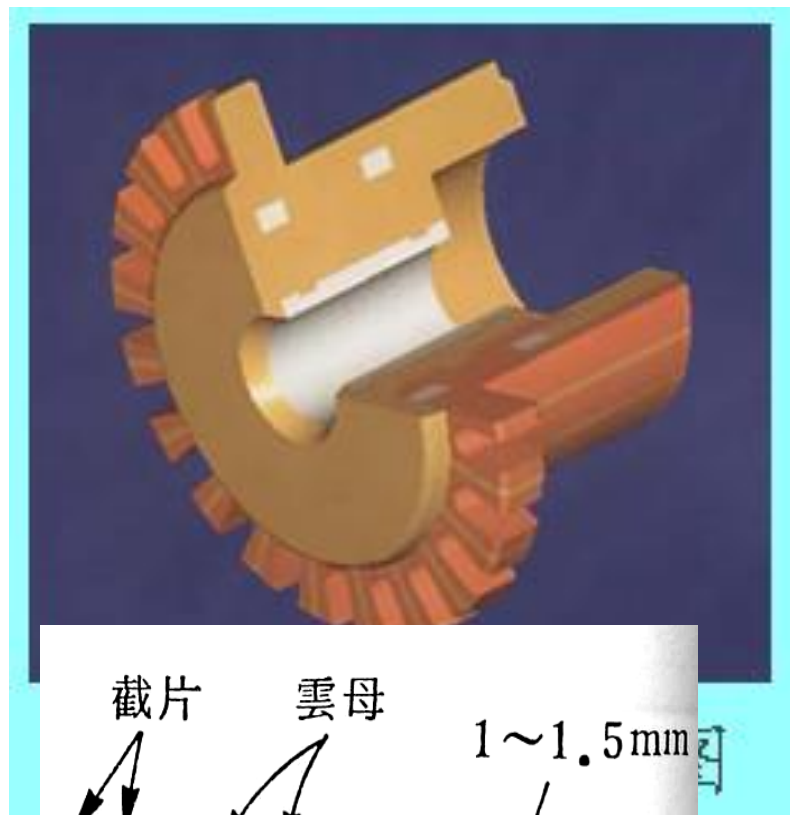
刷辫

电刷

刷握

汇流条

换向器与电刷相配合，实现整流、逆变作用，由许多彼此绝缘的铜换向片组成

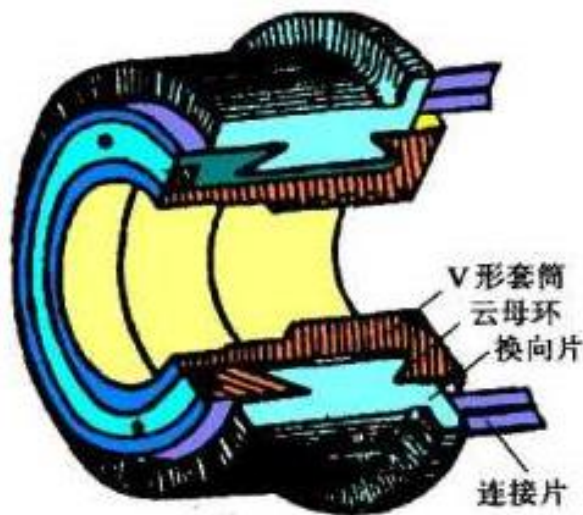




●换向器

作用：整流（发电机）或逆变（电动机）。

构成：由许多鸽形尾的换向片排列成一个圆筒，片间用V形云母绝缘，两端再用两个环形夹紧而构成。

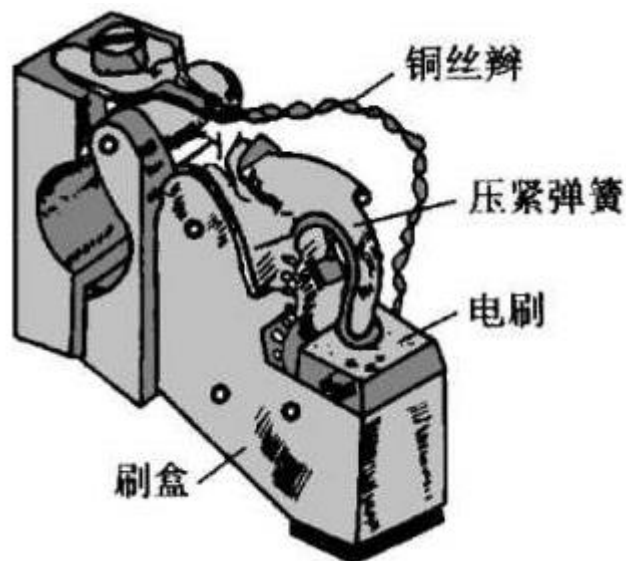




●电刷装置

作用：电枢电路的引出（或引入）装置。

构成：电刷、刷盒、刷杆和连线等。



电刷装置



3.2 直流电机的电枢绕组

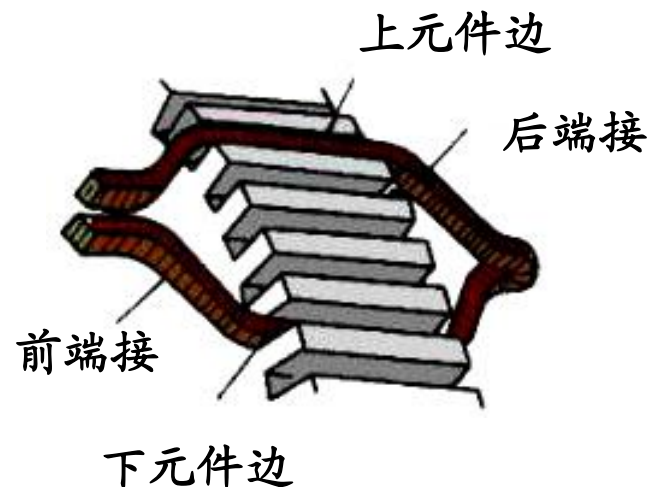
电枢绕组是电机能量转换的枢纽。

构成原则：产生足够的感生电势；允许一定的电流；

结构简单，运行可靠。

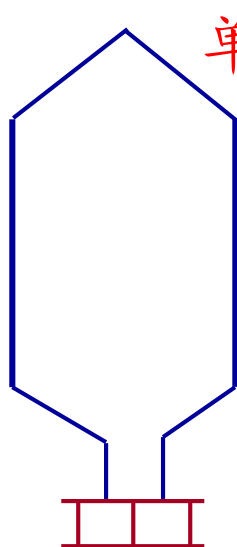
1、直流电枢绕组的构成

● 组成绕组的基本单元称为**元件**。
元件有**单匝的**，也有**多匝的**。一个元件由两个元件边和端接线组成。元件边置于槽内称为有效边，端接线置于铁心外，不切割磁场，仅起到连接作用。

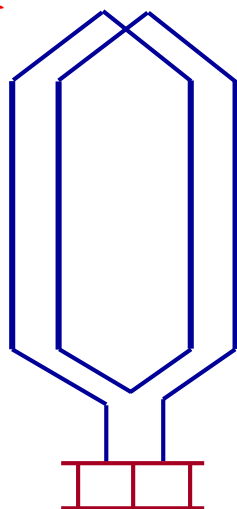




●元件的一条有效边放在槽的上部，另一条有效边放在另一槽底部，每一槽内有上层和下层两个元件边构成双层绕组。元件首尾按一定规律接到不同的换向器片上，最后使整个绕组通过换向片连接成一个闭合回路。

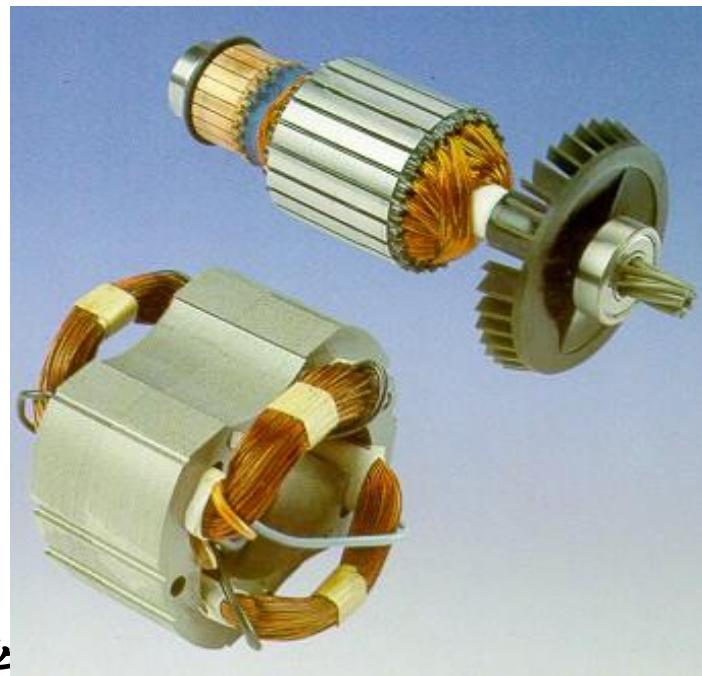


单匝元件



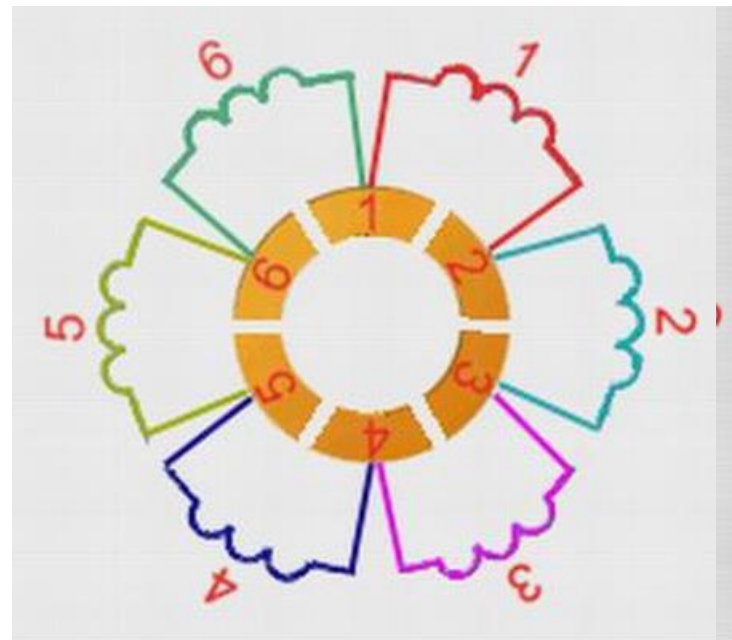
两匝元件

电枢绕组元件





●电枢绕组与换向片

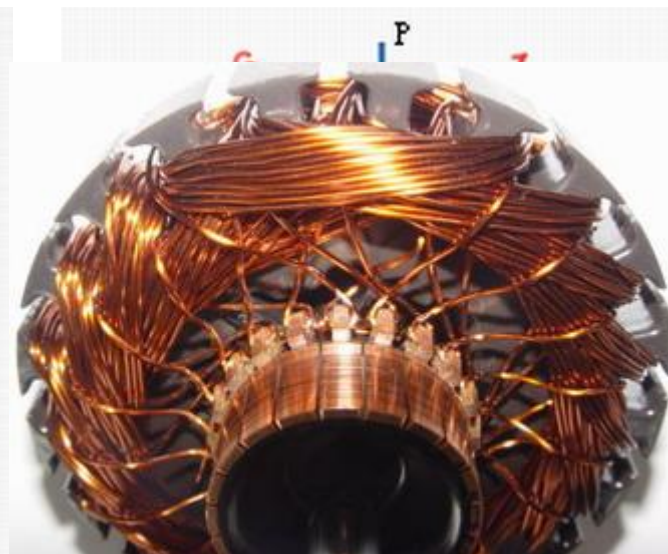
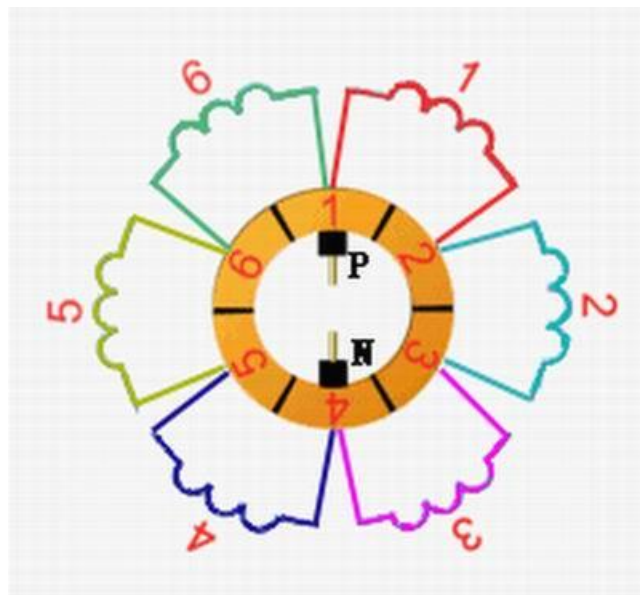


结论:

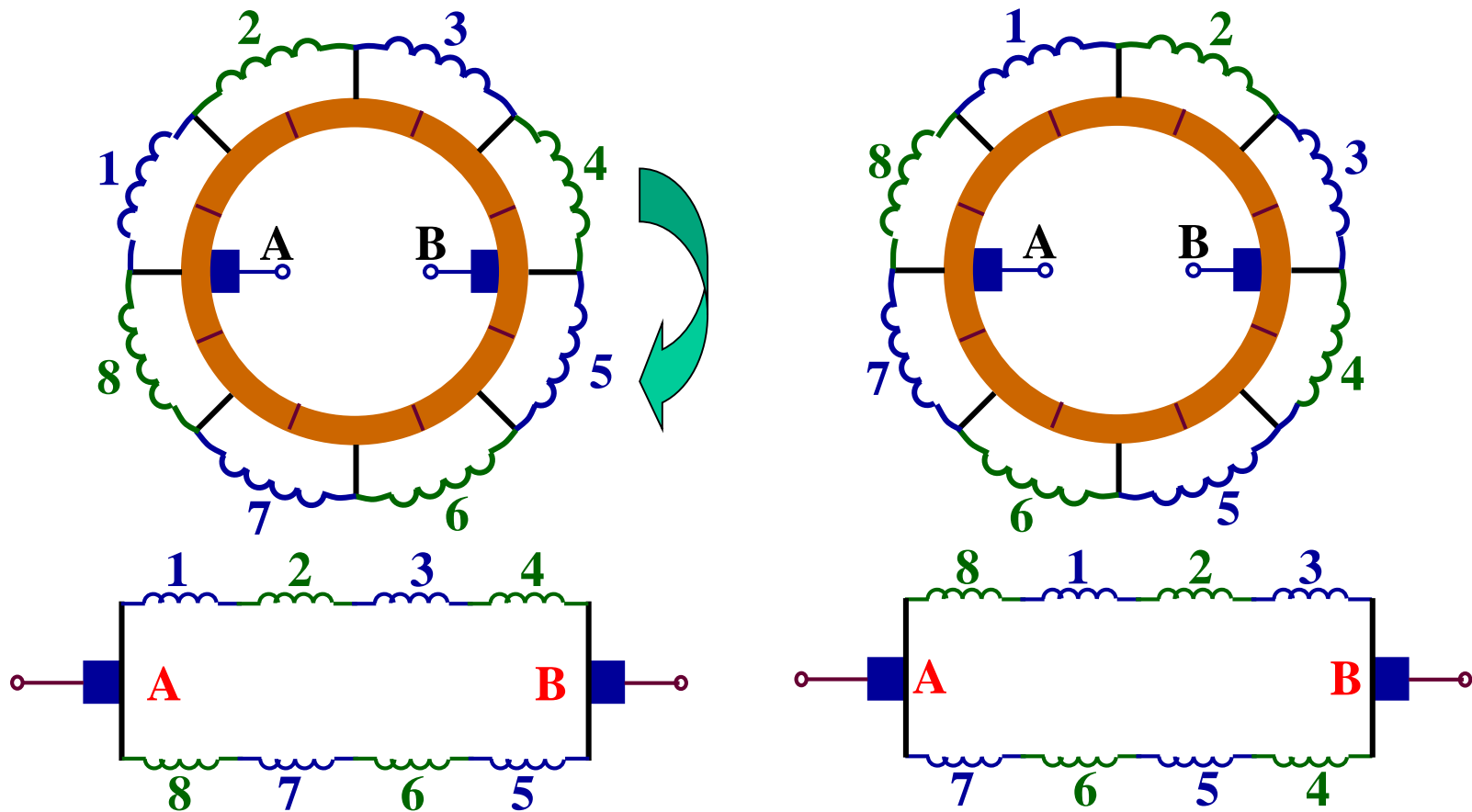
通过换向片，6个元件依次串连构成一个闭合回路



●电枢绕组与电刷连接



两个电刷位于换向器内圆对称位置(实际放置在外圆上)。
 位于对称位置的电刷将闭合的6个线圈分成两个并联支路。
 电刷将环形闭合电枢绕组分成两条对称的并联支路。



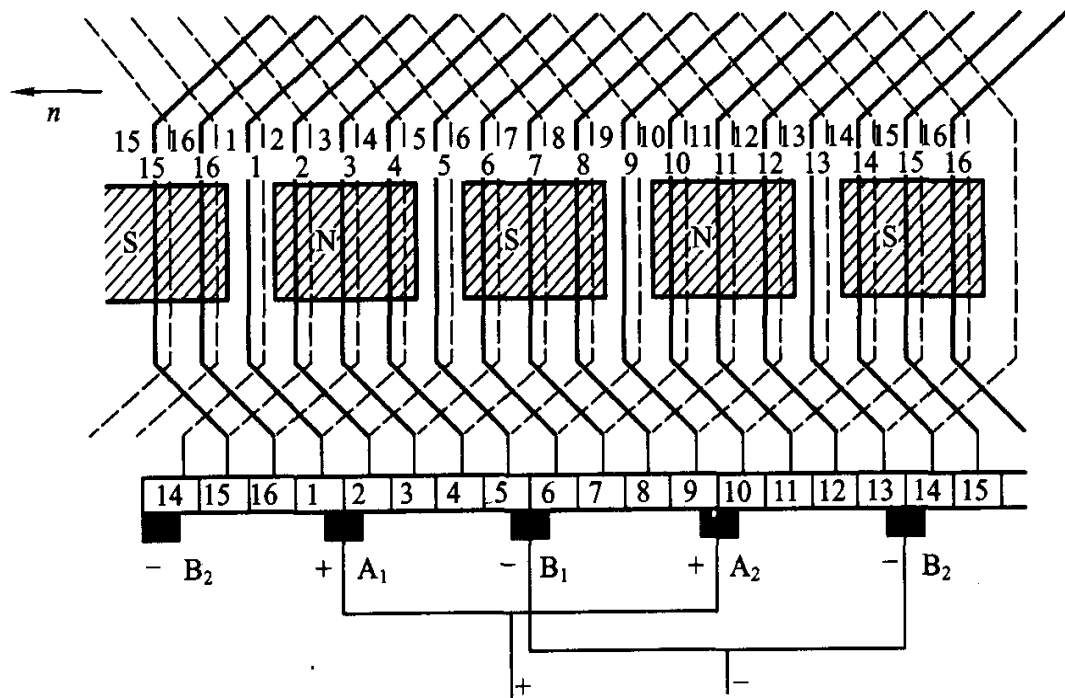
结论： 整个电枢绕组通过换向片连成一个闭合回路。



3、直流电枢绕组展开图

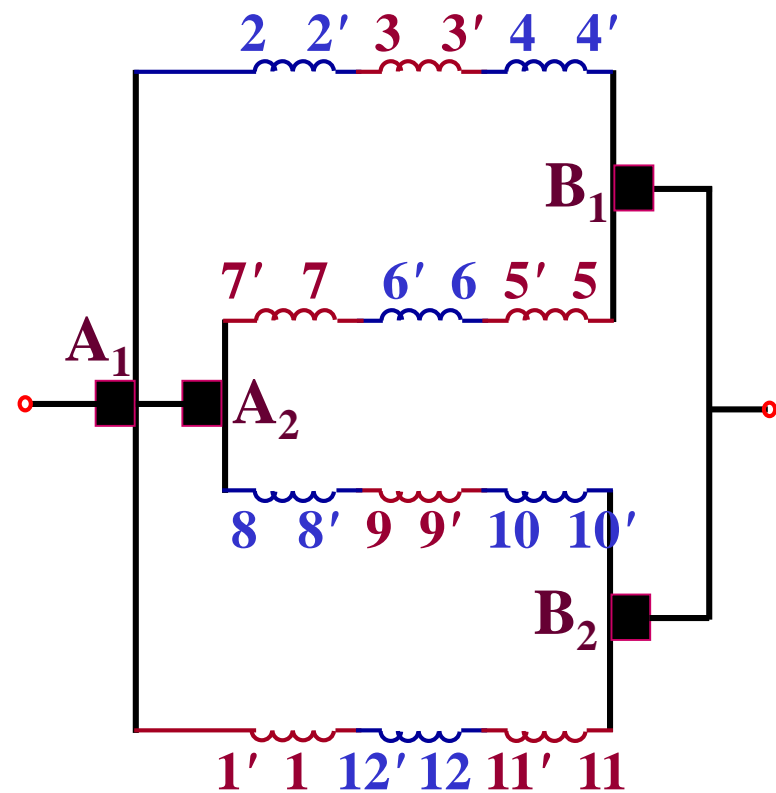
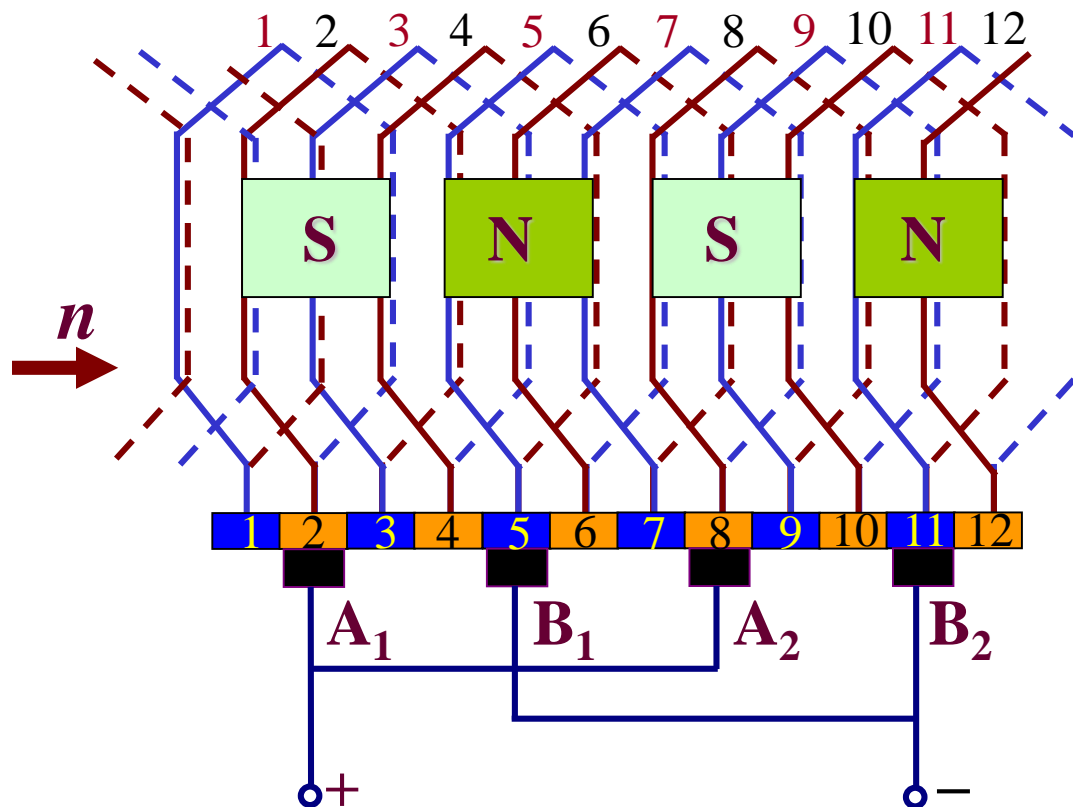
✓单叠绕组

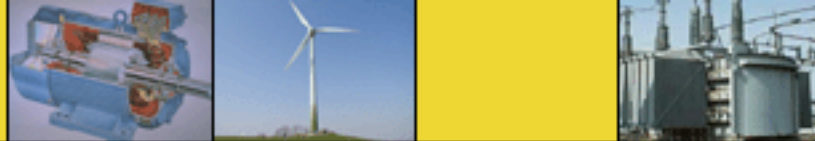
●单叠绕组的展开图是把放在铁心槽里、构成绕组的所有元件取出来画在一张图里，展示元件相互间的电气连接关系及主磁极、换向片、电刷间的相对位置关系。



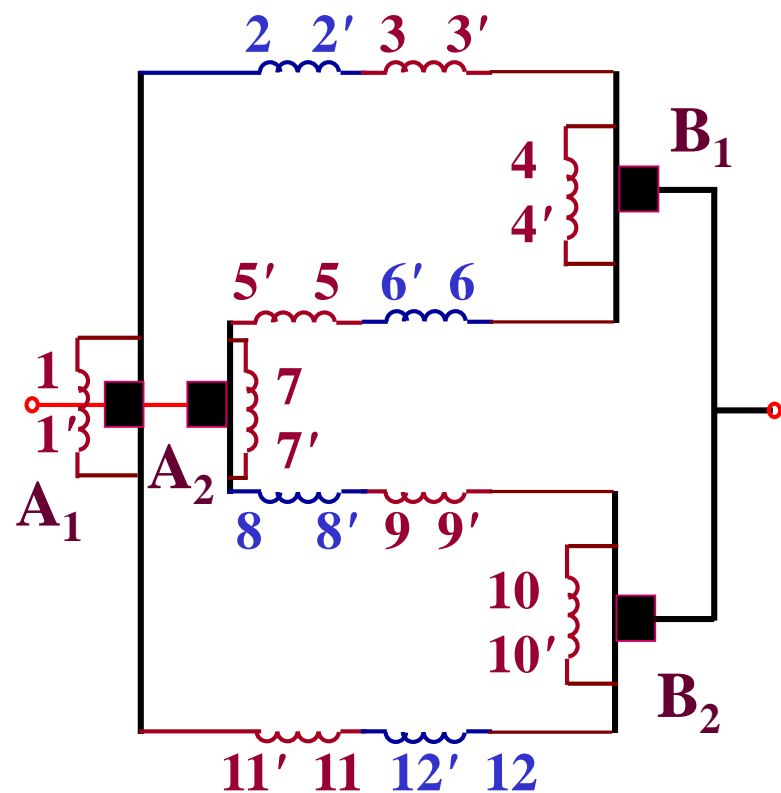
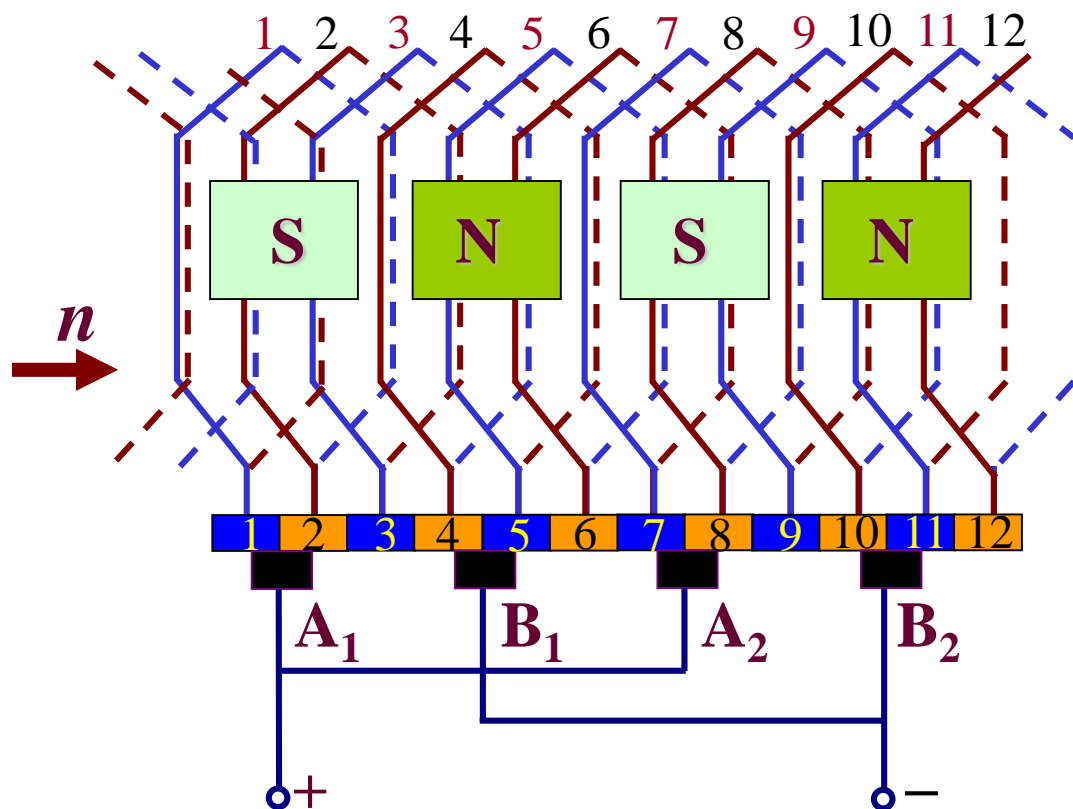


单叠绕组的展开图(电刷位于单个换向片上)





单叠绕组的展开图(电刷位于两个换向片上)

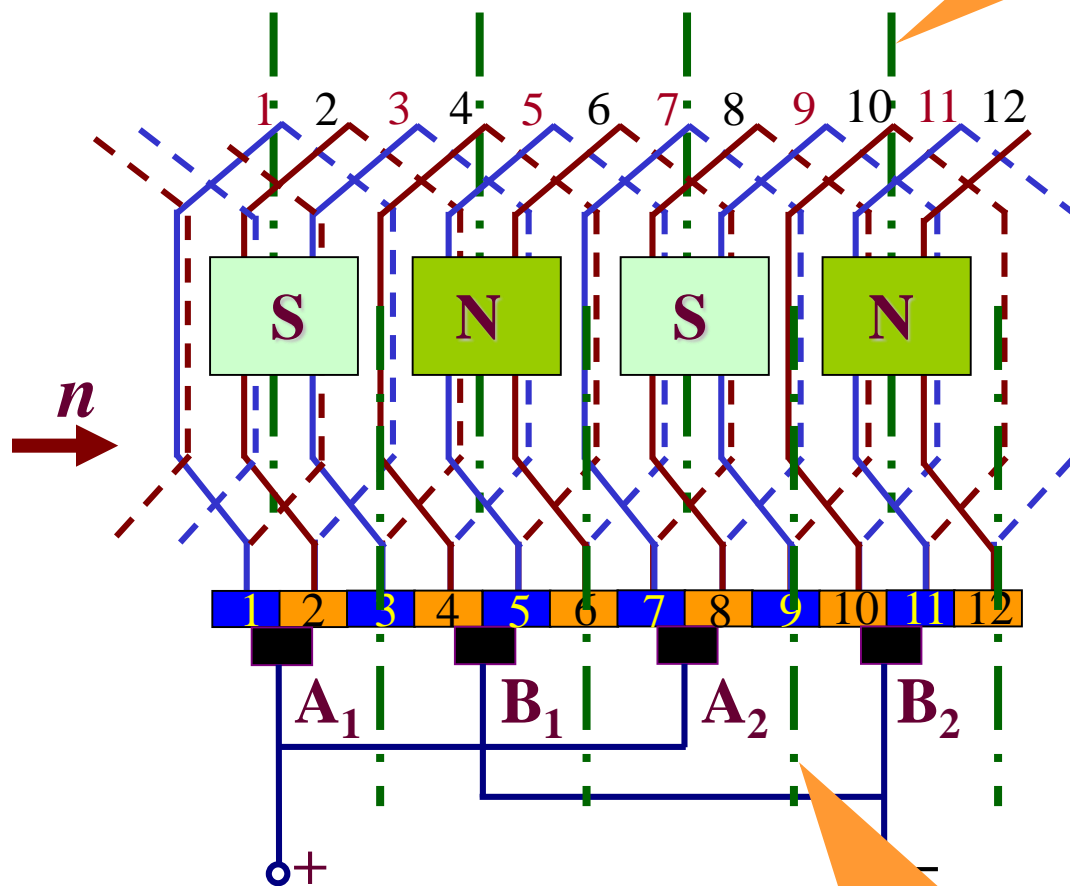


※ 并联支路对数: $a = 2$ 。

※ 电刷的中心线对着磁极的中心线。



单叠绕组的展开图(电刷位置) 磁极中心线



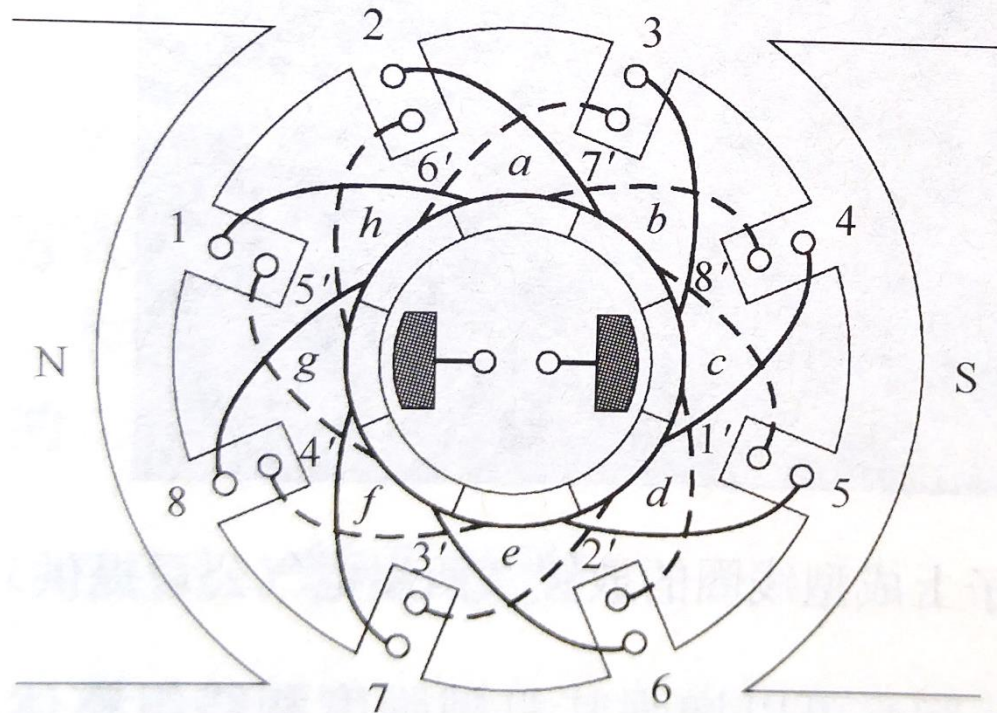
- ✖ 电刷的中心线对着磁极的中心线:
- ① 电刷之间的电动势最大。
- ② 被电刷短接的元件电动势为零。
- ✖ 习惯称“电刷放在几何中心线位置”。

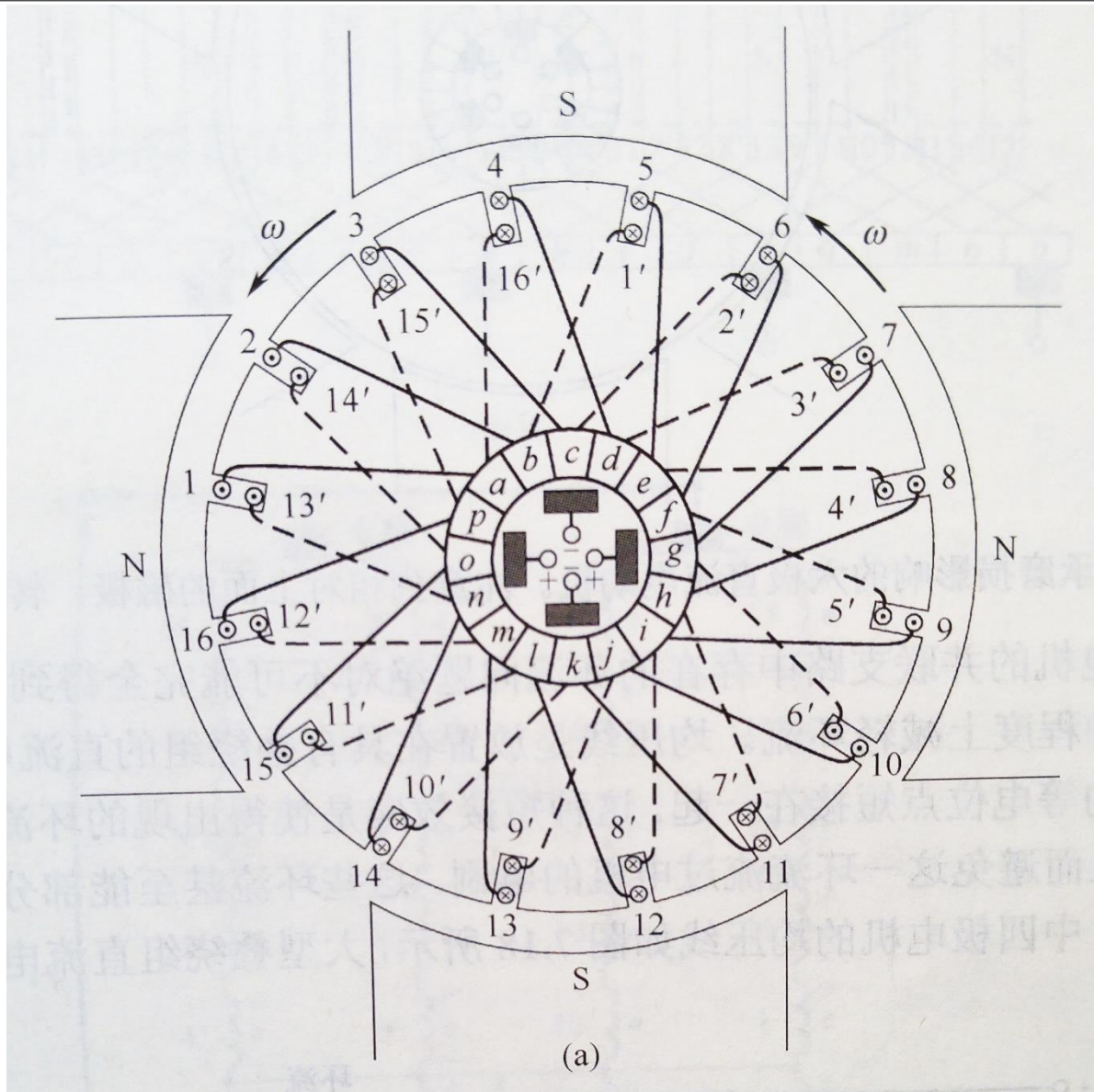
几何中心线

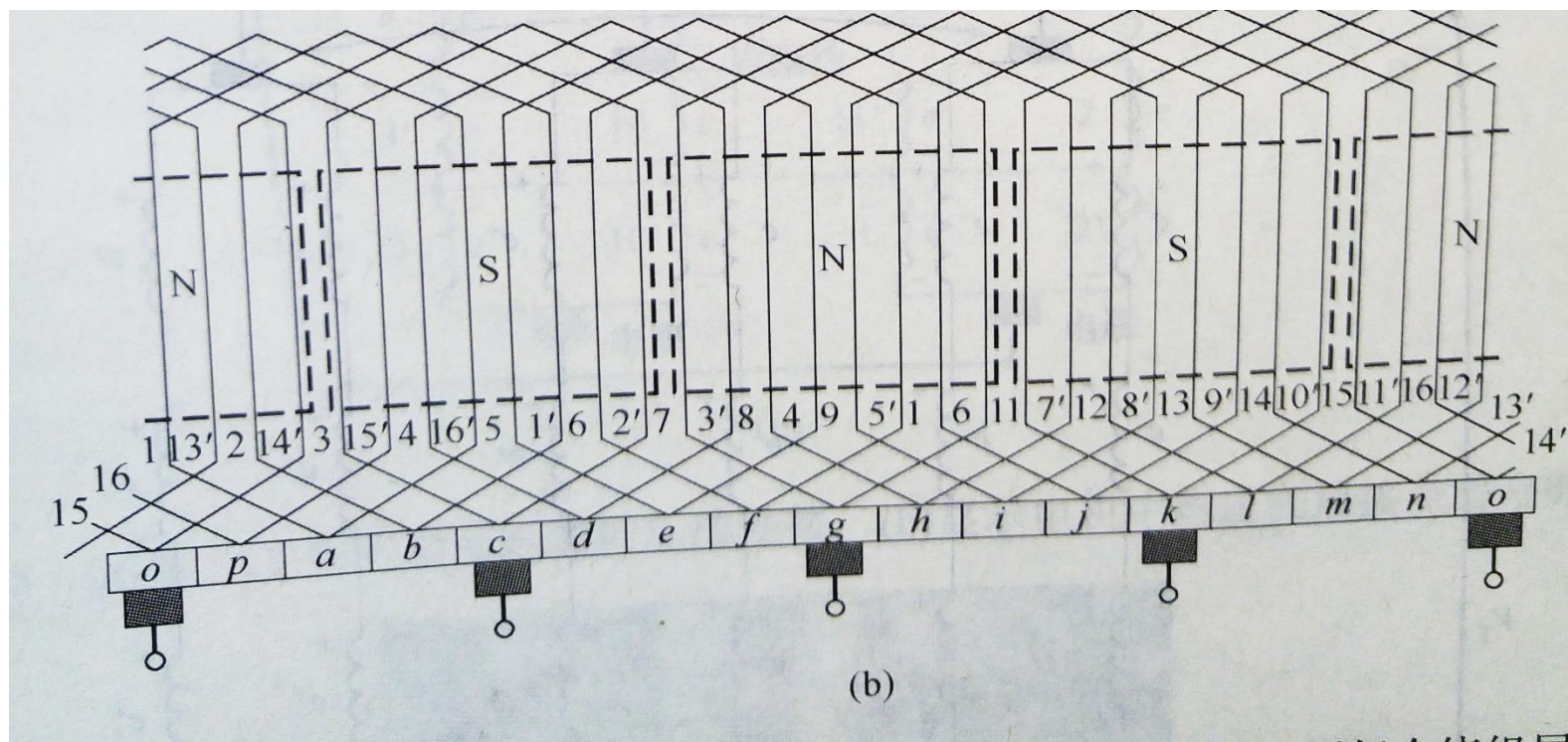


单叠绕组的的特点：

- 同一主磁极下的元件串联成一条支路，主磁极数与支路数相同。
- 电刷数等于主磁极数，电刷位置应使感应电动势最大，电刷间电动势等于并联支路电动势。
- 电枢电流等于各支路电流之和。



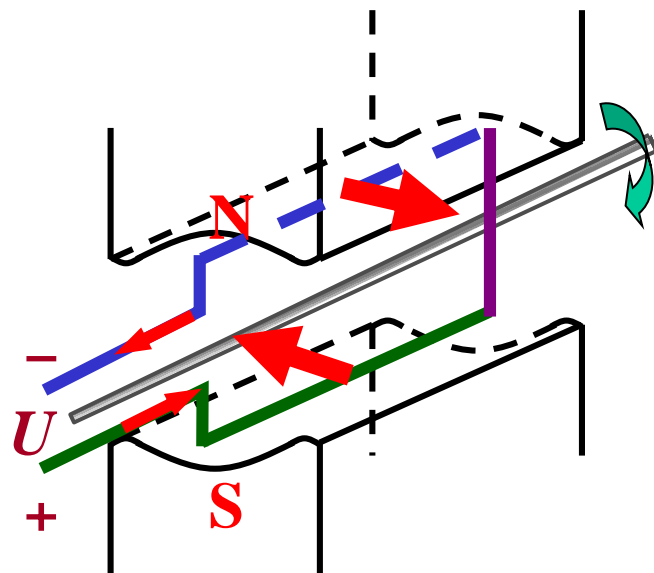
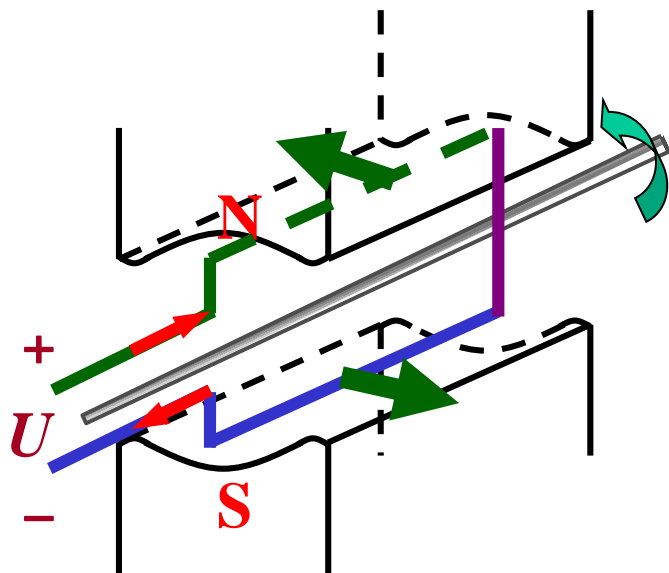


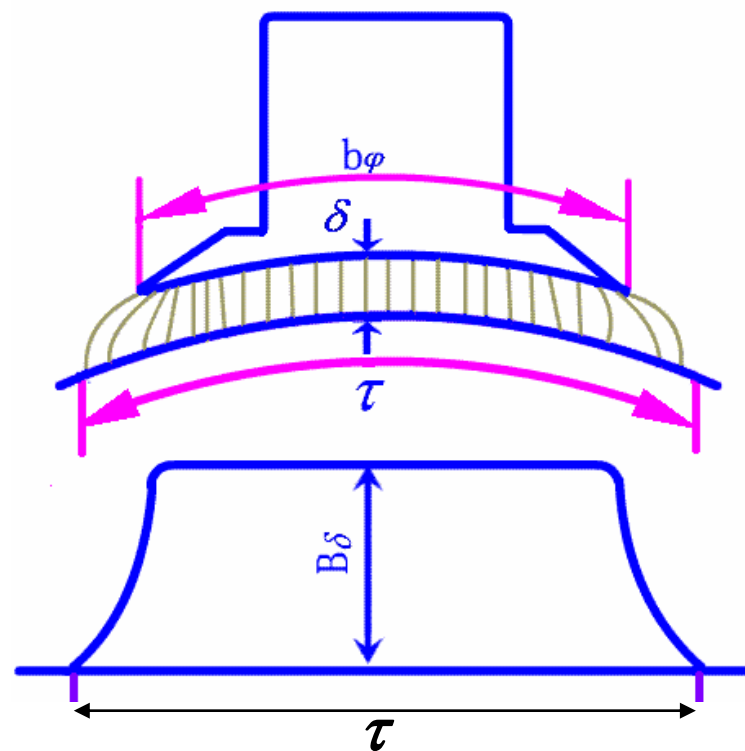
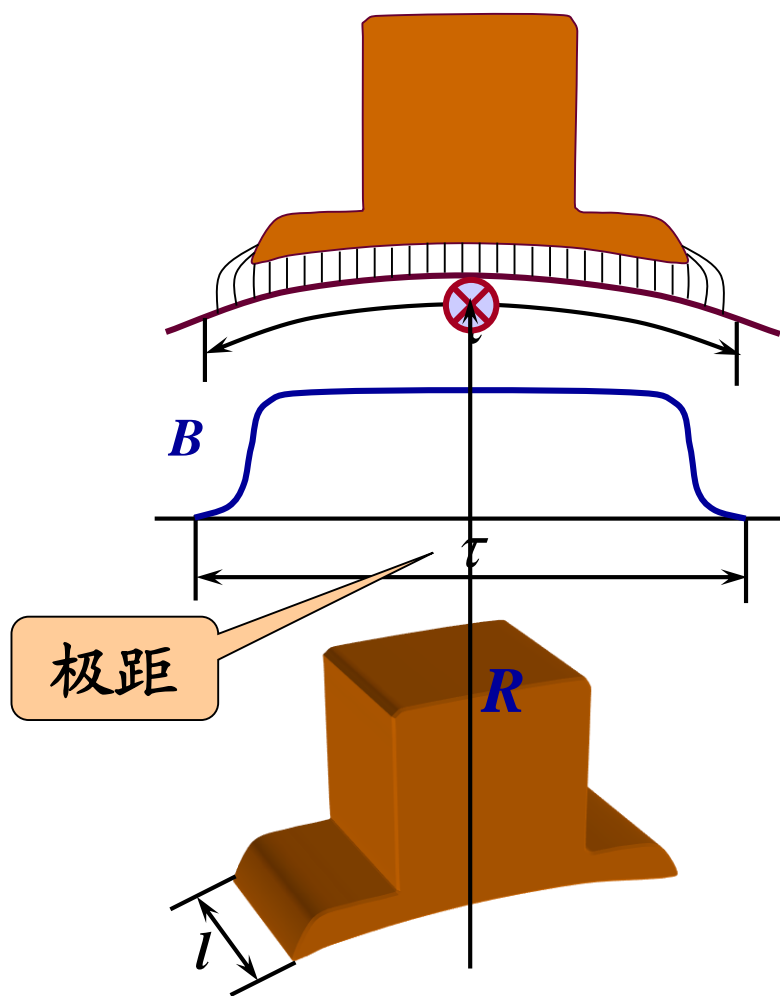




3.4 电枢的感应电动势和电磁转矩

一、电枢绕组的感应电动势





平均磁密: $B = \frac{\Phi}{\tau l}$

空载时直流电机气隙磁场



(1) 产生

电枢旋转 n

磁 场 Φ  $e \rightarrow \sum e \rightarrow E$

(2) 大小

● 每个导体: $e = B l v$

● 导体切割磁场的线速度:

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

● 电动势:

$$E = N_1 e = N_1 B l v$$

$$= N_1 \frac{\Phi}{\tau l} l \cdot \frac{2p\tau}{60} n = \frac{2pN_1}{60} \Phi n = \frac{2p}{60} \frac{N}{2a} \Phi n = \frac{pN}{60a} \Phi n$$

注意: N_1 为串联支路的总导体数, 而电枢总导体数 $N = N_1 * 2a$



$$E = C_E \Phi n \quad (\text{V})$$

单位: Wb

单位: r/min

C_E 电动势常数: $C_E = \frac{pN}{60a}$

(3) 方向:

由 Φ 和 n 共同决定。

(4) 性质:

发电机为电源电动势; 电动机为反电动势。



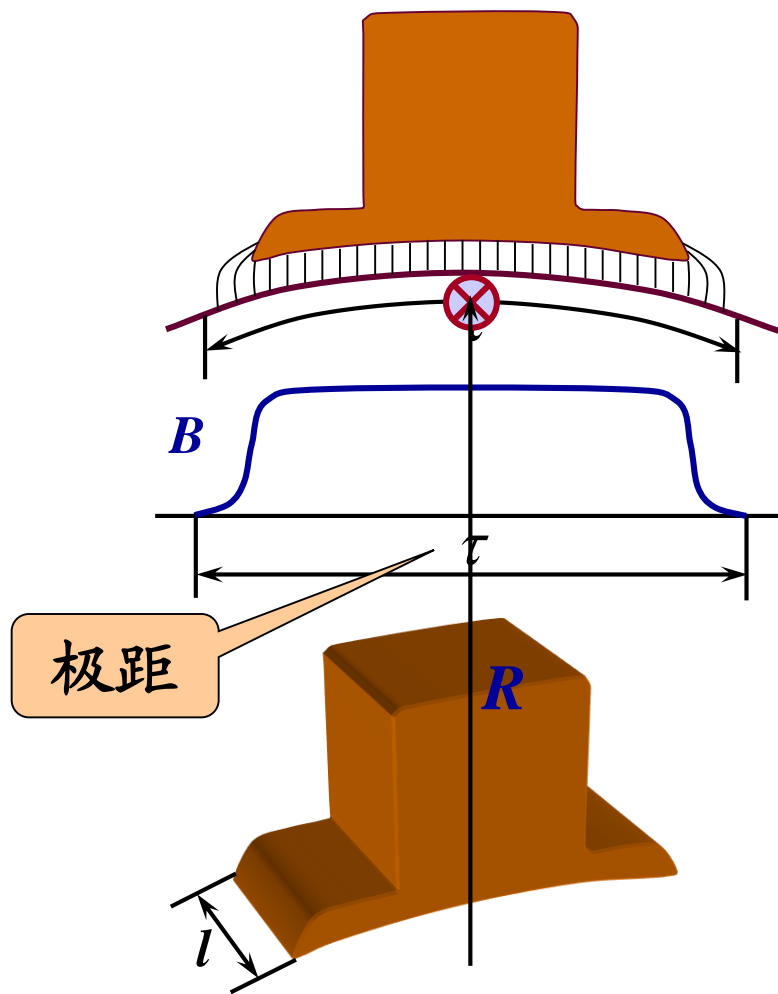
二、直流电机的电磁转矩

(1) 产生

电枢电流 i
 磁 场 Φ $\rightarrow F \rightarrow T$

(2) 大小

- 电磁力: $F = B l i$
- 平均磁密: $B = \frac{\Phi}{\tau l}$
- 每根导线上电磁力所形成的电磁转矩: FR





- 电枢绕组总导体数: N
- 电枢绕组串联支路总导体数: $N_1 = N / 2a$
- 电枢绕组并联支路数: $2a$
- 电枢的周长: $2\pi R = 2p\tau$
- 电磁转矩:

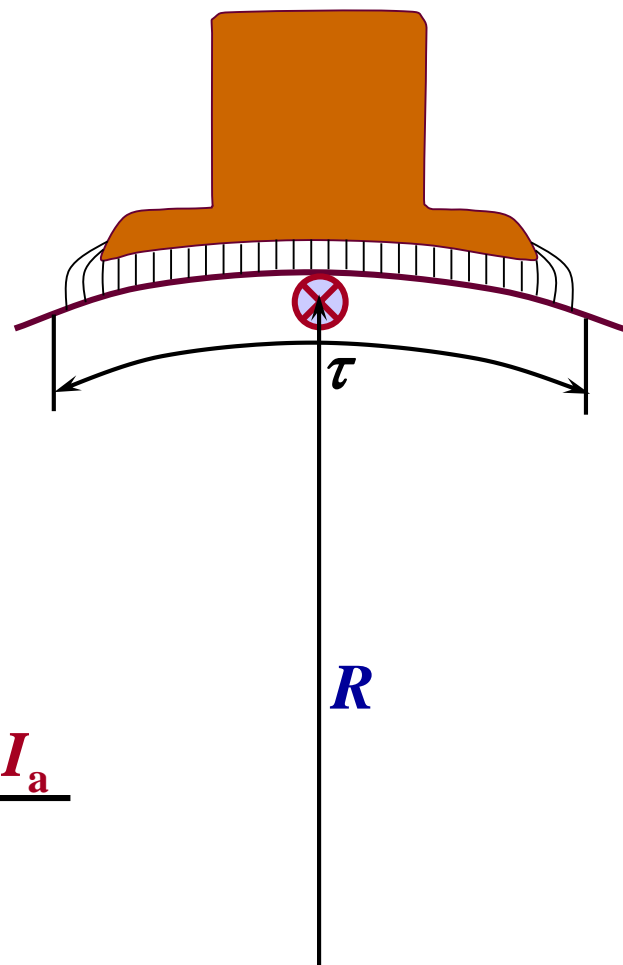
$$T = N F R = N \frac{p\tau}{\pi} B l i$$

$$= N \frac{p\tau}{\pi} \frac{\Phi}{\tau l} l i$$

$$= N \frac{p}{\pi} \cdot \Phi i$$

$$= \frac{pN}{2a\pi} \cdot \Phi \cdot 2ai$$

电枢电流 I_a





(2) 大小

单位: Wb

$$T = C_T \Phi I_a \quad (\text{N m})$$

C_T 转矩常数:

单位: A

$$C_T = \frac{pN}{2a\pi}$$

(3) 方向

由 Φ 和 I_a 共同决定。

(4) 性质

$$\left. \begin{aligned} C_T &= \frac{pN}{2a\pi} \\ C_E &= \frac{pN}{60a} \end{aligned} \right\} \frac{C_T}{C_E} = \frac{60}{2\pi} = 9.55$$

$$C_T = 9.55 C_E$$



3.5 直流电机基本方程

基本方程：电压方程，转矩方程，电磁功率

一、电压方程

1、他励直流电机

➤ 他励电动机

电枢电流与线路电流相等： $I_a = I$

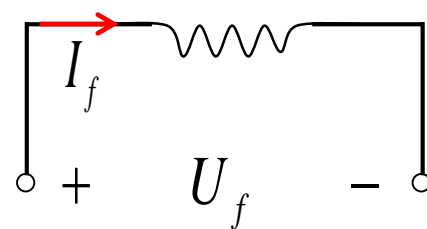
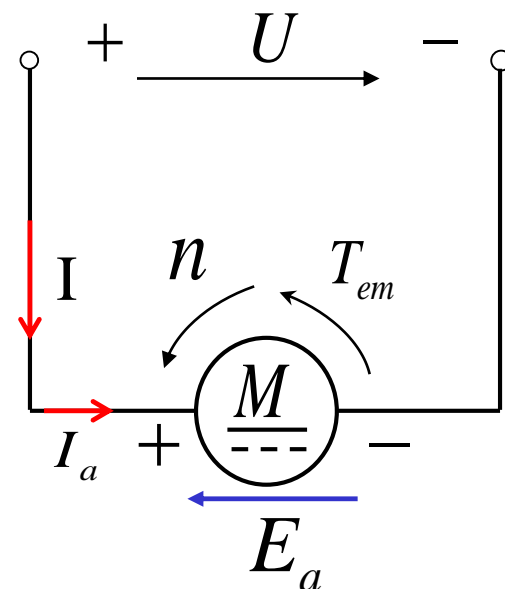
电压方程：

$$U = E_a + I_a R + 2\Delta U_b = E_a + I_a R_a$$

$$E_a < U$$

电枢绕组内阻

电枢回路
总电阻





➤他励发电机

电枢电流与线路电流相等： $I_a = I$

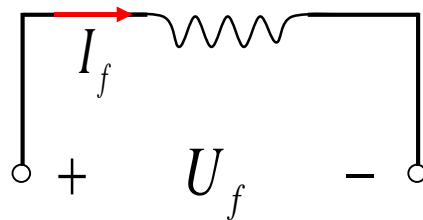
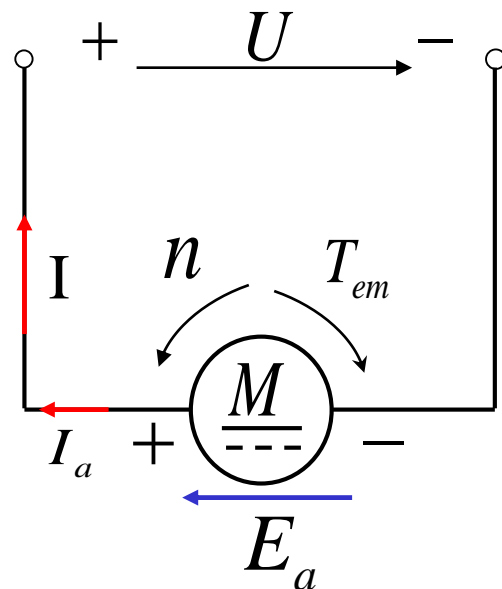
电压方程：

$$E_a = U + I_a R + 2\Delta U_b = U + I_a R_a$$

$$E_a > U$$

电枢绕组内阻

电枢回路
总电阻



电机向负载供电，电枢感应电势 E_a 作为电源电势必定大于端电压 U ，采用发电机惯例。



2、并励直流电机

➤ 并励电动机

电枢电流与线路电流： $I = I_a + I_f$

电压方程：

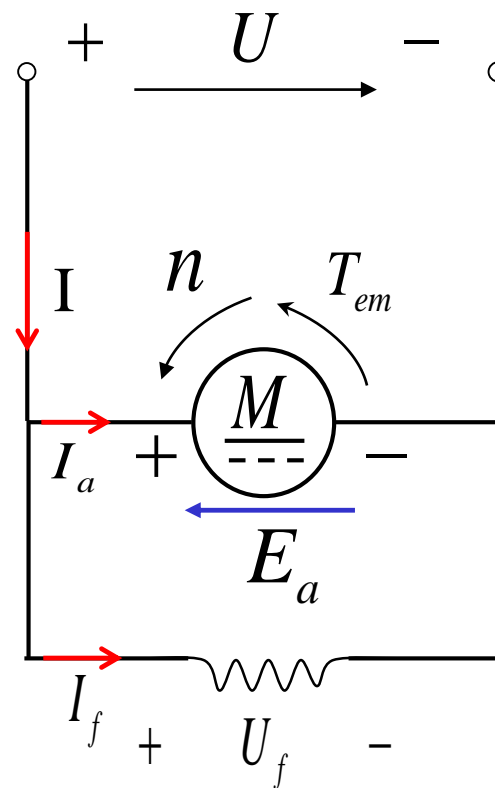
$$U = E_a + I_a R + 2\Delta U_b = E_a + I_a R_a$$

$$E_a < U$$

➤ 并励发电机

励磁电流由电枢供给： $I_a = I + I_f$

电压方程： $E_a = U + I_a R + 2\Delta U_b = U + I_a R_a \quad E_a > U$



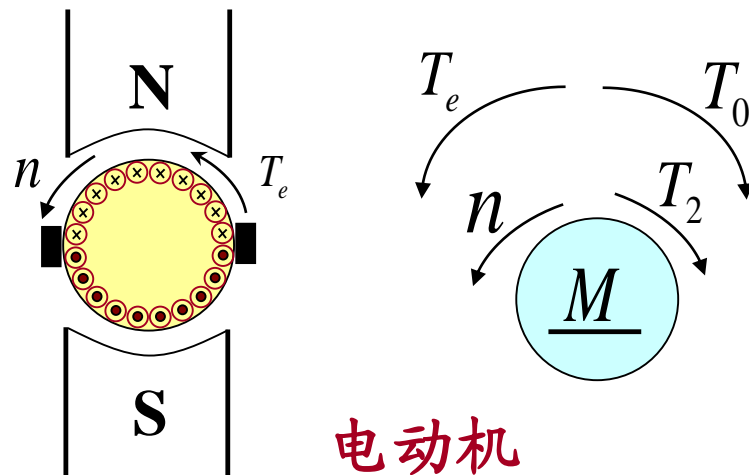


二、转矩方程

1、电动机转矩平衡方程

$$T_e = T_2 + T_0$$

T_e 为电磁转矩， T_2 为输出的负载机械转矩， T_0 为空载转矩。

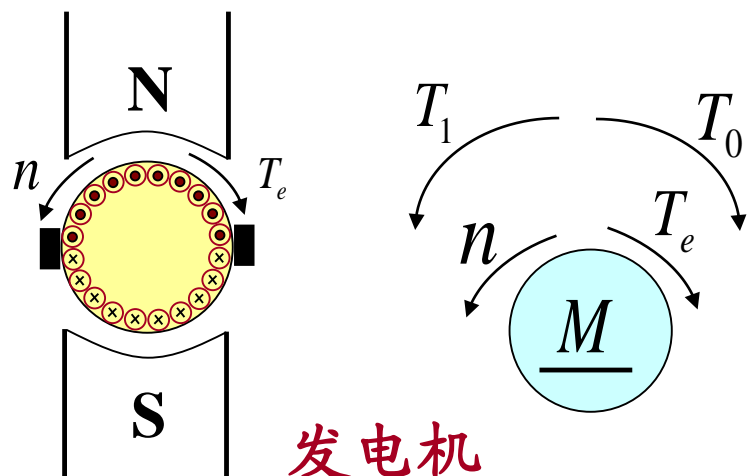


电动机

2、发电机转矩平衡方程

$$T_1 = T_e + T_0$$

T_1 为原动机动力转矩， T_e 为电磁转矩， T_0 为空载转矩。



发电机



三、功率方程

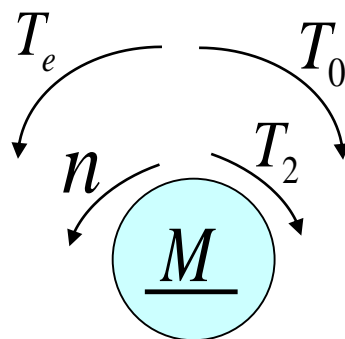
电磁功率: $P_e = E_a I_a$

转子机械角速度: $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$

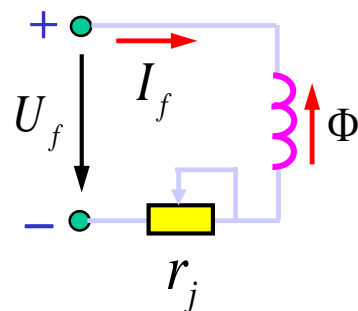
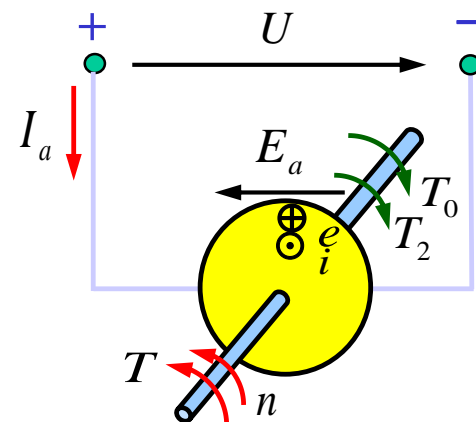
$$\begin{aligned} E_a I_a &= \frac{pN}{60a} \Phi n \cdot I_a = \frac{2\pi n}{60} \frac{pN}{2\pi a} \cdot \Phi I_a \\ &= \Omega \cdot C_T \Phi I_a = T_e \cdot \Omega \end{aligned}$$

则有: $P_e = E_a I_a = T_e \cdot \Omega$

$$T_e = \frac{P_e}{\Omega} = 9.55 \frac{P_e}{n} \quad T_2 = \frac{P_2}{\Omega} = 9.55 \frac{P_2}{n} \quad T_N = \frac{P_N}{\Omega} = 9.55 \frac{P_N}{n_N}$$



电动机



电动机惯例



1. 他励电动机功率平衡方程

输入功率： $P_1 = UI$

电枢回路功率平衡方程： $P_1 = P_e + p_{Cua}$

输出功率平衡方程：

$$P_e = P_2 + (p_{mec} + p_{Fe} + p_{ad})$$

$$p_0 = p_{mec} + p_{Fe} + p_{ad} \quad \text{空载损耗}$$

$$P_e = P_2 + p_0$$

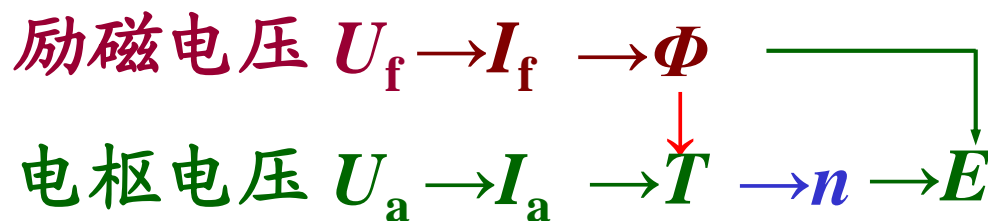
功率平衡方程： $P_1 = P_2 + \sum p$

$$\sum p = p_{Cua} + p_{mec} + p_{Fe} + p_{ad} \quad \text{他励电动机总损耗}$$



3.7 直流电动机的运行特性

1. 他励电动机



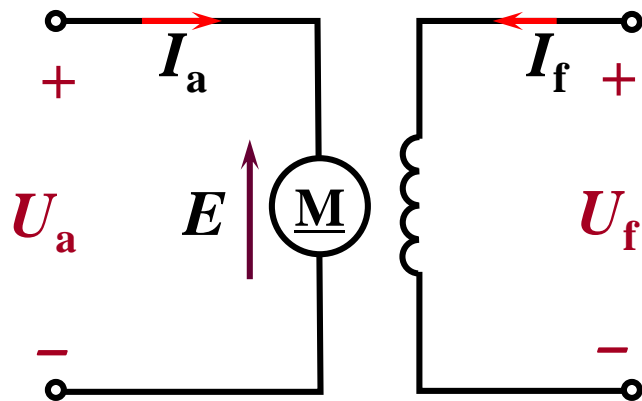
(1) 电压平衡方程式

励磁电路:

$$U_f = R_f I_f$$

电枢电路:

$$U_a = E + R_a I_a$$





● 稳态电枢电流 I_a 由谁确定？

$$T = C_T \Phi I_a, \quad U_a = E + R_a I_a$$

例如：负载不变（ T 不变）， U_a (R_a) 变化时，
 I_a 变化否（设 Φ 不变）？

$$U_a \downarrow (\text{或 } R_a \uparrow) \xrightarrow[\text{E 不变}]{\text{瞬间 } n \text{ 不变}} I_a \downarrow \rightarrow T \downarrow \rightarrow T < T_L$$

$$I_a \text{ 不变} \leftarrow T = T_L \leftarrow T \uparrow \leftarrow I_a \uparrow \leftarrow E \downarrow \leftarrow \overset{\downarrow}{n} \downarrow$$

● 结论： I_a 的大小取决于负载的大小。

当 $I_a = I_{aN}$ 时为满载，当 $I_a > I_{aN}$ 时为过载。

※ 规定短时过载的最大电枢电流：

$$I_{amax} = (1.5 \sim 2) I_{aN} = \alpha_{MC} I_{aN}$$



(2) 转速

$$n = \frac{E}{C_E \Phi} = \frac{U_a - R_a I_a}{C_E \Phi} = \frac{U_a}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_T \Phi^2} T$$

当 $T \uparrow$ 时, n 下降不多

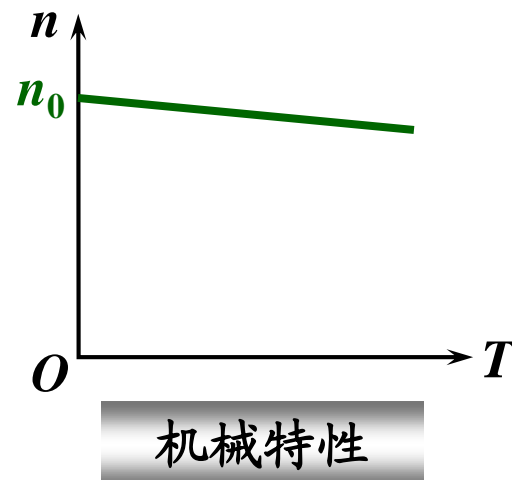
—— 硬特性。

励磁电路断电的后果

当 $I_f = 0$, $\Phi = \Phi_r$ 很小,
 n 不能突变, E 很小 $\rightarrow I_a \uparrow \uparrow$
 $\rightarrow T = C_T \Phi_r I_a$ 仍有一定数值。

① 若 $T > T_L \rightarrow n \uparrow \uparrow \rightarrow$ 飞车!

② $T < T_L \rightarrow n \downarrow \downarrow \rightarrow n = 0 \rightarrow$ 闷车!

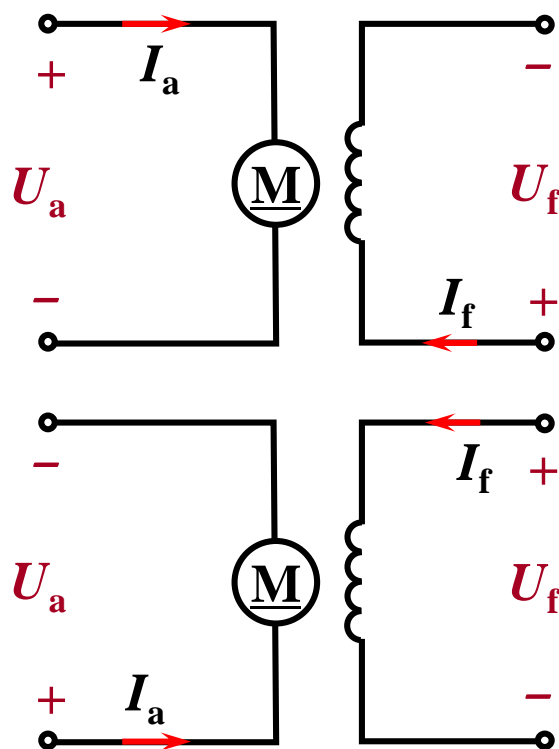
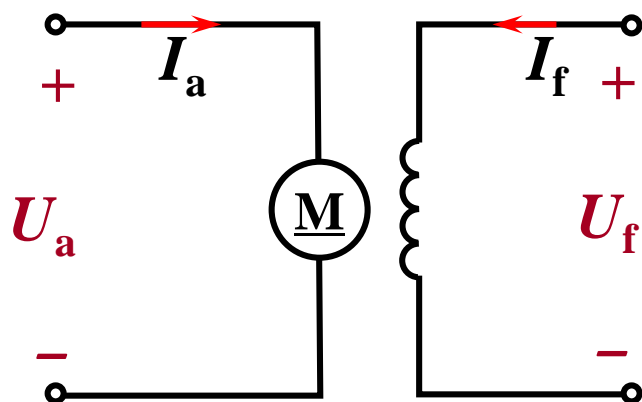




(3) 转向

取决于电磁转矩 T 的方向。

T 的方向取决于 Φ 和 I_a 的方向。



磁场反向

电枢反向



2. 并励电动机

并励与他励的区别：

(1) 输入电压

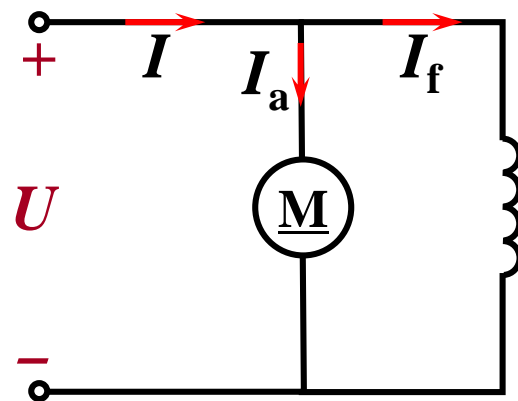
$$U = U_a = U_f$$

(2) 输入电流

$$I = I_a + I_f$$

(3) 输入功率

$$P_1 = UI = UI_a + UI_f$$





3.他励（并励）直流电动机的工作特性

(1) 速率特性

定义：当 $U = U_N$ 、 $I = I_{fN}$ 时， $n = f(I_a)$

由方程式可得
$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi} I_a$$

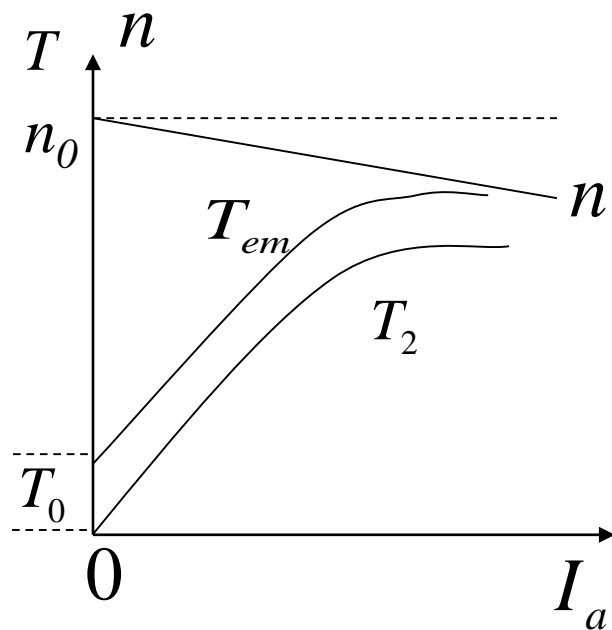
忽略电枢反应的去磁作用，转速与负载电流按线性关系变化。如图示。

(2) 转矩特性

定义：当 $U = U_N$ 、 $I = I_{fN}$ 时， $T_{em} = f(I_a)$

转矩表达式 $T_{em} = C_T \Phi_N I_a$

考虑电枢反应的作用，转矩上升的速度比电流上升的慢。如图示。





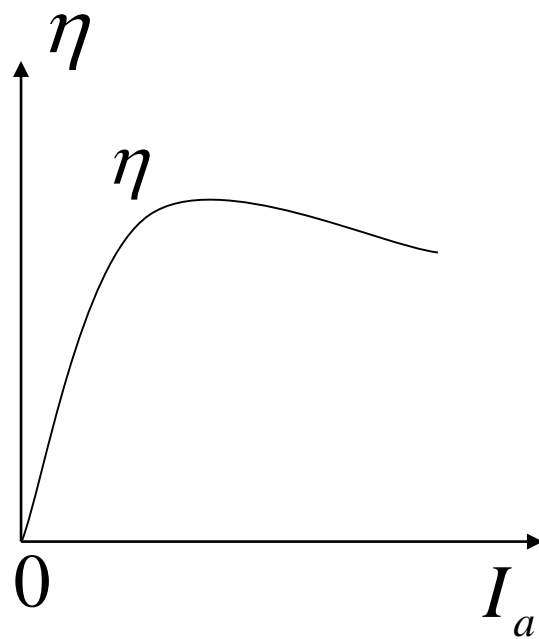
(3) 效率特性

定义：当 $U = U_N$ 、 $I = I_{fN}$ 时， $\eta = f(I_a)$

由方程式可得

$$\eta = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = 1 - \frac{P_0 + R_a I_a^2}{U_N I_a}$$

空载损耗为不变损耗，不随负载电流变化，当负载电流较小时效率较低，输入功率大部分消耗在空载损耗上；负载电流增大，效率也增大，输入的功率大部分消耗在机械负载上；但当负载电流增大到一定程度时铜损快速增大此时效率又变小。如图所示。





(4) 机械特性

定义：当 $U = U_N$ ，励磁回路和电枢回路电阻保持不变时，电动机的转速 n 与电磁转矩之间的关系 $n = f(T_{em})$ 称为直流电机的机械特性。

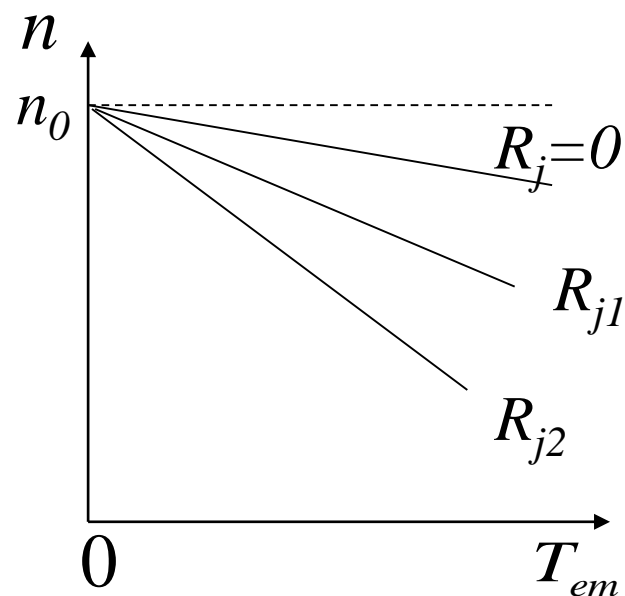
$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_E \Phi} \quad I_a = \frac{T_{em}}{C_T \Phi}$$

由方程式可得：

$$n = \frac{U_N}{C_E \Phi} - \frac{R_a + R_j}{C_E C_T \Phi^2} T_{em}$$

当 $I_a = 0$ 时， $T = 0$ ，对应转速为空载转速：

$$n_0 = \frac{U_N}{C_E \Phi}$$





【例】 某并励直流电动机， $U_N = 220$ V， $I_N = 12.5$ A， $n_N = 3\,000$ r/min， $R_f = 628\ \Omega$ ， $R_a = 0.41\ \Omega$ 。求该电机在额定状态下运行时的：
(1) I_f ； (2) I_a ； (3) E ； (4) T 。

解： (1) 励磁电流 I_f

$$I_f = \frac{U_f}{R_f} = \frac{220}{628} \text{ A} = 0.35 \text{ A}$$

(2) 电枢电流 I_a

$$I_a = I_N - I_f = (12.5 - 0.35) \text{ A} = 12.15 \text{ A}$$

(2) 电动势 E

$$\begin{aligned} E &= U_N - R_a I_a \\ &= (220 - 0.41 \times 12.15) \text{ V} = 215 \text{ V} \end{aligned}$$



(4) 电磁转矩

$$C_E \Phi = \frac{E}{n_N} = \frac{215}{3\,000} = 0.071\,7$$

$$C_T \Phi = 9.55 C_E \Phi = 0.685$$

$$\begin{aligned} T &= C_T \Phi I_a \\ &= 0.685 \times 12.15 \text{ N m} = 8.32 \text{ N m} \end{aligned}$$



4. 串励电动机

(1) 电压

$$\begin{aligned} U &= U_a + U_f \\ &= E + (R_a + R_f) I \end{aligned}$$

(2) 电流

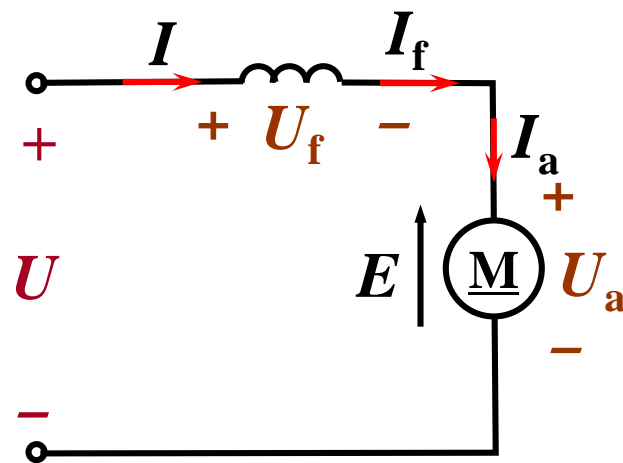
$$\begin{aligned} I &= I_a = I_f \\ &= \frac{U - E}{R_a + R_f} = \frac{T}{C_T \Phi} \end{aligned}$$

(3) 转矩

$$T = C_T \Phi I_a$$

① 当 I_a 较小、磁路未饱和时, $\Phi \propto I_a$, $T \propto I_a^2$ 。

② 当 I_a 较大、磁路已饱和时, $\Phi \approx \text{常数}$, $T \propto I_a$ 。





即 $T \propto I_a^m \quad (1 < m < 2)$

● 与并励电动机比较，有如下特点

- ① 对应于相同的 ΔT ， ΔI_a 小。
- ② 对应于允许的 $I_{a\max}$ ，能够产生的 T 大， T_{st} 和 T_{\max} 较大。

(4) 转速

$$n = \frac{E}{C_E \Phi} = \frac{U - (R_a + R_f) I_a}{C_E \Phi}$$

$$= \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_a + R_f}{C_E C_T \Phi^2} T$$

- ① 当 $T = 0$ 时， $I_a = I_f = 0$ ， $\Phi = \Phi_r$ ， $n_0 = (5 \sim 6) n_N$ 。



② 当 T 很小时， I_a 很小，磁路未饱和，

$T \uparrow \rightarrow I_a \uparrow \rightarrow \Phi \uparrow \rightarrow n$ 迅速下降。

③ 当 T 很大时， I_a 很大，磁路已饱和，

$T \uparrow \rightarrow I_a \uparrow \rightarrow \Phi$ 基本不变 $\rightarrow n$ 下降较少。

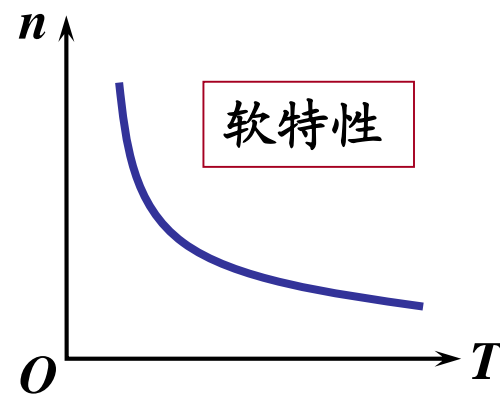
(5) 应用

① 特别适用于起重机

和电气机车等运输机械。

② 不能在轻载或空载下运行。

③ 不能用皮带轮传动。



串励电动机的机械特性



5. 复励电动机

(1) 积复励、差复励。

(2) 机械特性

① 有较大的 T_{st} 。

② 可以空载运行。

