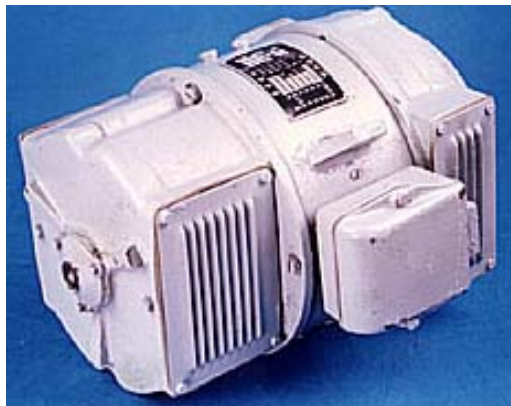


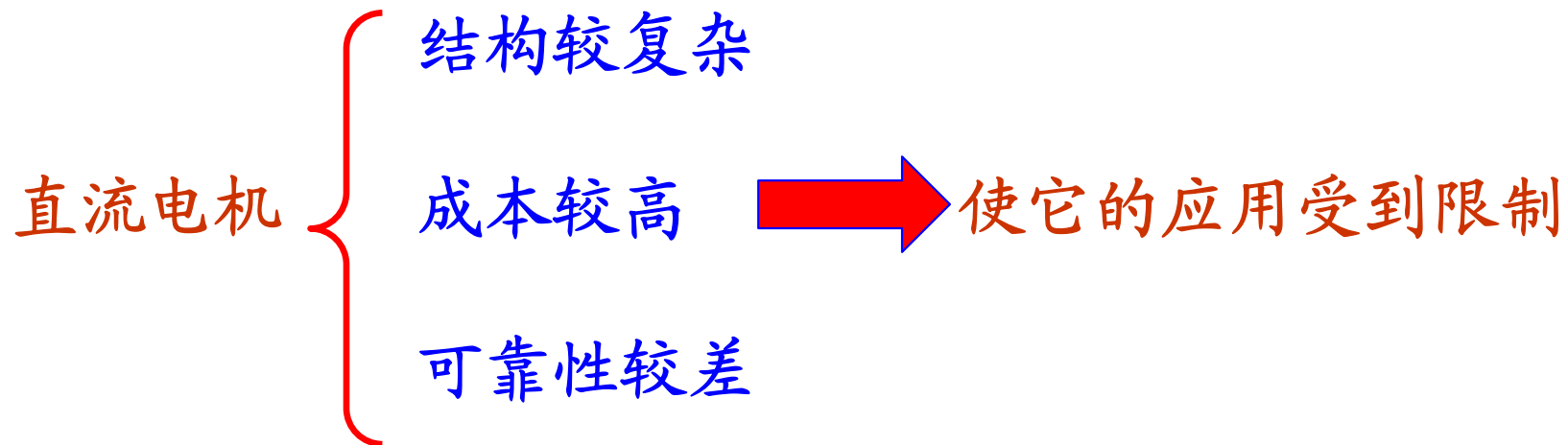
第三章

直流电机的稳态分析



直流电机是电机的主要类型之一

1. 直流电动机以其良好的启动性能和调速性能著称。
2. 直流发电机供电质量较好，常常作为励磁电源。

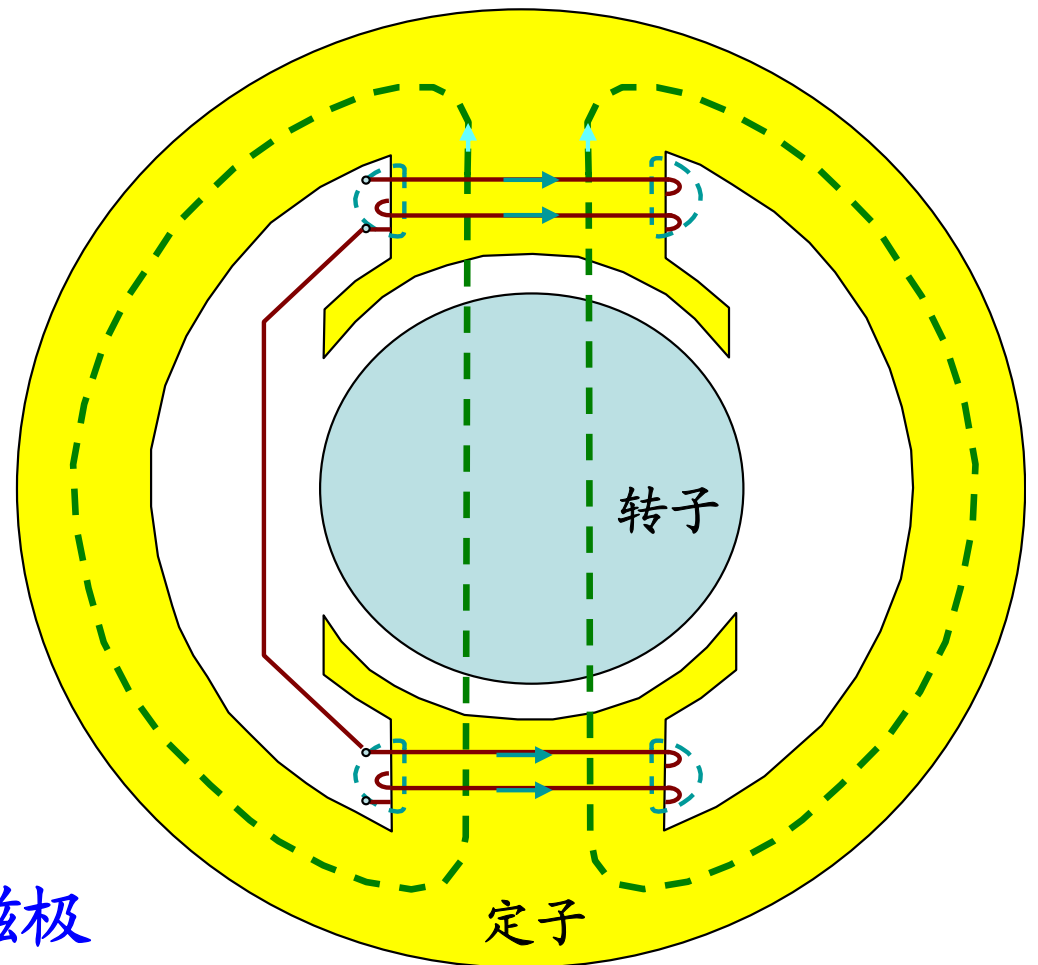
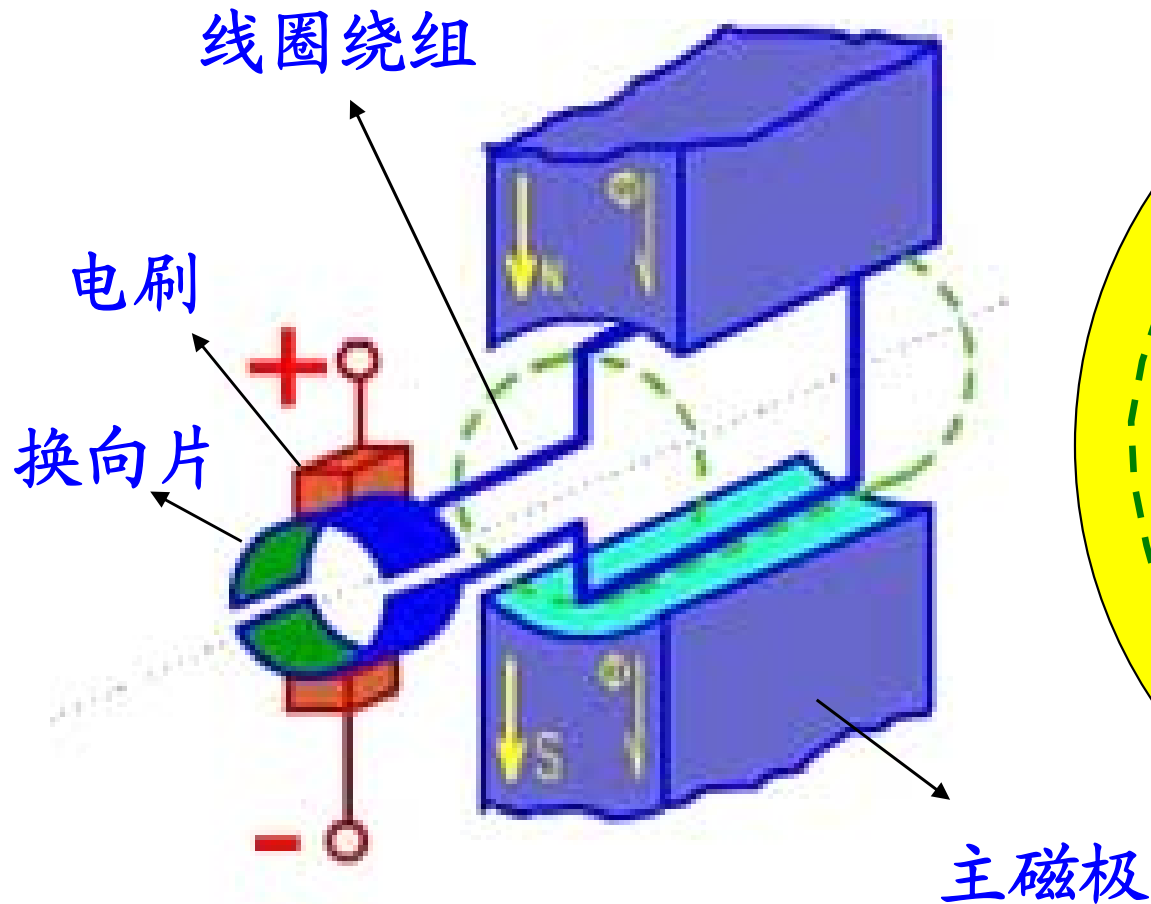


近年来，与电力电子装置结合而具有直流电机性能的电机不断涌现，使直流电机有被取代的趋势。尽管如此，直流电机仍有一定的理论意义和实用价值！

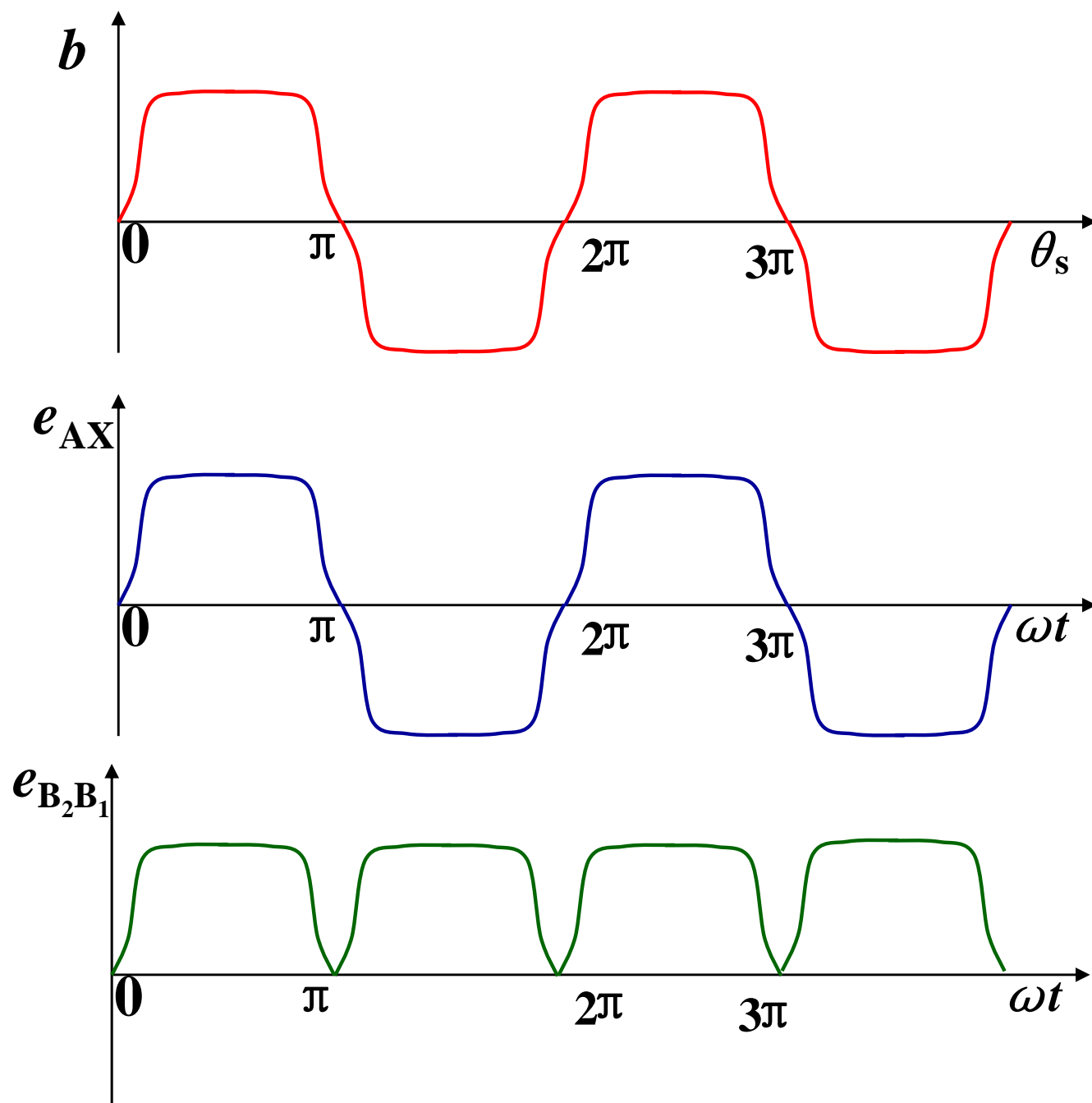
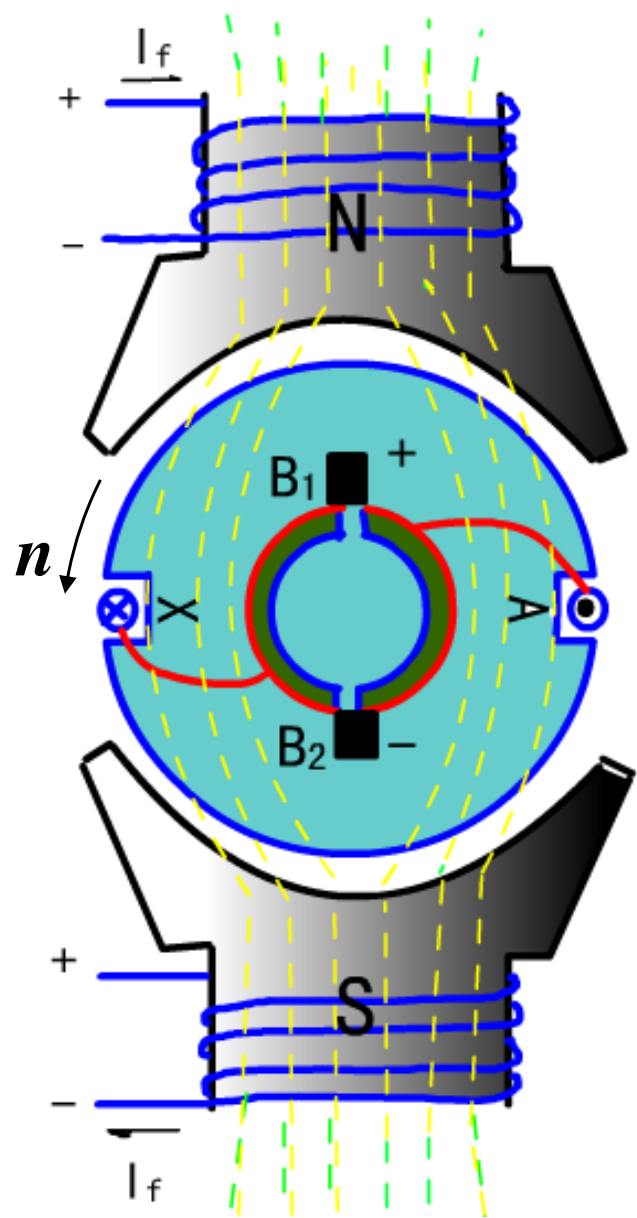
3.1 直流电机的工作原理和基本结构

一、直流电机的工作原理

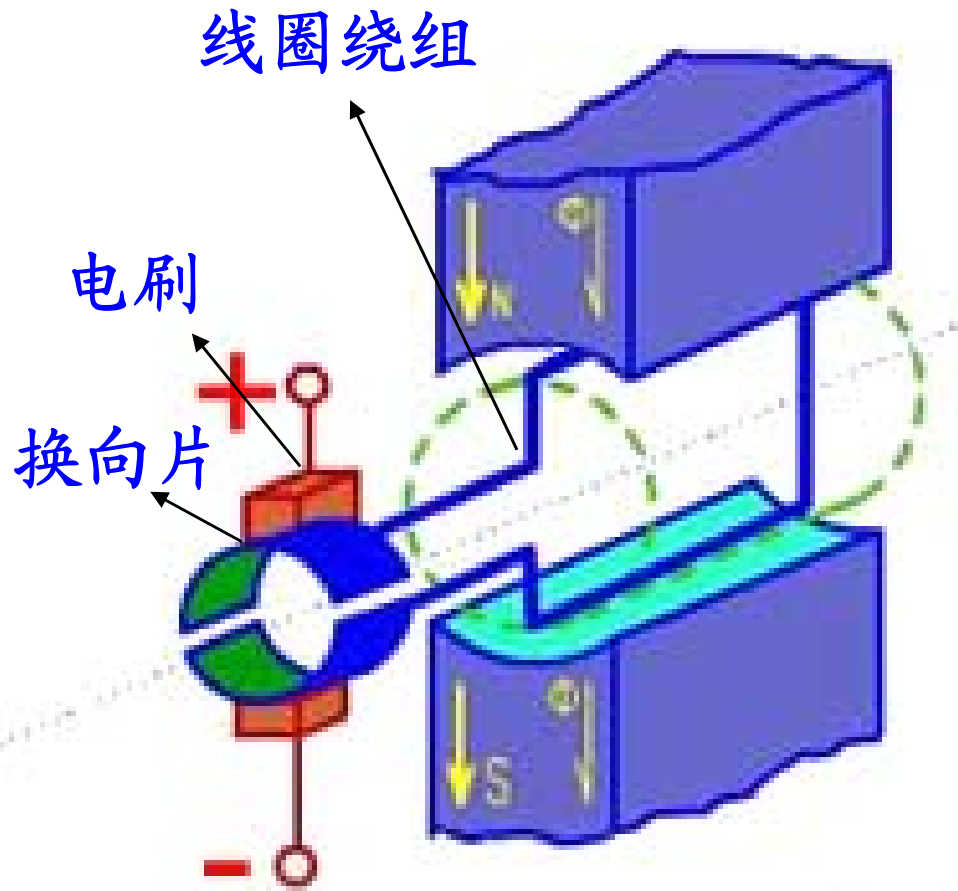
1、直流电机的构成。定子与转子之间为气隙。



2、直流发电机的工作原理

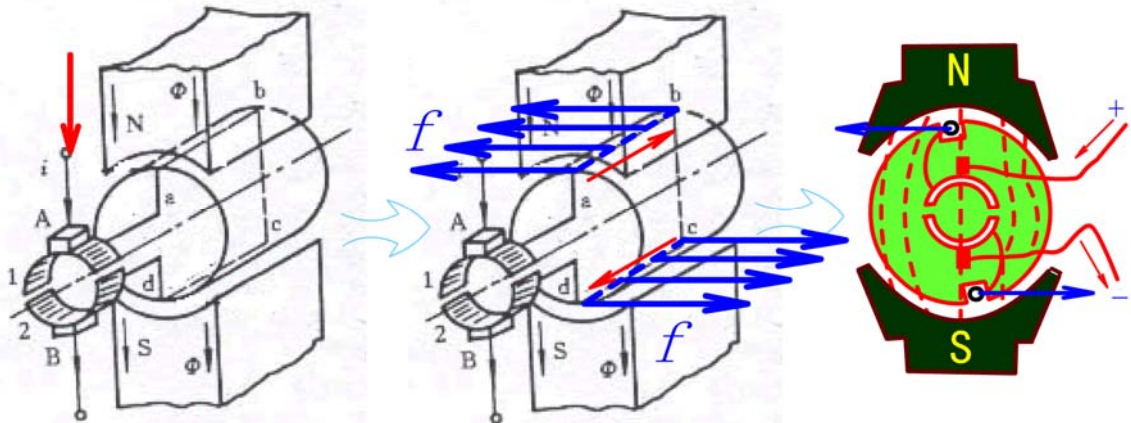


3、直流电动机的工作原理



在直流电动机中，外加电压并非直接加于线圈，而是通过电刷、和换向器再加入到线圈上的。

导体中的电流将随其所处磁极极性的改变而同时改变其方向，从而使电磁转矩的方向始终保持不变。



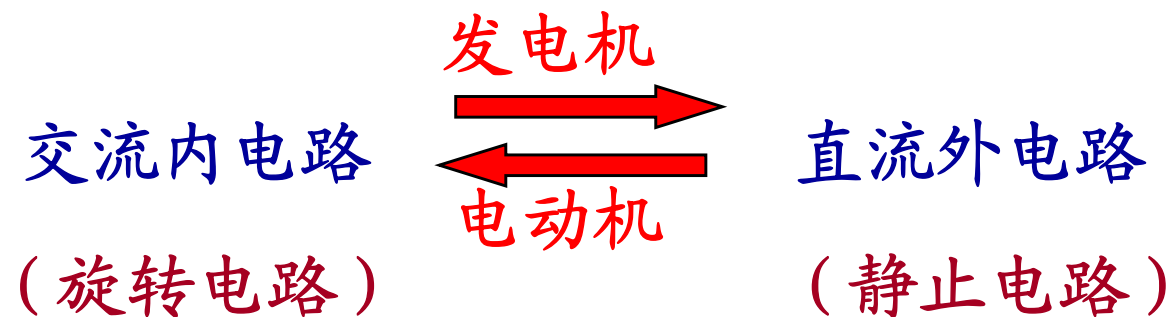
结论

(1) 电机内部（电刷为界）

线圈中产生的感应电势、流过的电流是交流量。

(2) 电机外部（电刷两端）

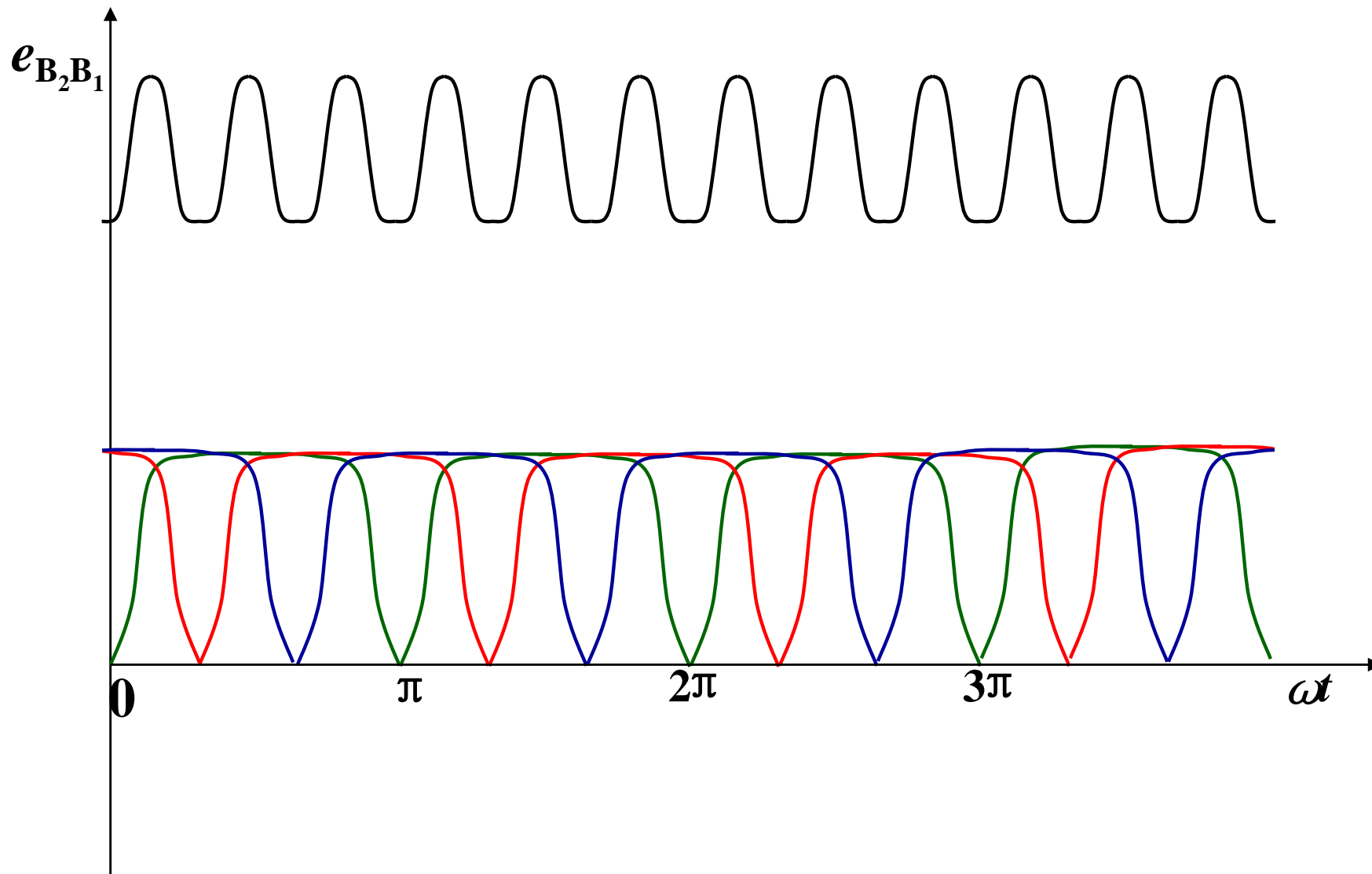
电动机运行外加直流电；发电机运行输出直流电



因此说，直流电机实质上是一台带有换向装置的交流电机

4、脉动的减小

电枢绕组由**多个线圈串联**而构成的。多个感应电势波，它们在时间相位上各相距一定的电角度，串联后的合成电势脉动成份将更为减小，合成电势将更为稳定。

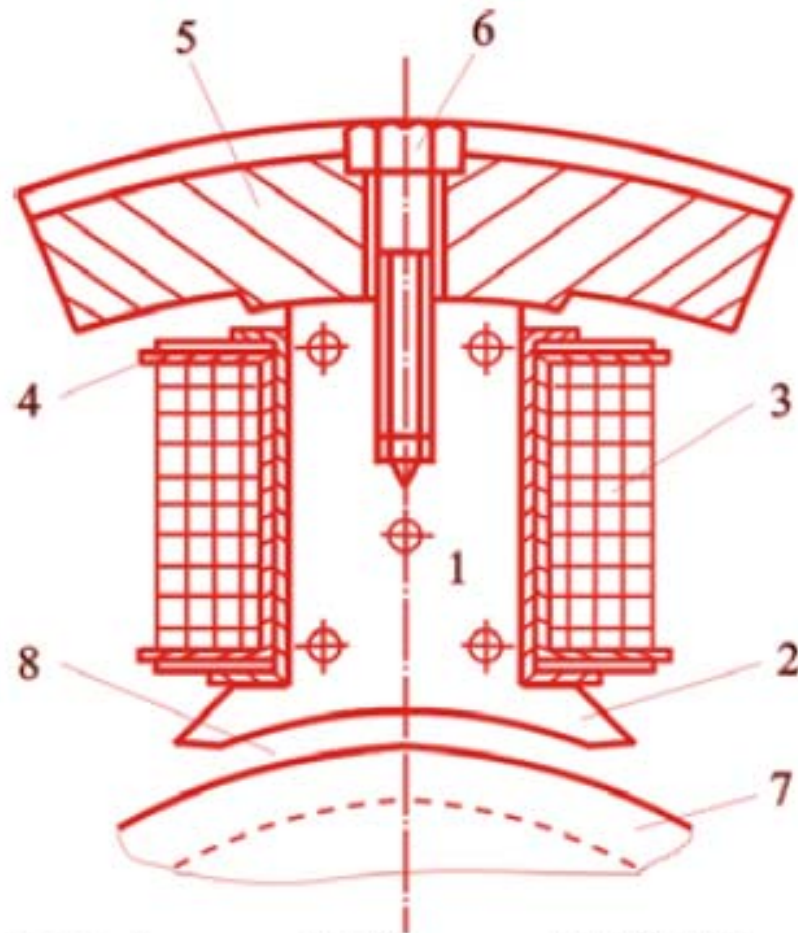


二、直流电机的基本结构

1、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。



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

2、机座

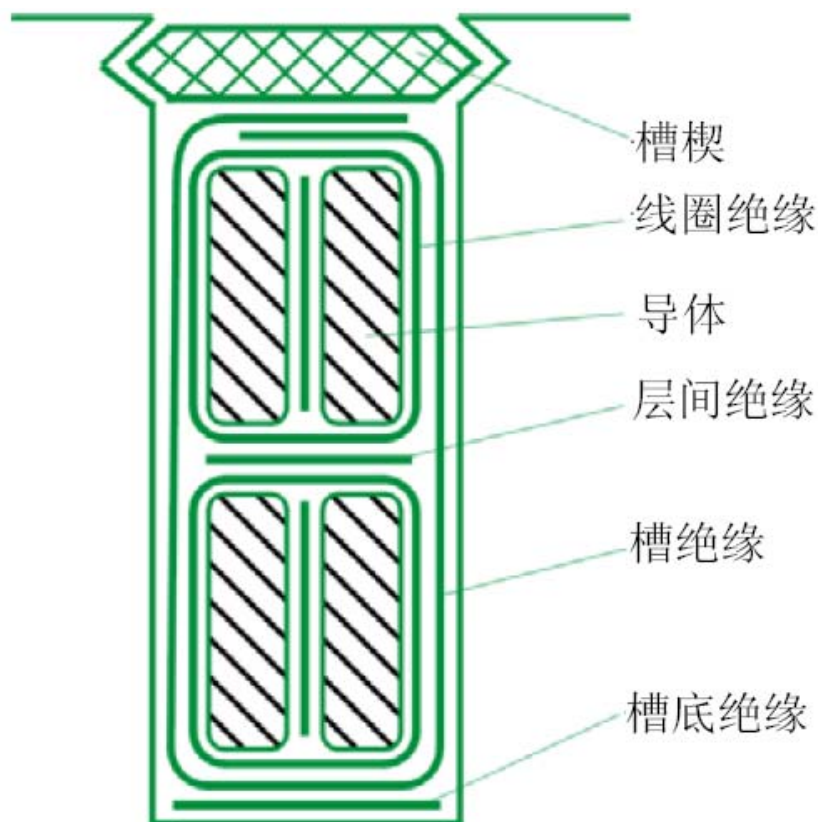
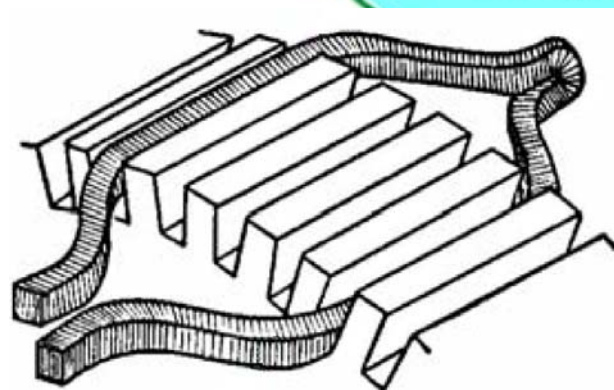
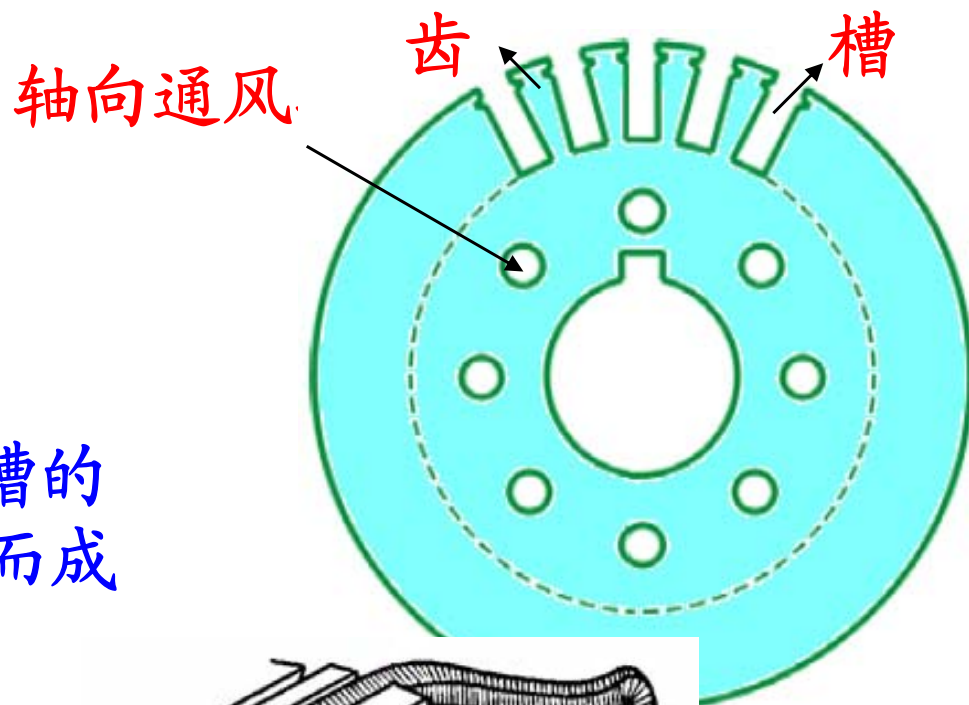
作用：1、主磁路的一部分； 2、电机的结构框架

构成：用厚钢板弯成筒形焊成或铸钢件制成

3、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



电枢绕组在槽中的绝缘情况

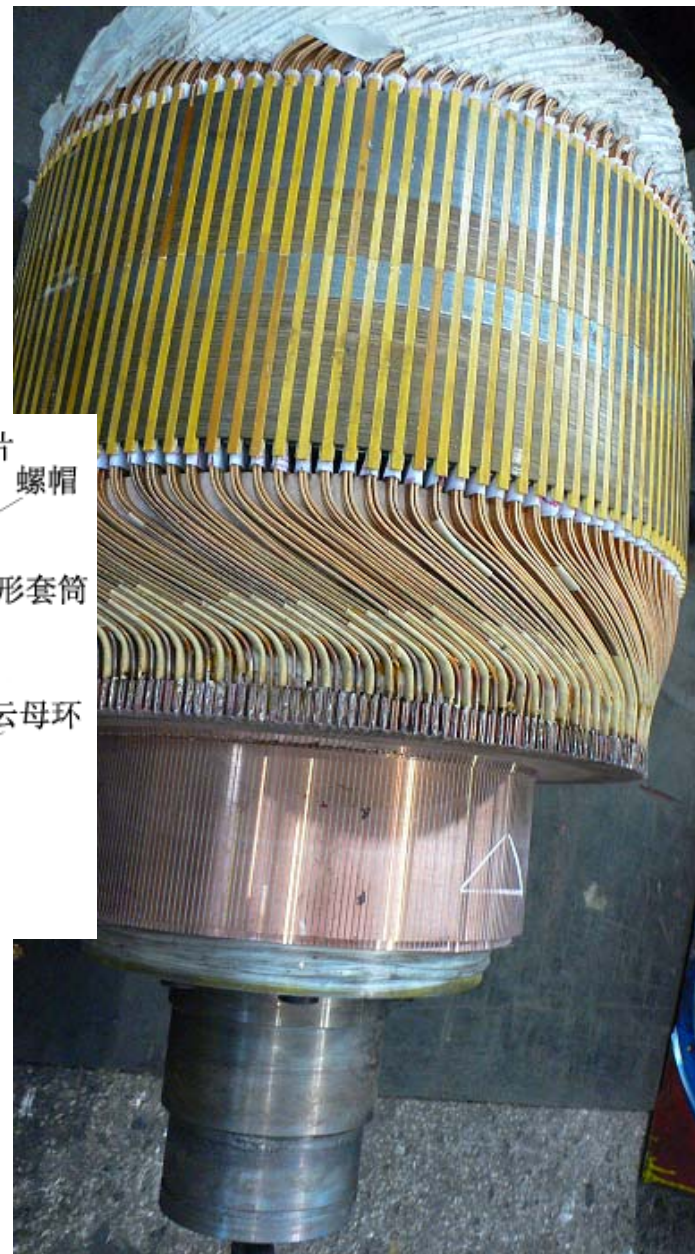
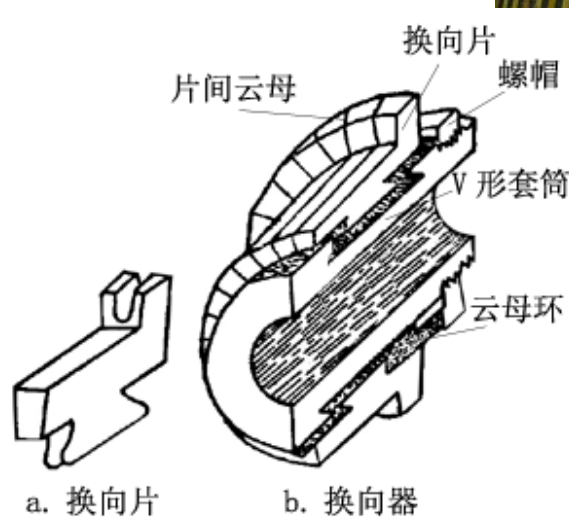
4、电枢绕组

构成：用绝缘的圆形或矩形截面的导线绕成，上下层以及线圈与电枢铁心间要妥善地绝缘，并用槽楔压紧。

5、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，两端再用两个形环夹紧而构成。



换向器通过和电刷间的滑动接触，使**旋转电枢电路**能与**静止的外电路**相通，以机械方式改变电动势、电流的方向。故而换向器是直流电机的关键部件。

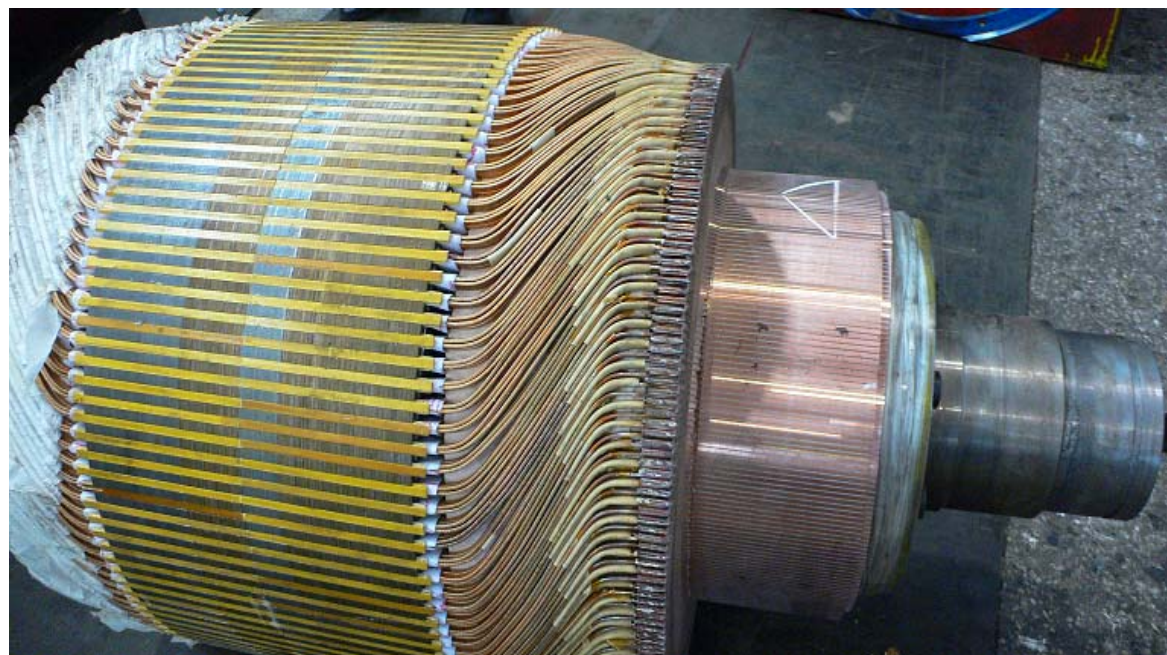
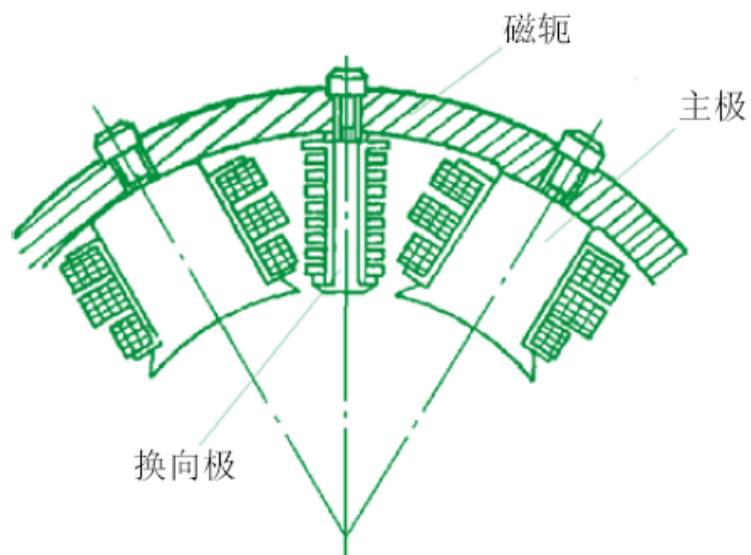
6、电刷装置

作用：电枢电路的引出
(或引入)装置。

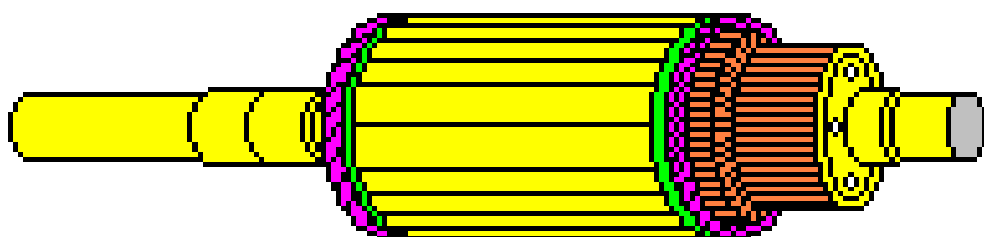
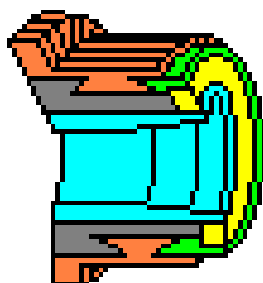
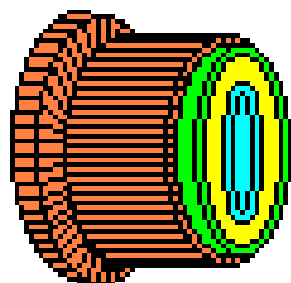
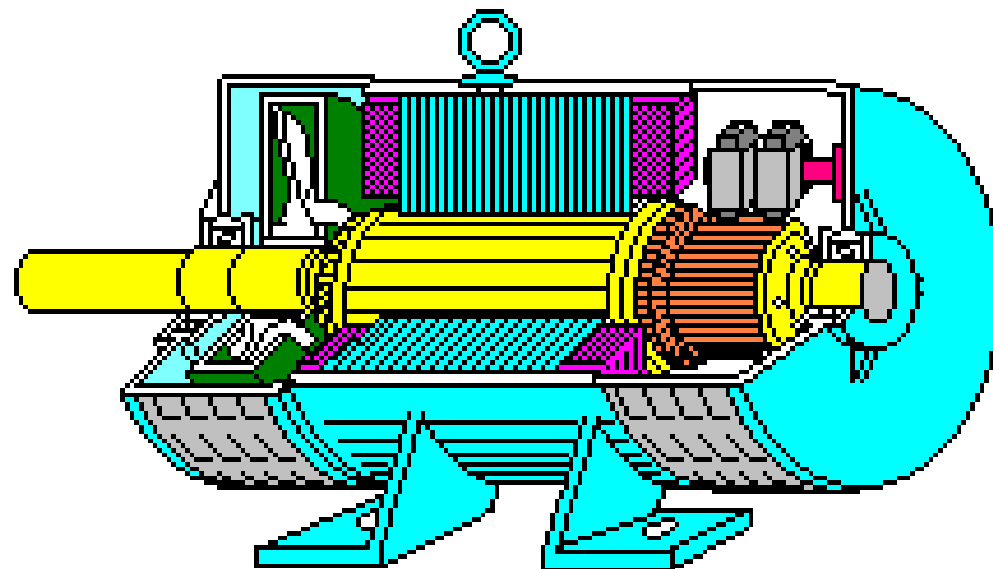
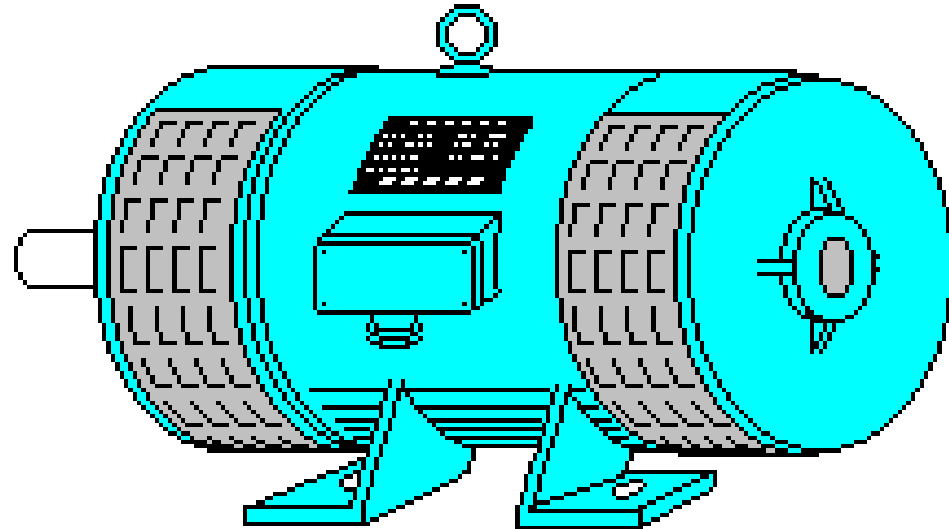
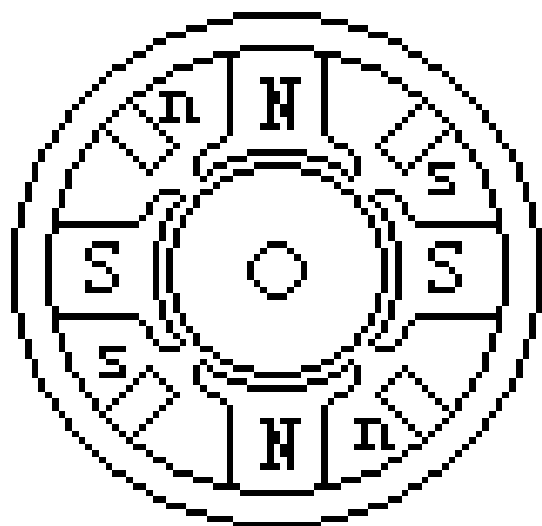
构成：电刷、刷盒、
刷杆和连线等。



7、换向极

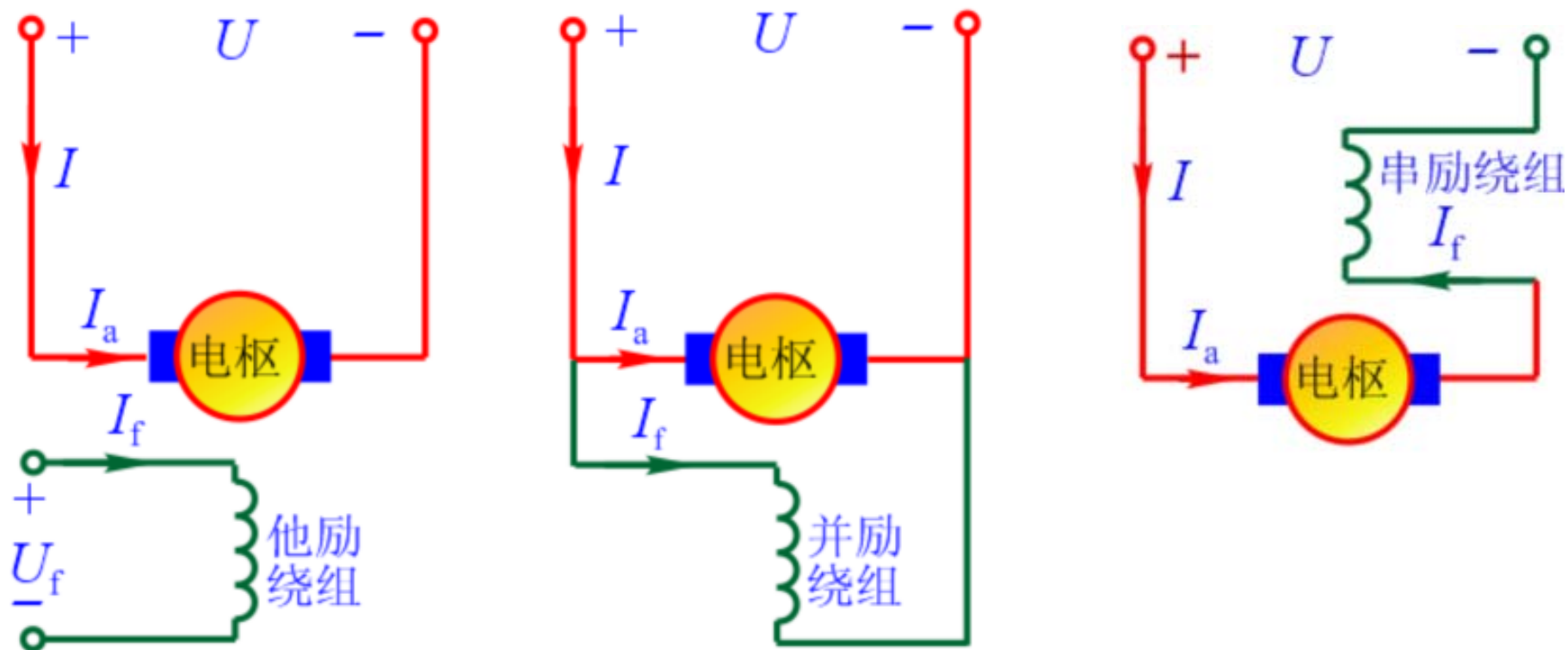


总体结构示意图



部件名称	作用	材料
主磁极	励磁绕组通入直流，建立气隙磁场	1~1.5mm低碳钢片叠制，降低涡流损耗
换向极	改善换向	整块钢或1~1.5mm钢片叠制
机座	机械支撑并构成磁回路	铸钢（小电机），厚钢板焊接（大中型电机）
电枢铁心	构成磁路、嵌放电枢绕组	0.35-0.5mm硅钢片叠制，降低涡流损耗
电枢绕组	感应电势，承载电流，产生转矩	圆截面铜线或扁导线、空心导线
换向器	与电刷配合，用机械换接的方法引入（出）直流电势	铜换向片和片间绝缘云母构成换向片
电刷装置	与换向器配合，实现直流量和交流量之间的转换	石墨碳刷

三、励磁方式



它励式: 励磁绕组由其他电源供电, 励磁绕组与电枢绕组不相连。

并励式: 励磁绕组与电枢绕组并联;

串励式: 励磁绕组与电枢绕组串联;

直流电机按励磁方式可分:

他励

自励

四、直流电机的额定值

直流电机的额定值有：

(1) **额定功率**：指电机在铭牌规定的额定状态下运行时，电机的输出功率，以kW表示。

对电动机，额定功率是指输出的机械功率；
对发电机，额定功率是指输出的电功率。



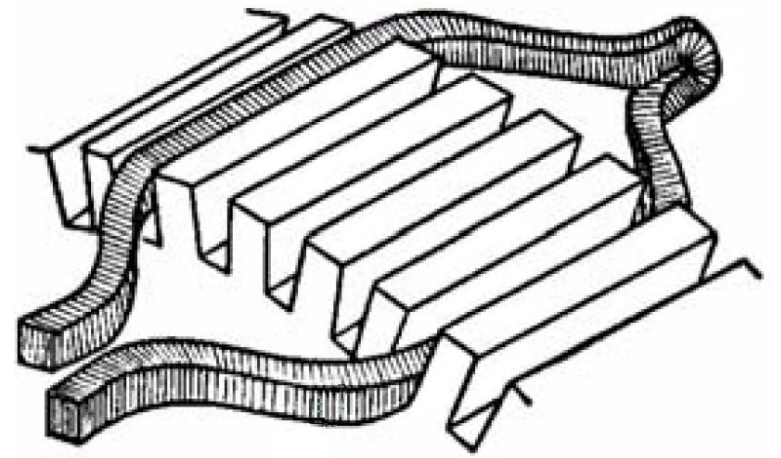
(2) **额定电压**：指额定状态下电枢出线端的电压，以V表示。

(3) **额定电流**：指电机运行在额定值时，线端的电流，以A表示。

(4) **额定转速**：指额定运行时转子的转速，以r/min表示。

(5) **额定励磁电压**（仅对他励电机）。

3.2 直流电机的电枢绕组

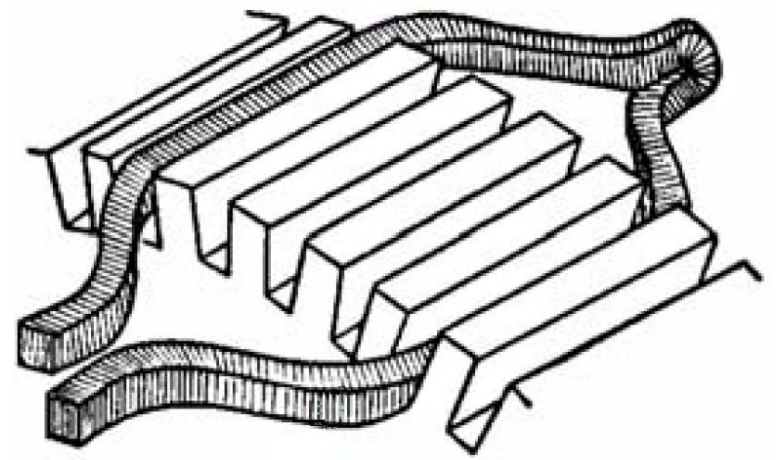


电枢绕组是直流电机实现机电能量转换的枢纽。

电枢绕组的构成原则是，能够产生足够的感应电动势，并允许通过一定的电枢电流，从而产生所需要的电磁转矩和电磁功率。



3.2 直流电机的电枢绕组



一、直流电枢绕组基本知识

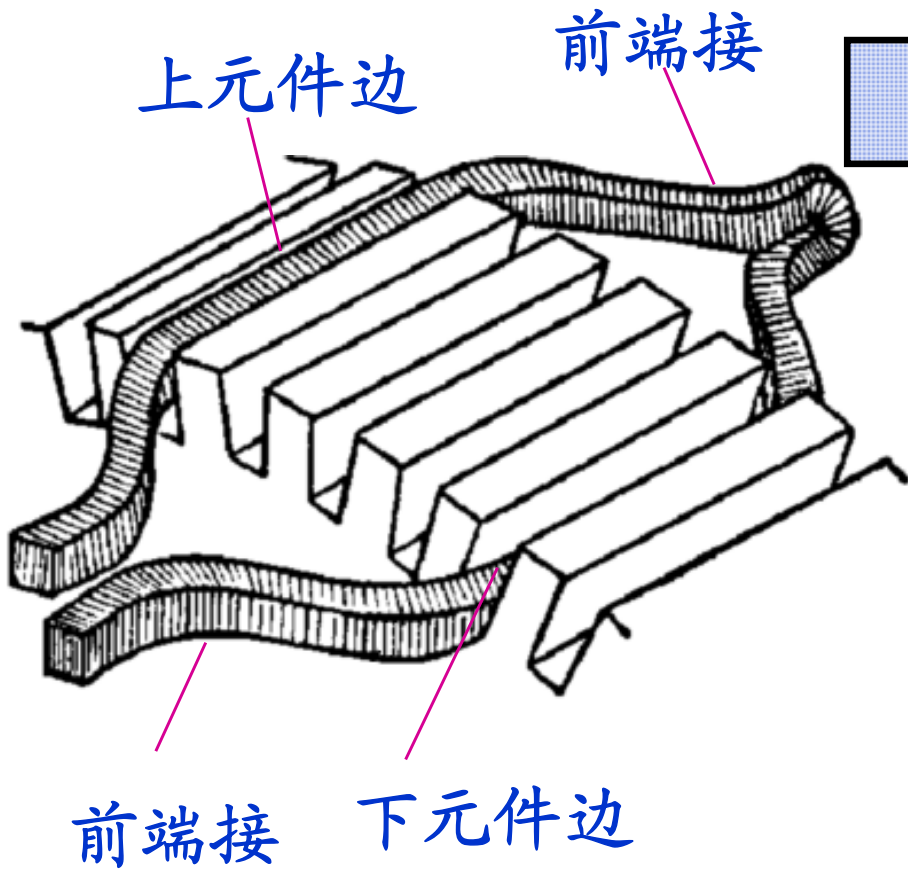
元件：构成绕组的线圈称为绕组元件，分单匝和多匝两种。

元件的首末端：每一个元件均引出两根线与换向片相连，其中一根称为首端，另一根称为末端。

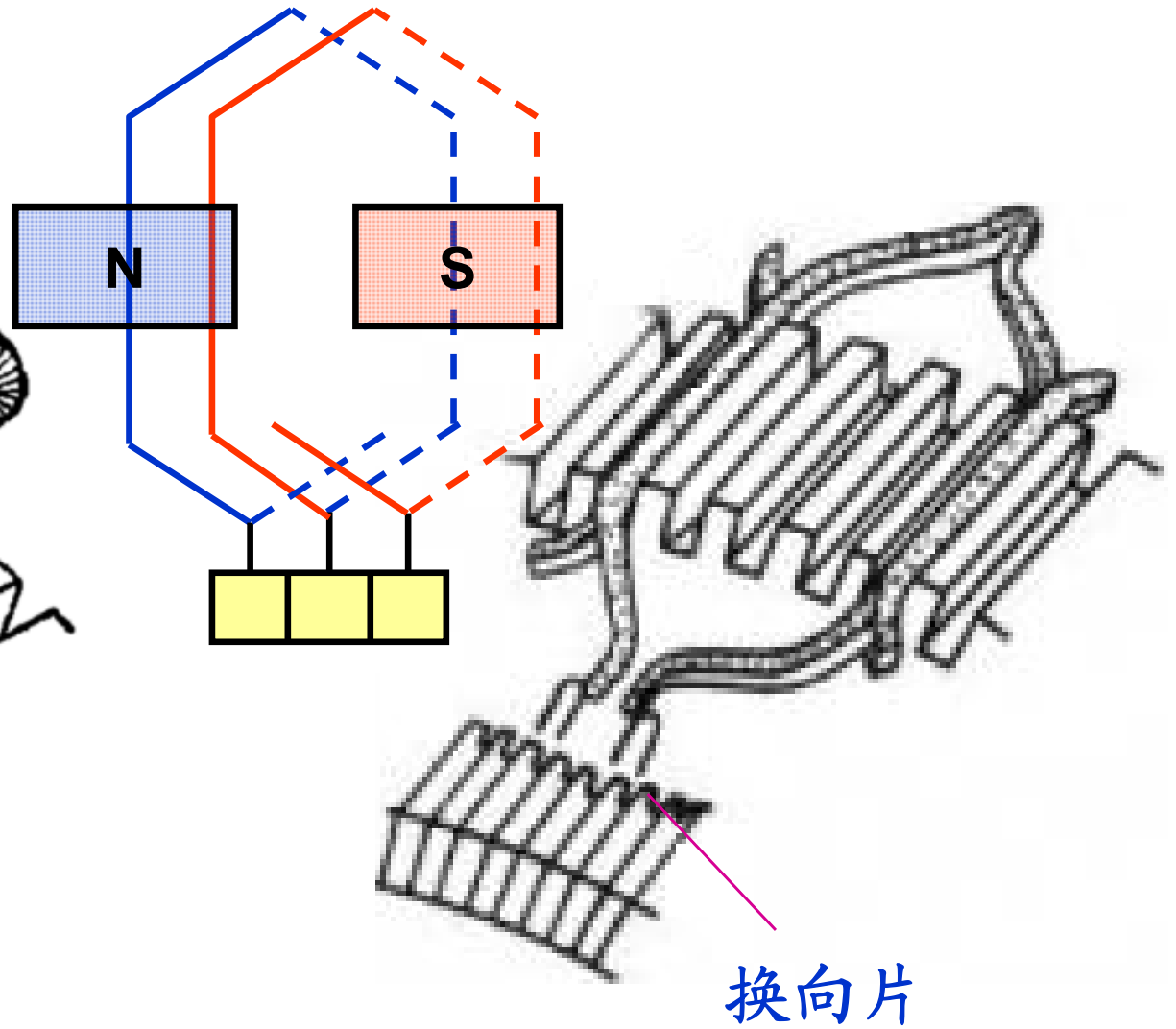
叠绕组：指串联的两个元件总是后一个元件的端接部分紧叠在前一个元件端接部分，整个绕组成折叠式前进。

波绕组：指把相隔约为一对极距的同极性磁场下的相应元件串联起来，象波浪式的前进。

元件的概念



电枢绕组的元件



线圈在槽中的安排

1. 元件数等于虚槽数
2. 每一个元件两个边接到两个换向片上，每一个换向片接两个元件的边，因此元件数等于换向片数

极距和节距的概念

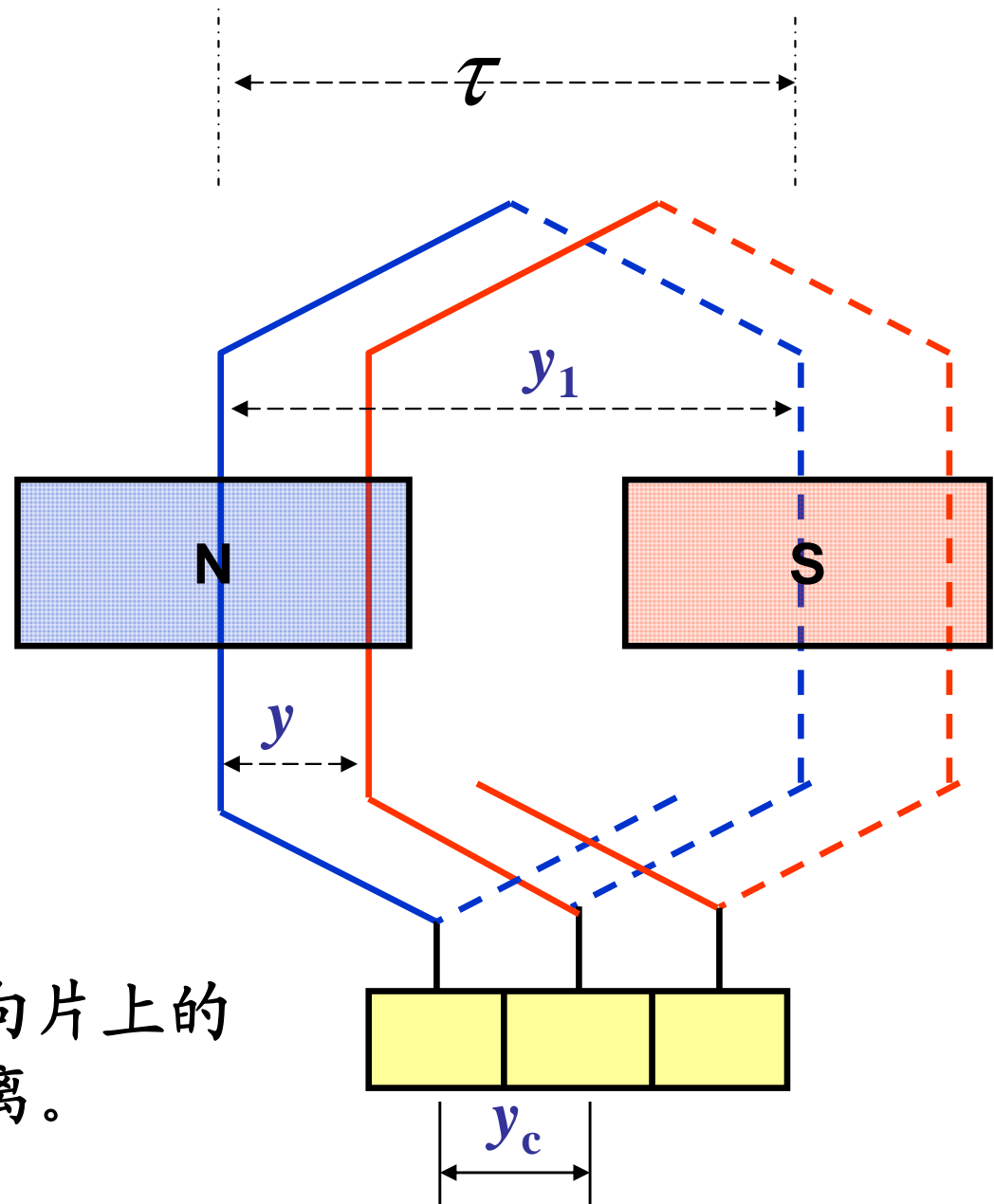
极距：相邻两个主磁极轴线沿电枢表面之间的距离，用 τ 表示。

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

第一节距 y_1 ：一个元件的两个有效边在电枢表面跨过的距离。

合成节距 y ：连接同一换向片上的两个元件对应边之间的距离。

换向器节距 y_c ：同一元件的两个出线端所接的两个换向片之间所跨的距离，称为换向器节距。



$$y_c = y$$

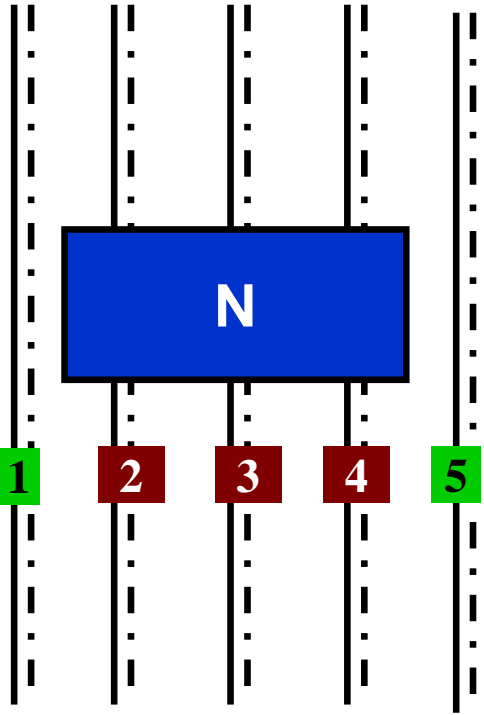
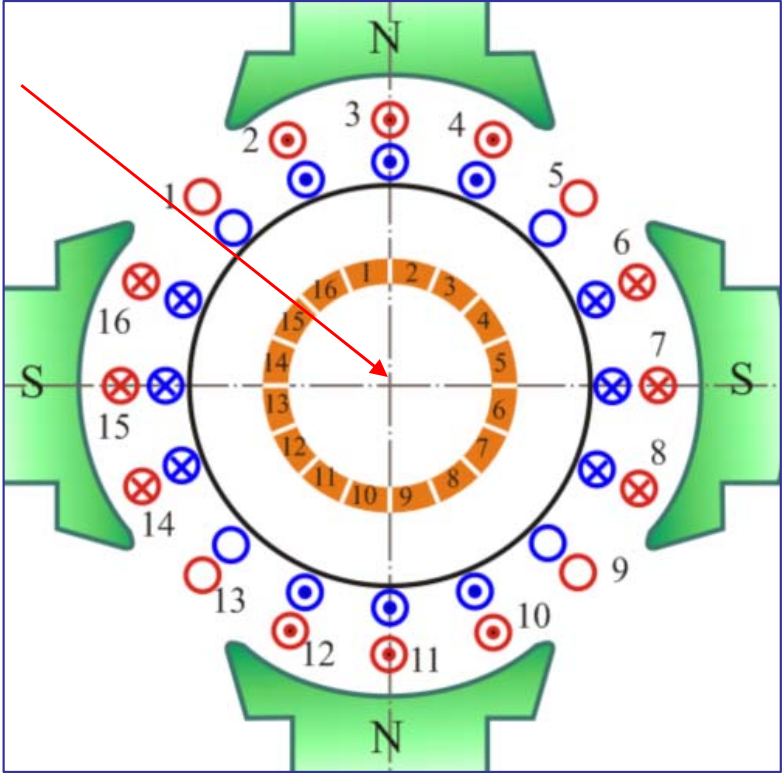
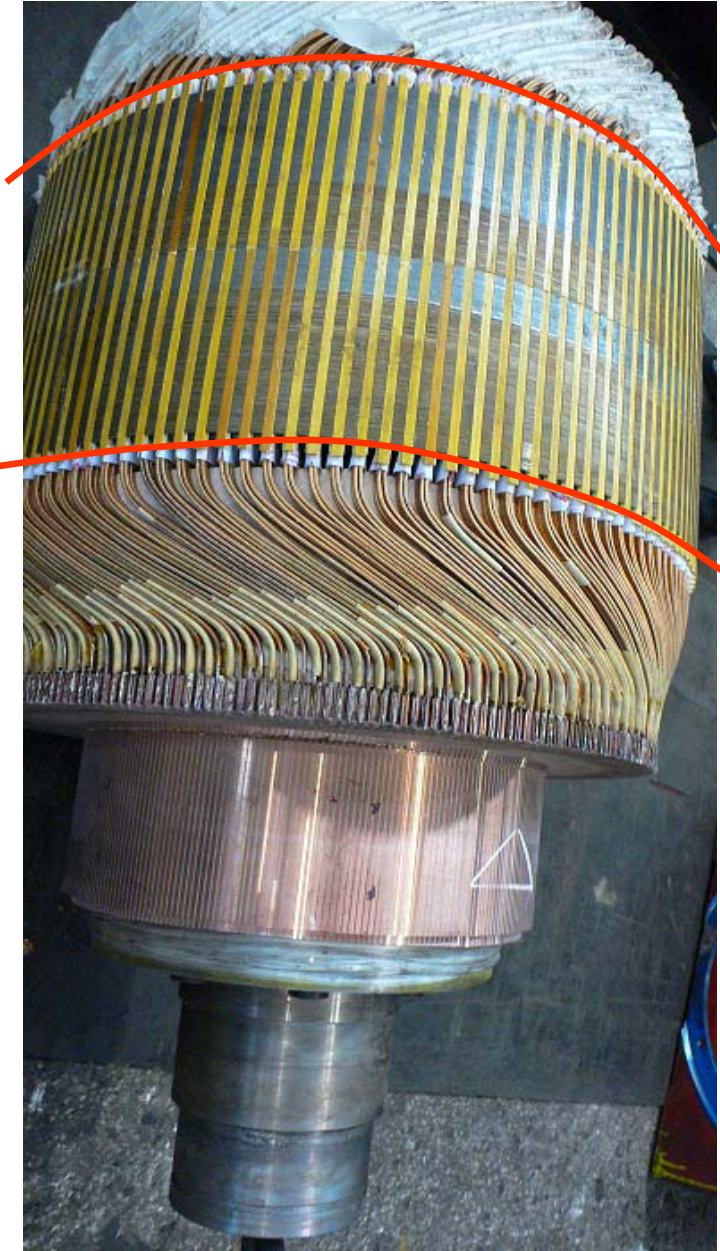
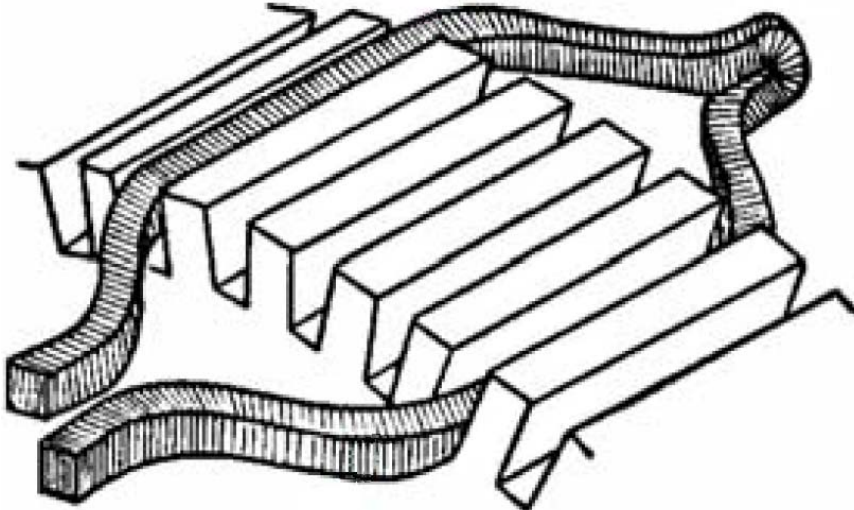
二、单叠绕组

单叠绕组的特点是相邻元件(线圈)相互叠压,合成节距与换向节距均为1, 即: $y = y_c = 1$ 。

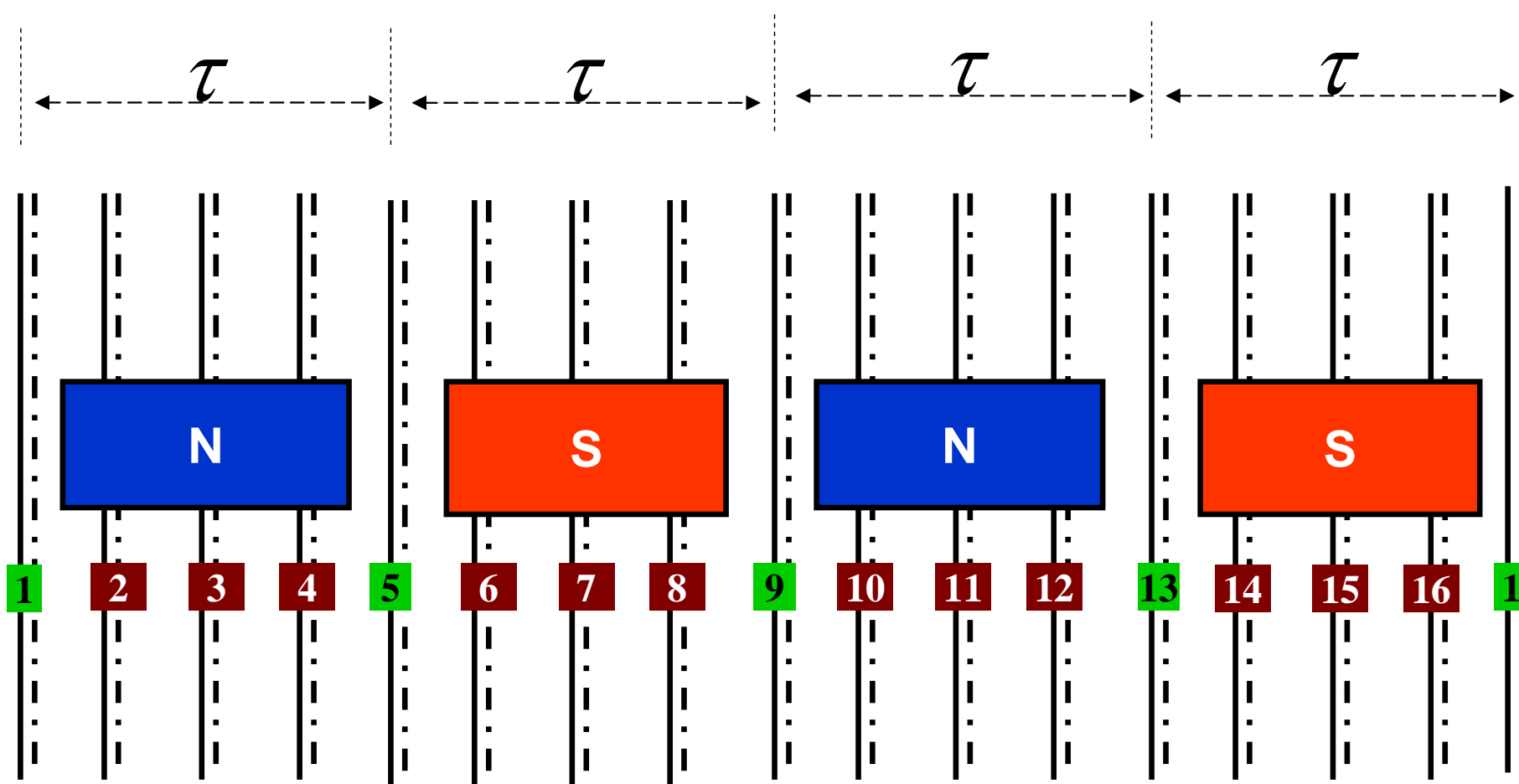
单叠绕组的的特点:

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 电枢电流等于各支路电流之和。

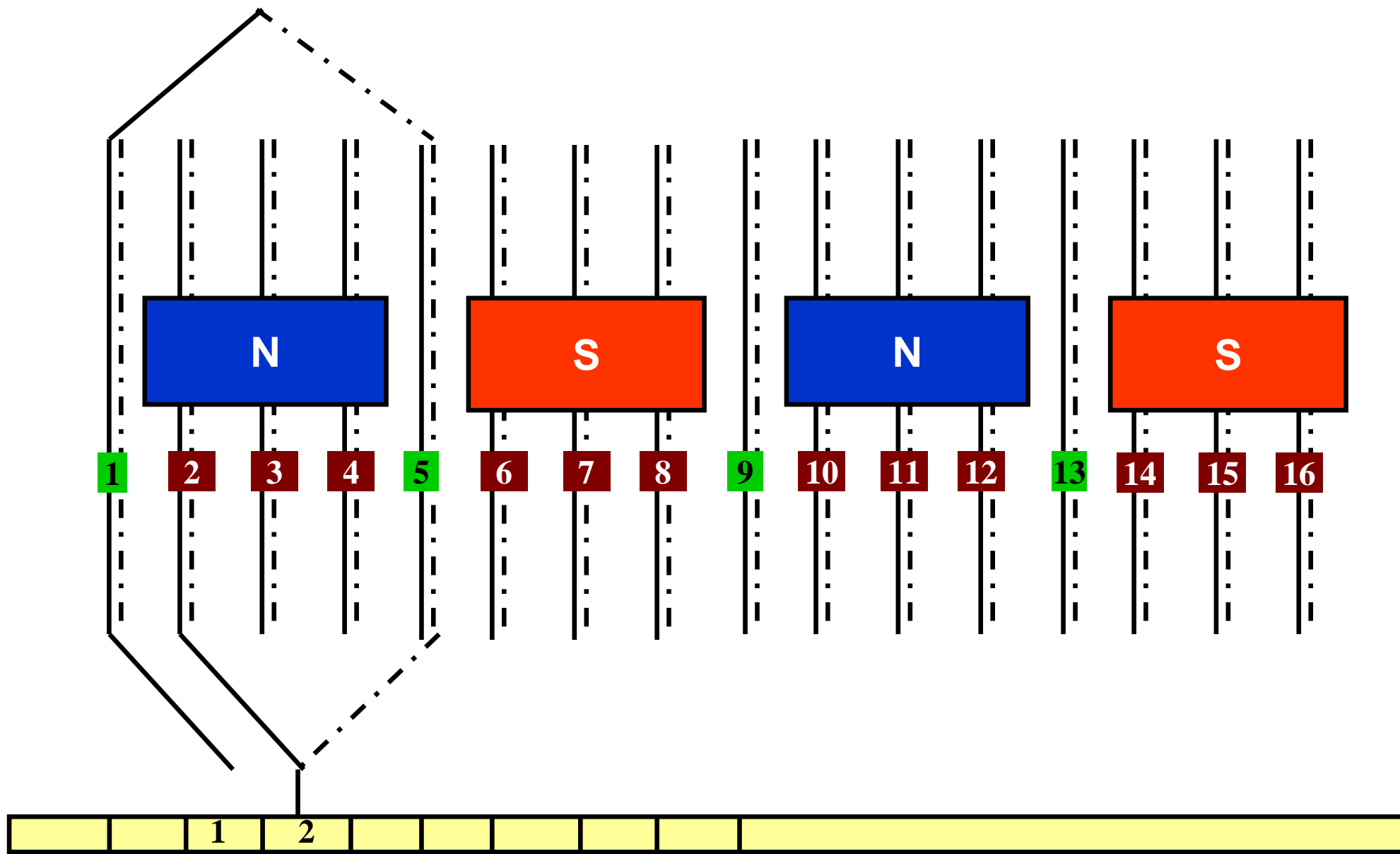
展开直流电机的转子



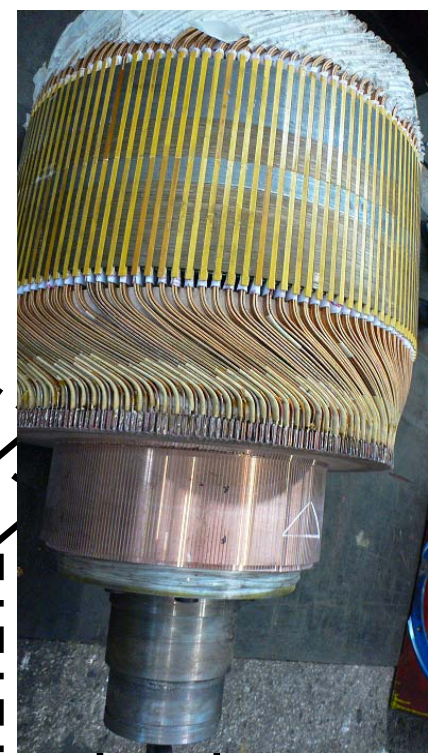
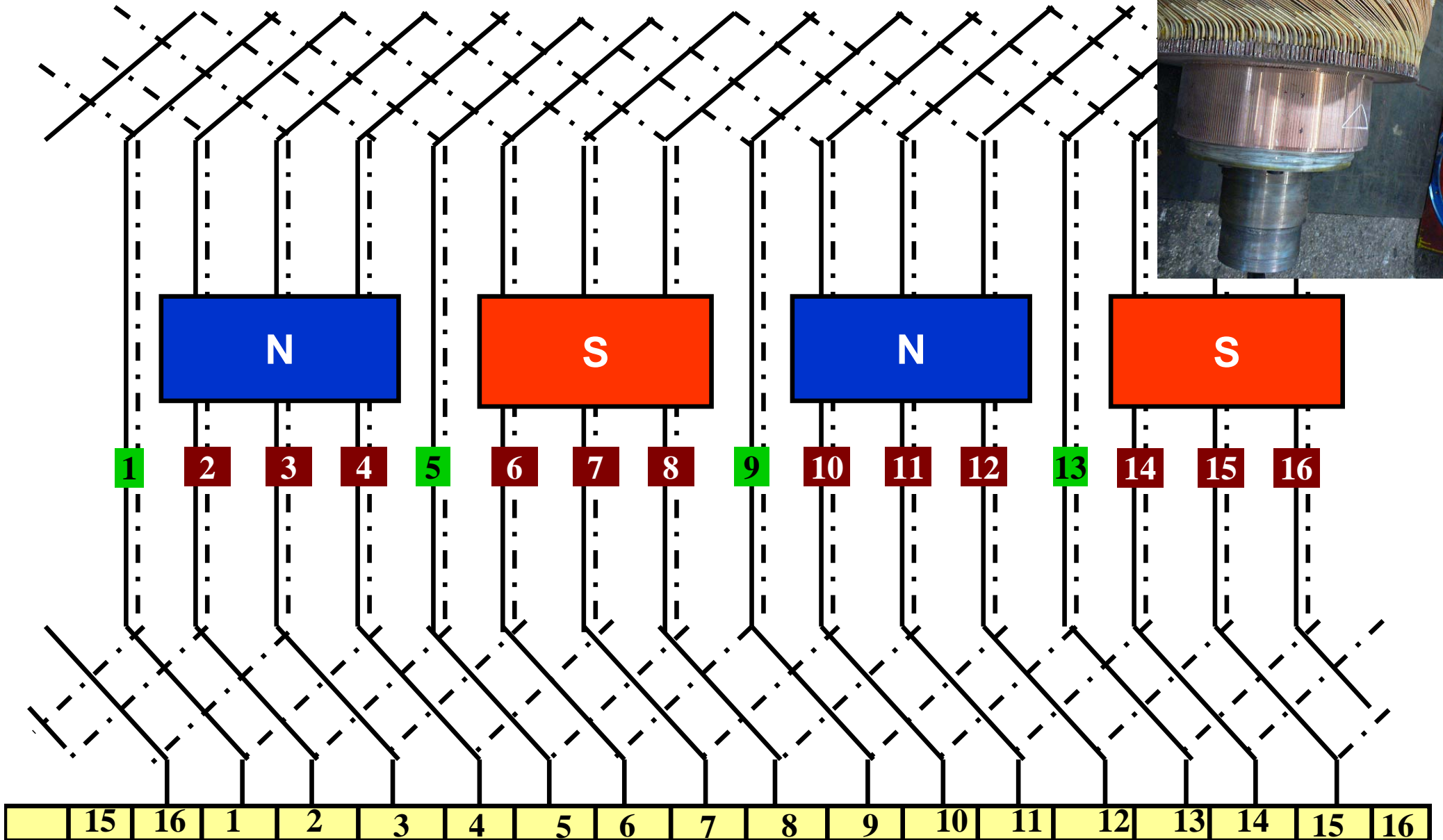
单叠绕组的设计



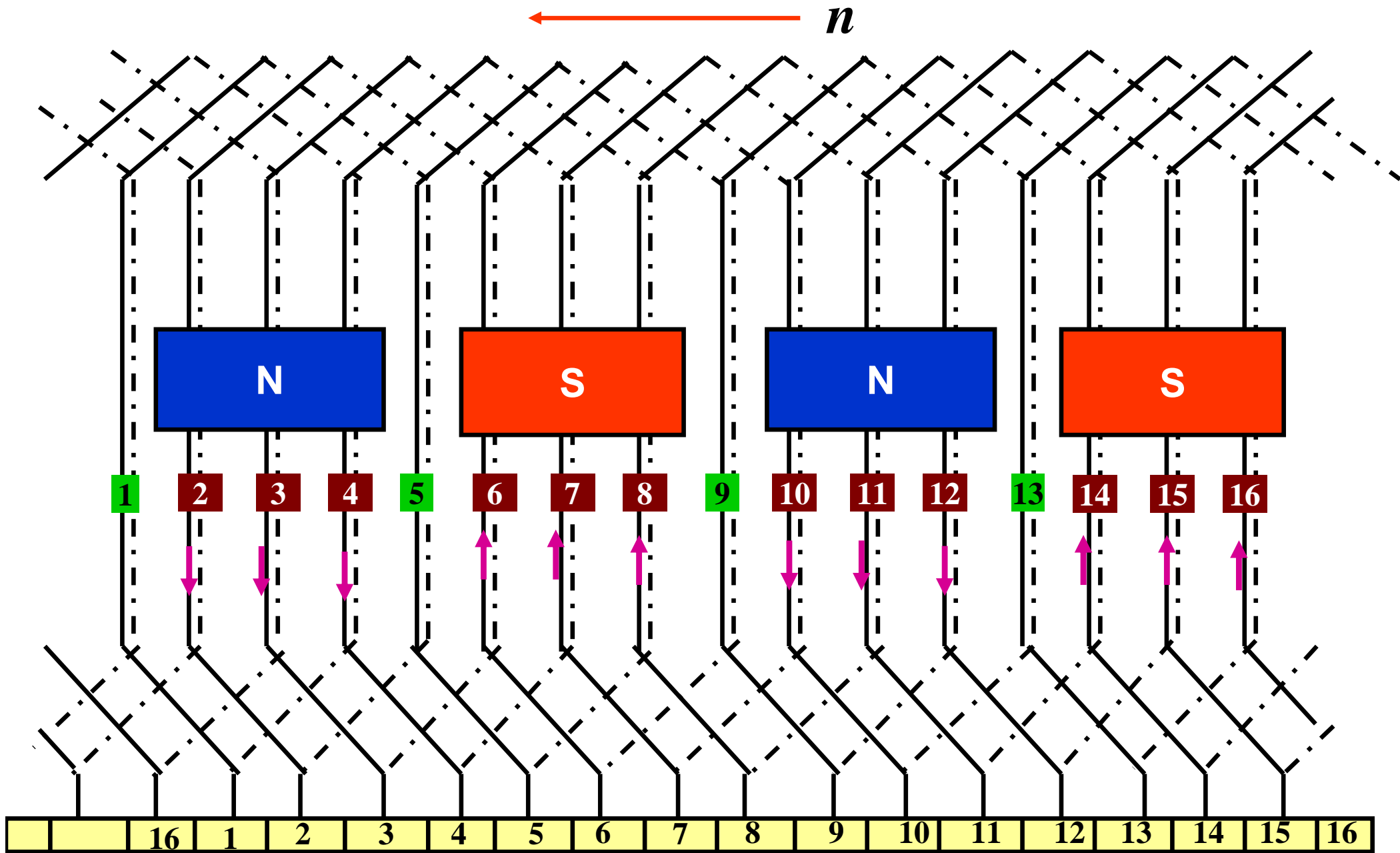
单叠绕组的设计

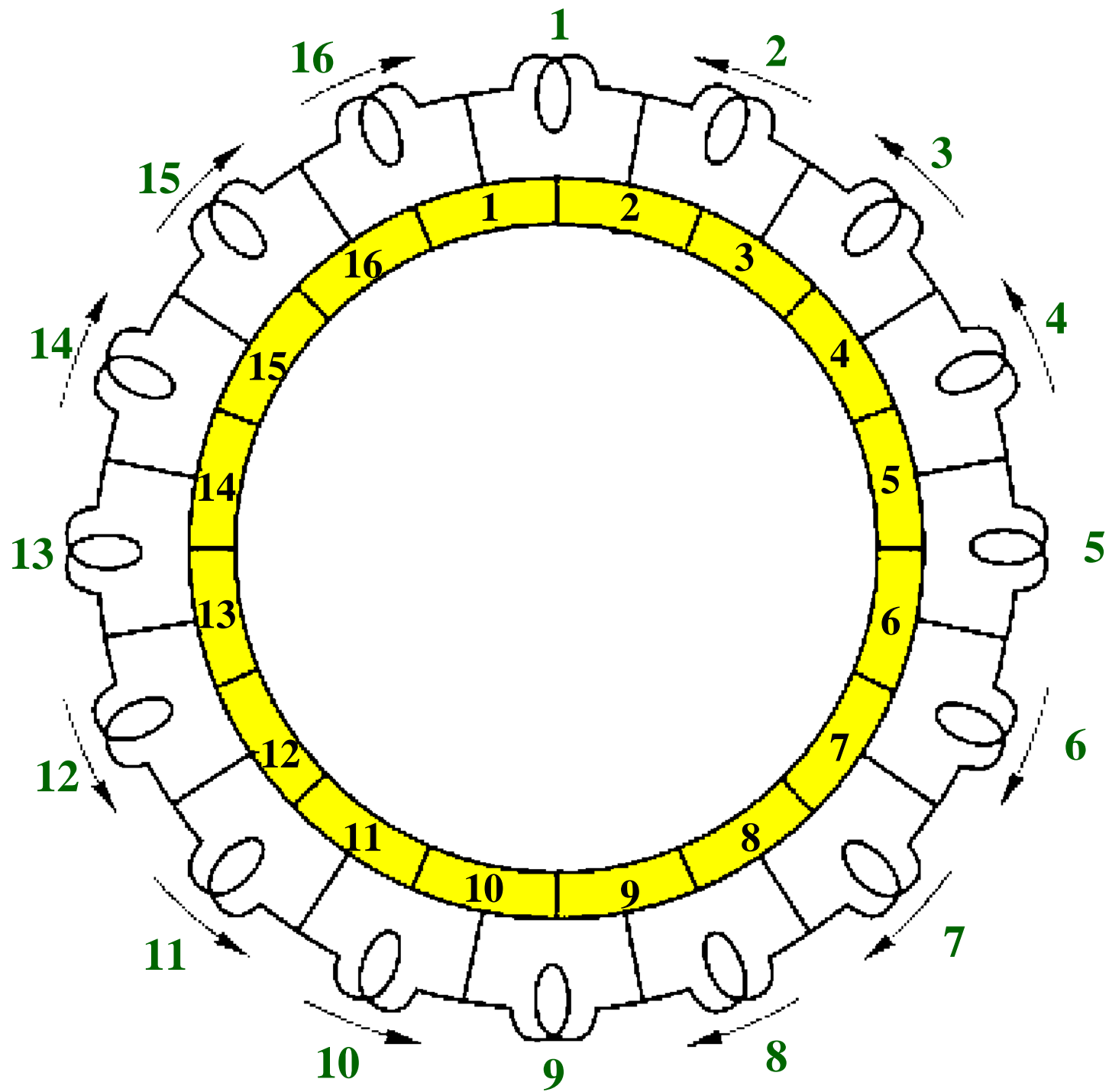


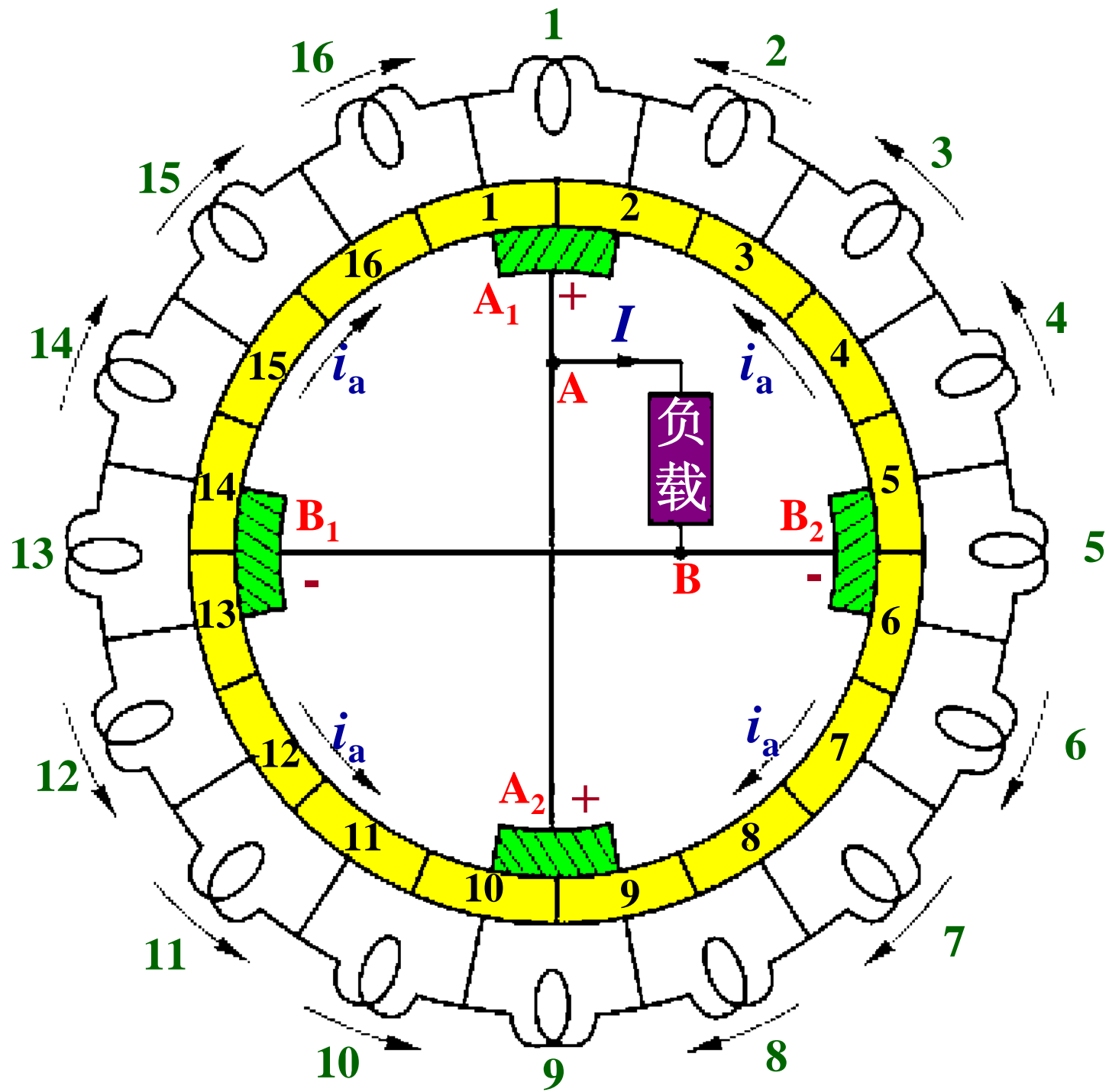
单叠绕组的设计



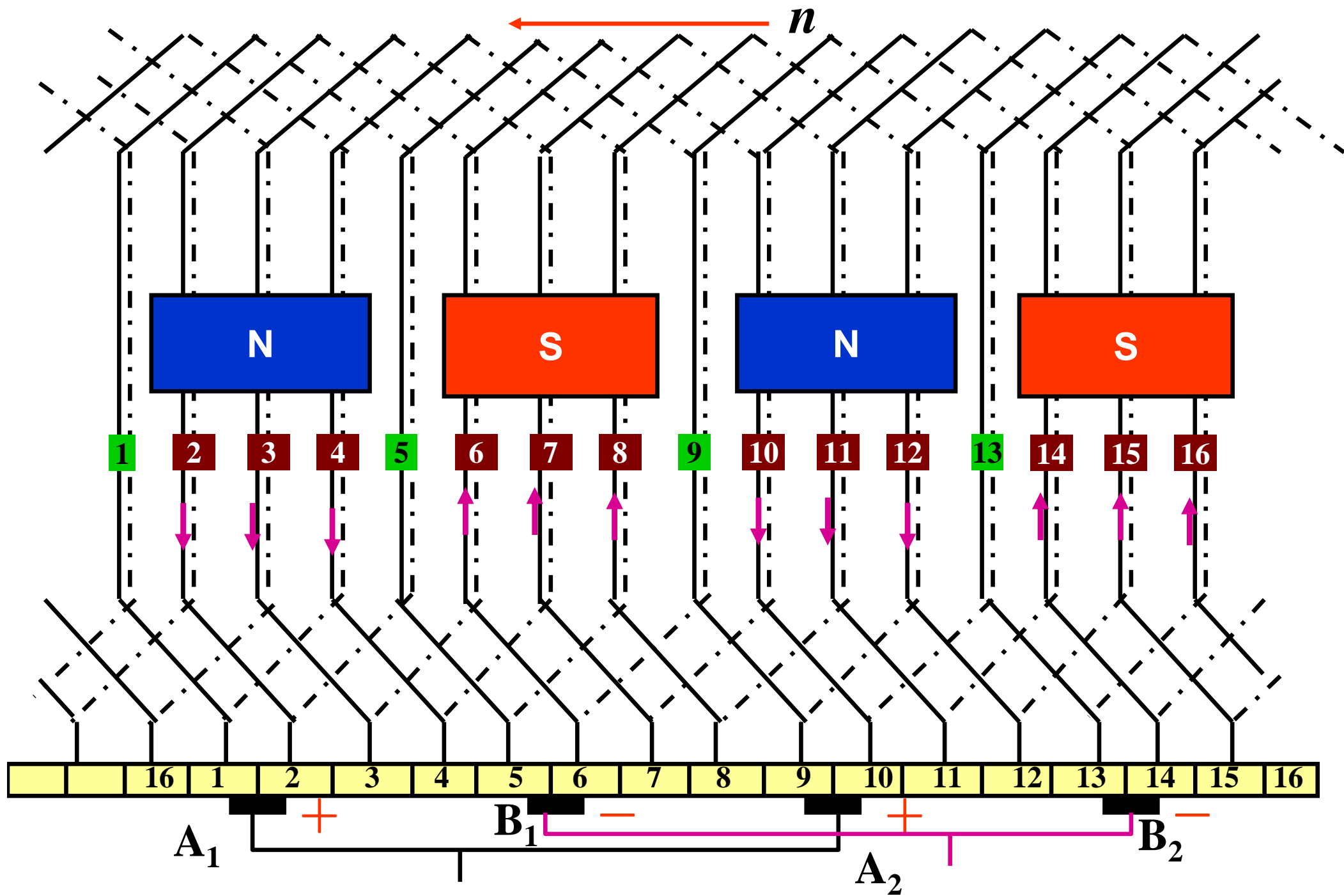
单叠绕组的设计，分析转子运动后的感应电动势

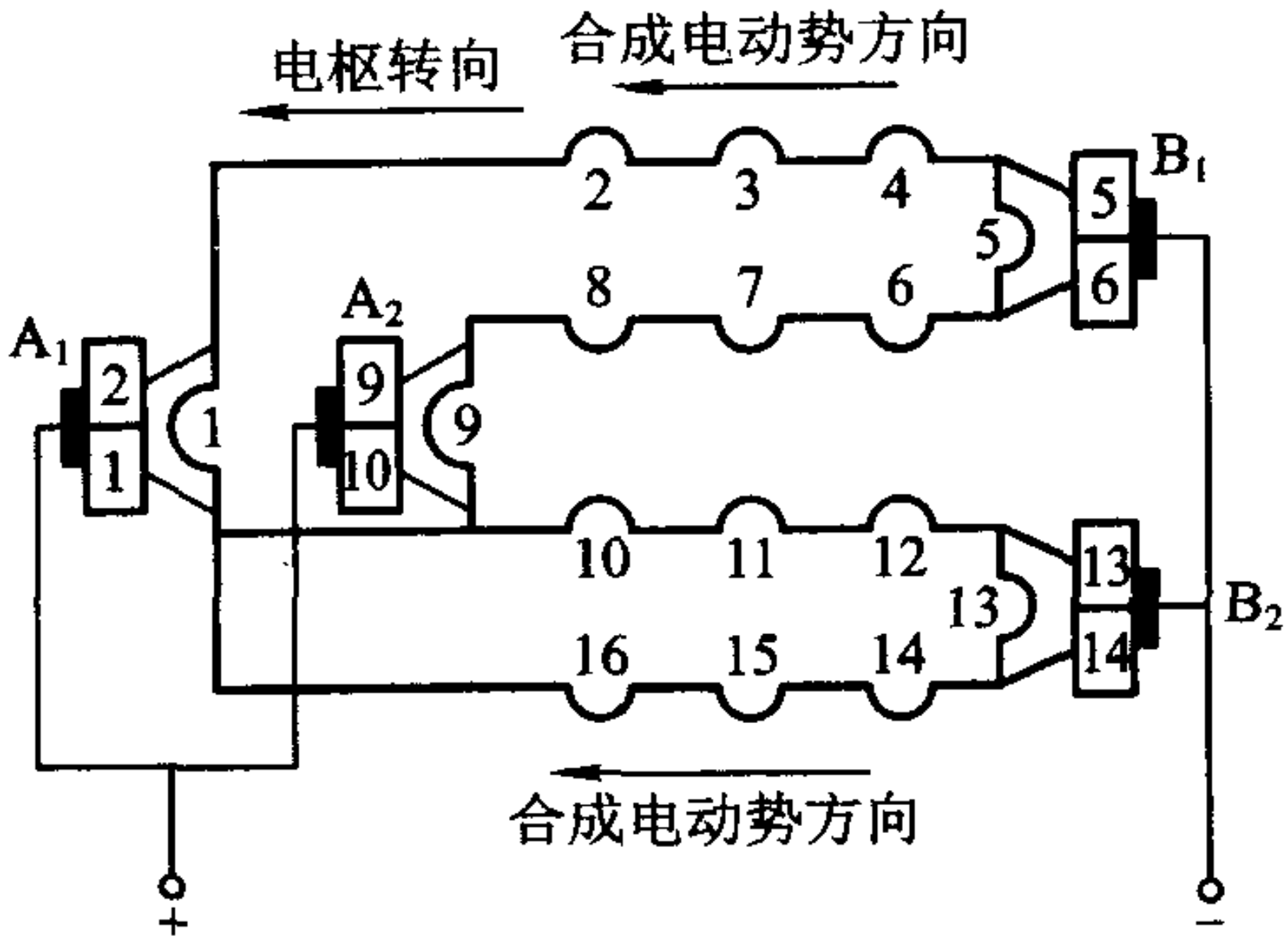






单叠绕组展开图





绕组的并联支路电路图，四条支路

支路对数 $a_{=} = 2$

小结

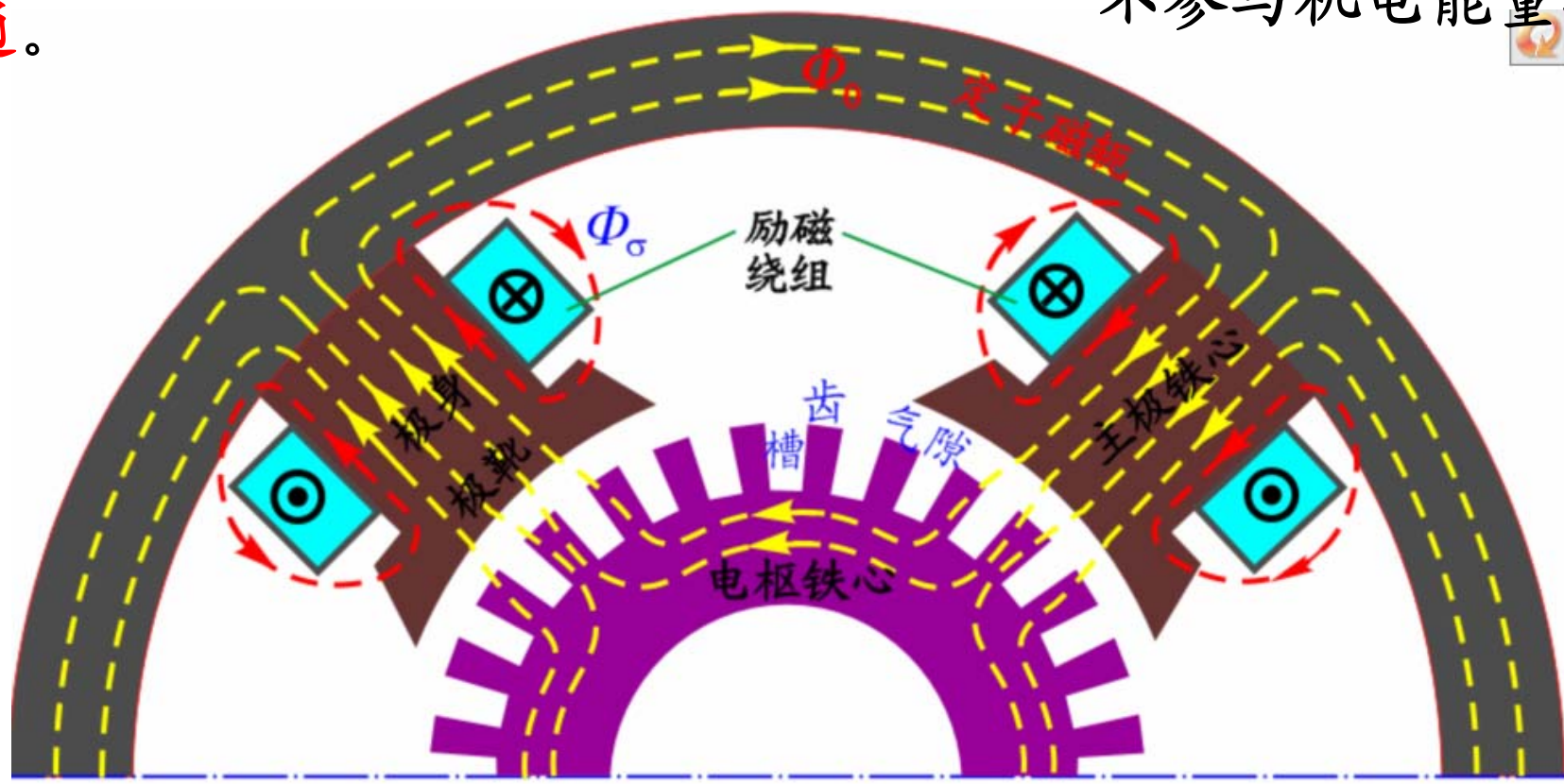
- 总的说来，直流电枢电路是一个有源多支路电路。
- 对电路内部来说，它是一个闭合回路，从外面观察，同极或者同极性下的元件串联后通过电刷组成多支路电路
- 当电枢旋转时，元件中感应出交流电势，通过换向器从电刷上引出的电动势则是直流电动势。
- 直流电机中电刷（固定的）是电枢表面导体中电流方向的分界线

3.3 空载和负载时直流电机的磁场

一、空载磁场也叫主磁场，是当电枢电流为零，仅由励磁电流建立的磁场，空载**磁场对称分布**

(a) **主磁通**：经过气隙，且同时与励磁绕组和电枢绕组交链的磁通，亦称为**工作磁通**。

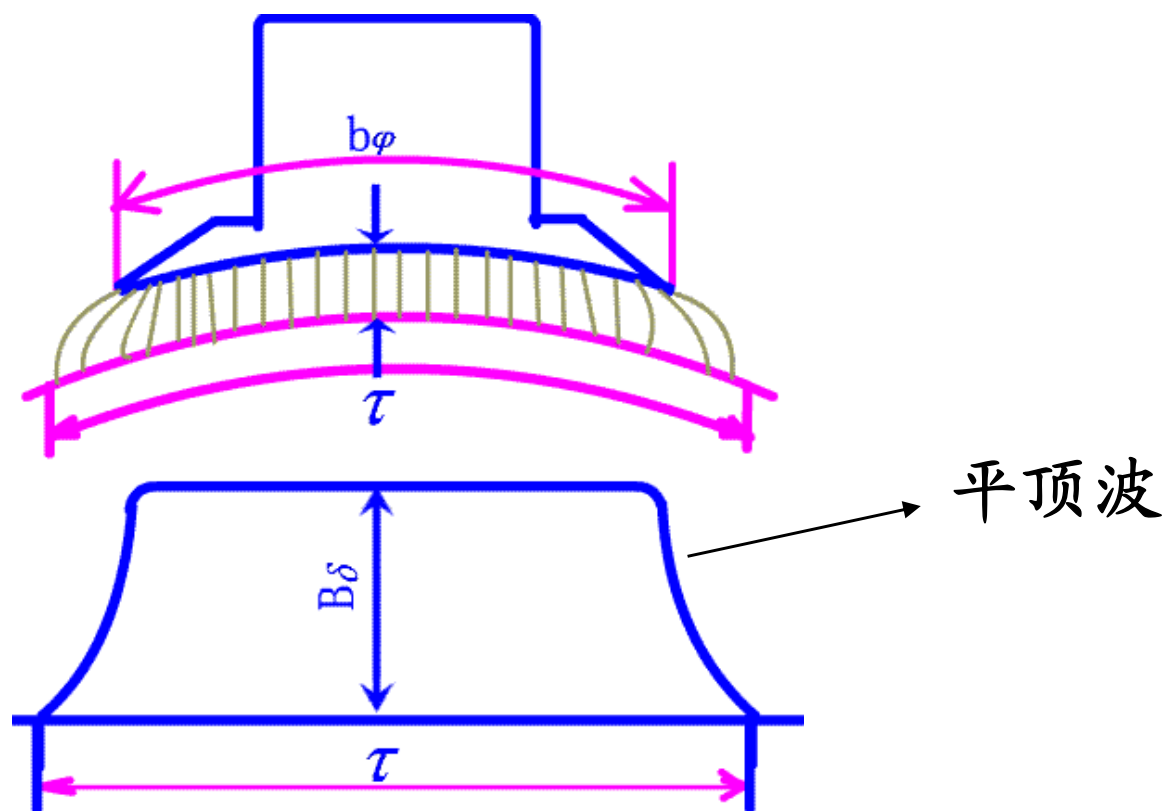
(b) **主极漏磁通**：不经过气隙，仅与绕组自身交链的磁通，其不参与机电能量转换



3.3 空载和负载时直流电机的磁场

一、空载气隙磁场

气隙磁场是产生感应电动势并进行能量转换的场所



气隙磁场在极靴下最大且磁密均匀分布，在极靴两侧逐渐减小

二、负载时的电枢磁动势和电枢反应

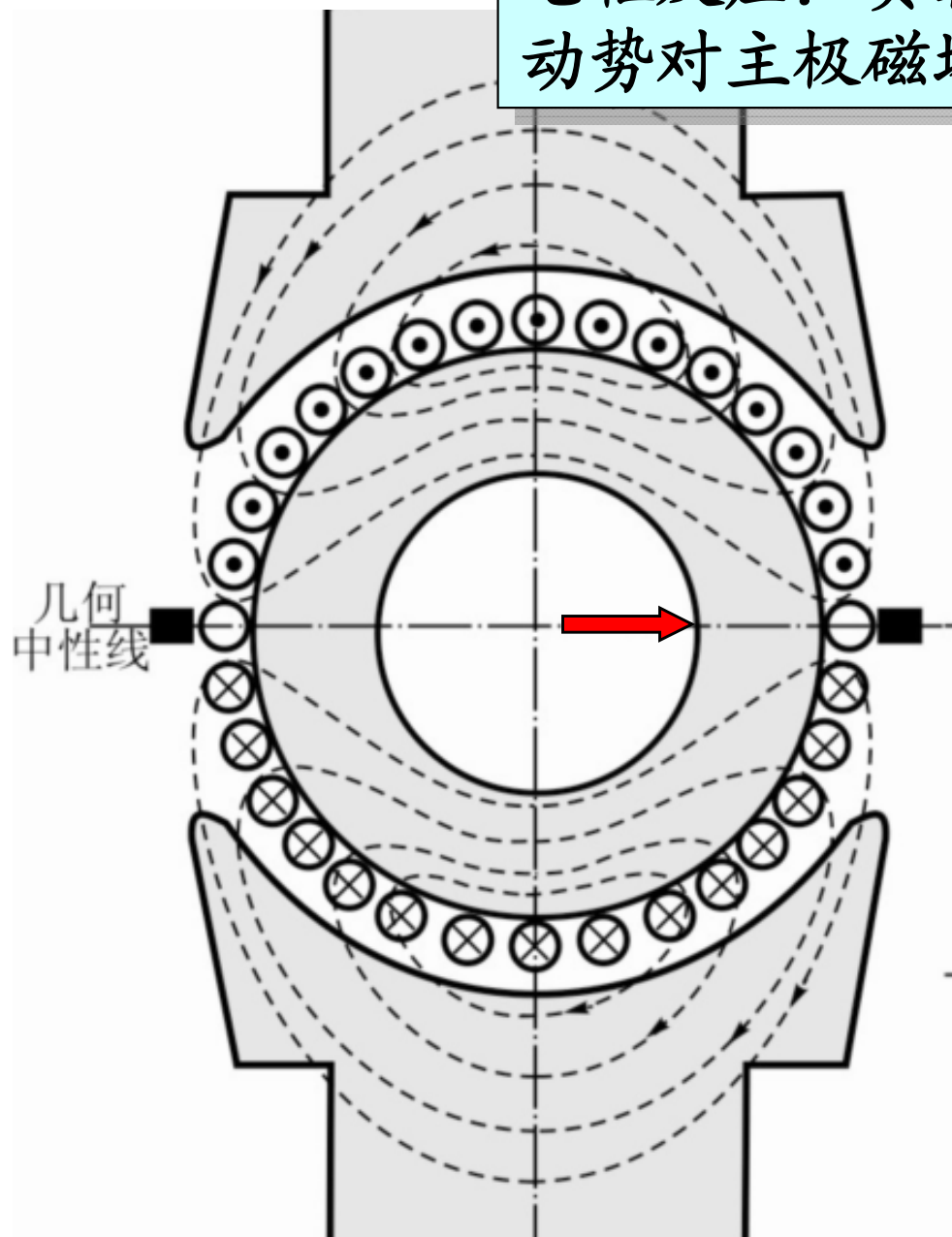
当电枢电流 I_a 不是零时（负载时电枢输出或输入电流），绕组中的电流也会产生磁场，称其为电枢磁场。

此时，气隙磁场就由主机磁动势和电枢磁动势两者合成的磁动势建立磁场。

由前面分析直流电机中电刷（固定的）是电枢表面导体中电流方向的分界线（电枢磁势的轴线总是与电刷轴线重合），因此电枢电流建立的电枢磁动势与电刷位置有关，下面分别讨论不同电刷位置时的电枢磁动势。

二、负载时的电枢磁动势和电枢反应

电枢反应：负载时电枢磁动势对主极磁场的影响



术语：

1. 直轴 (主极轴线)

2. 交轴

3. 极尖

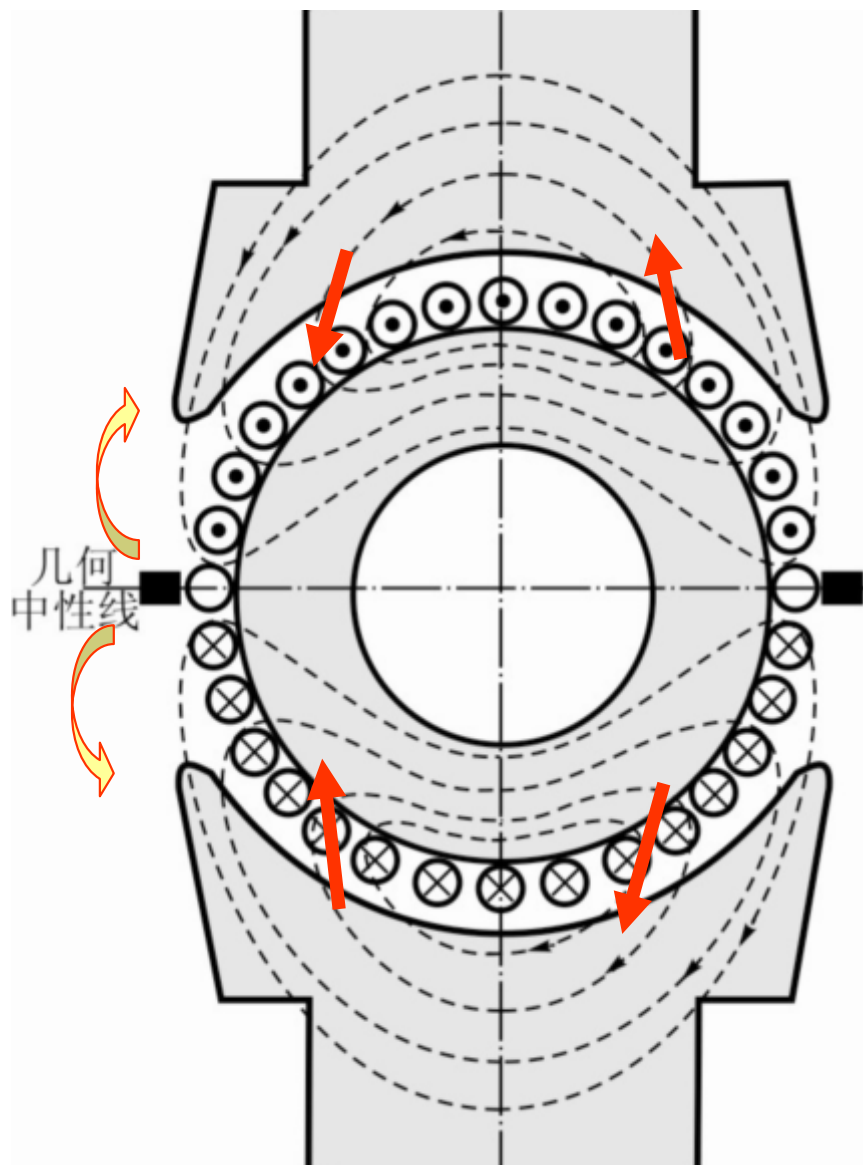
4. 极间

5. 极靴或者极鞍

6. 几何中性线

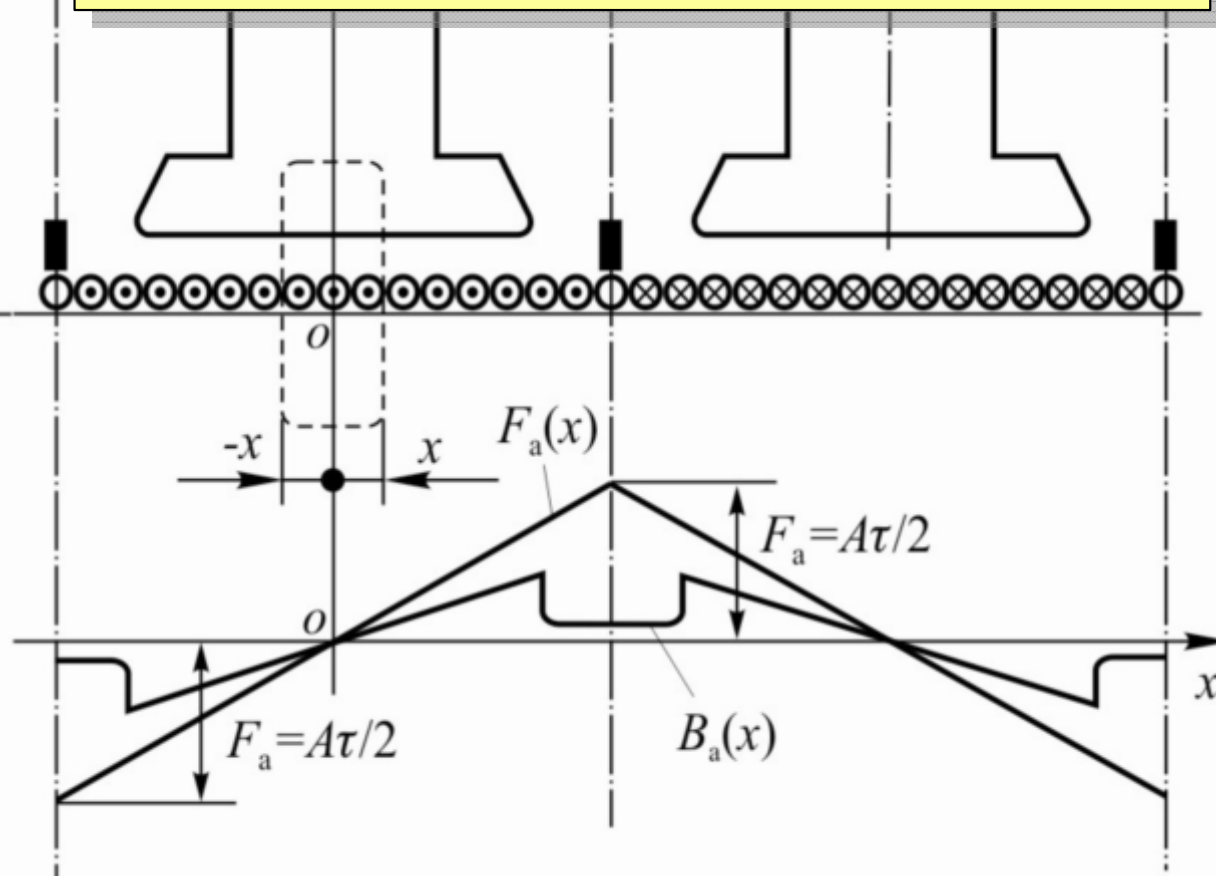
7. 物理中性线

注意：电刷的实际位置



$$A = \frac{Z_a i_a}{\pi D} \quad f_a(x) = Ax \quad -\frac{\tau}{2} \leq x \leq \frac{\tau}{2}$$

Z_a 电枢绕组总的导体数

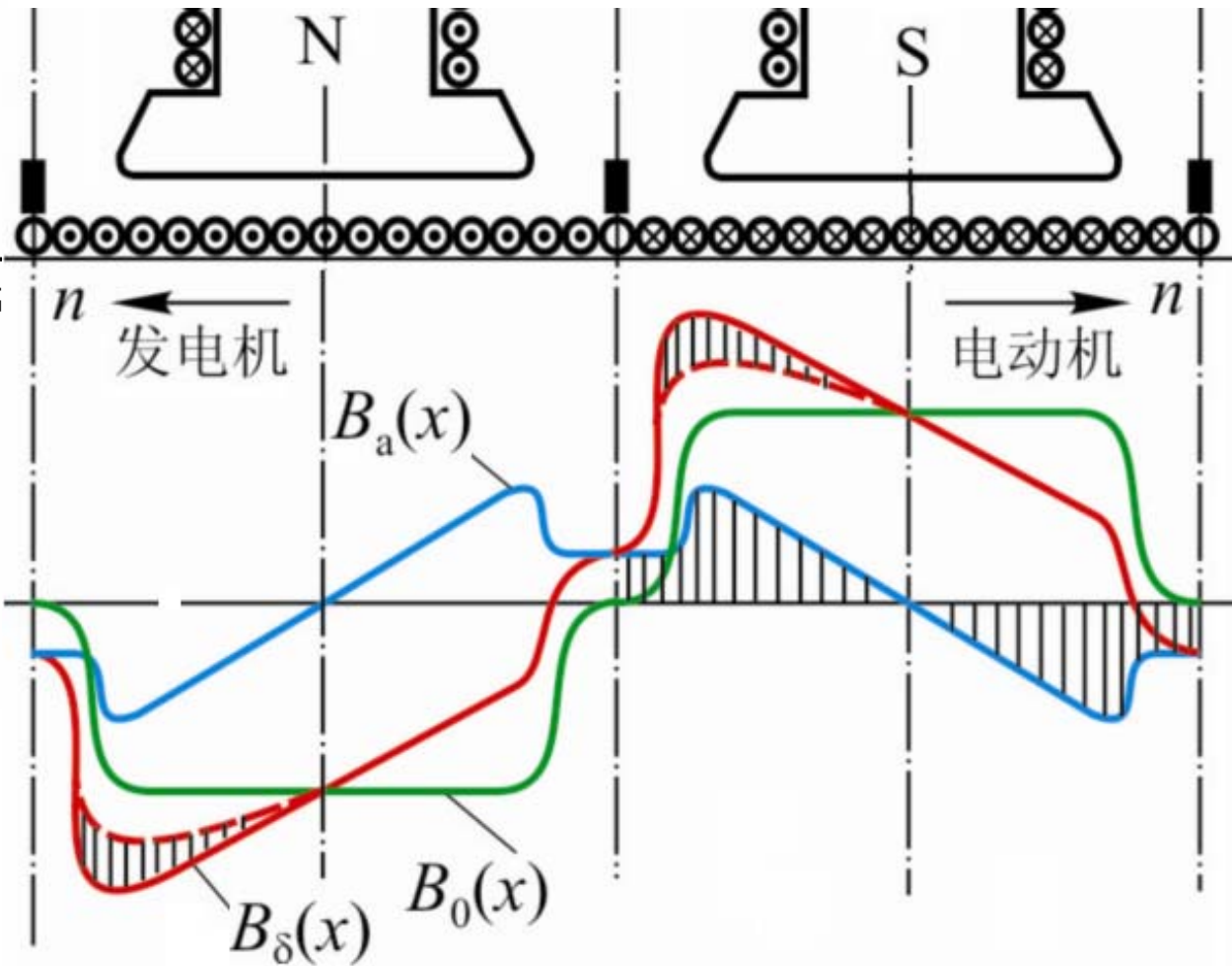
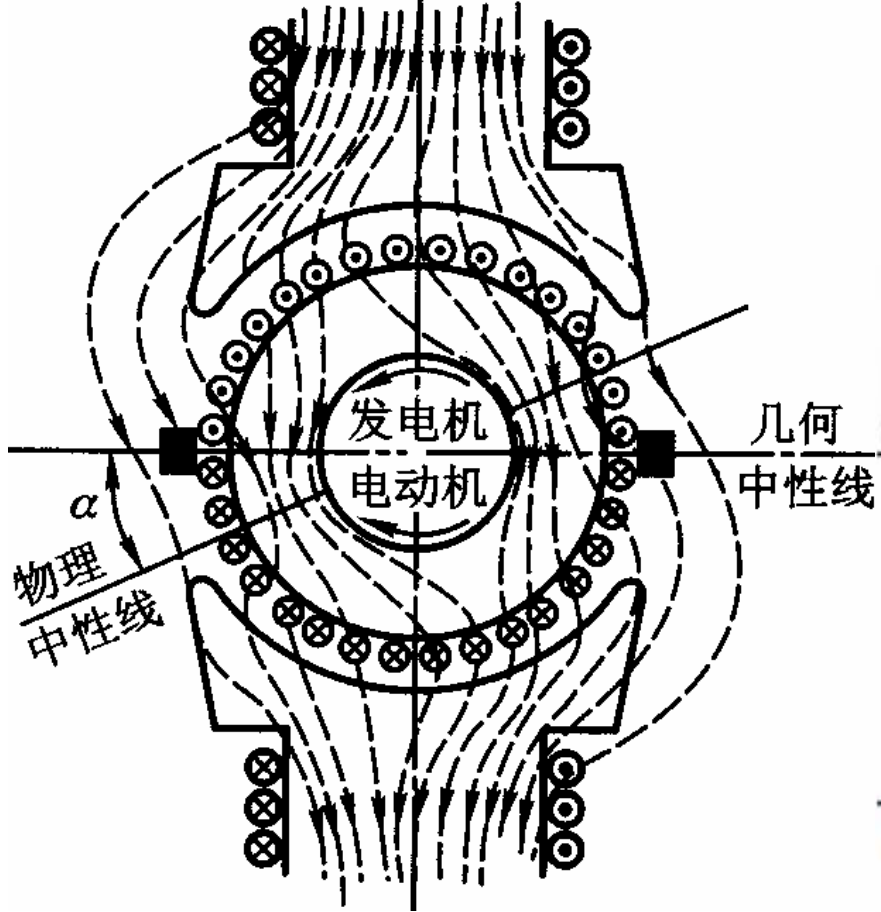


1. 坐标原点的选择

2. 忽略铁心上的磁压降

3. 电枢磁动势波形的特点

4. 电枢磁场磁通密度波形特点



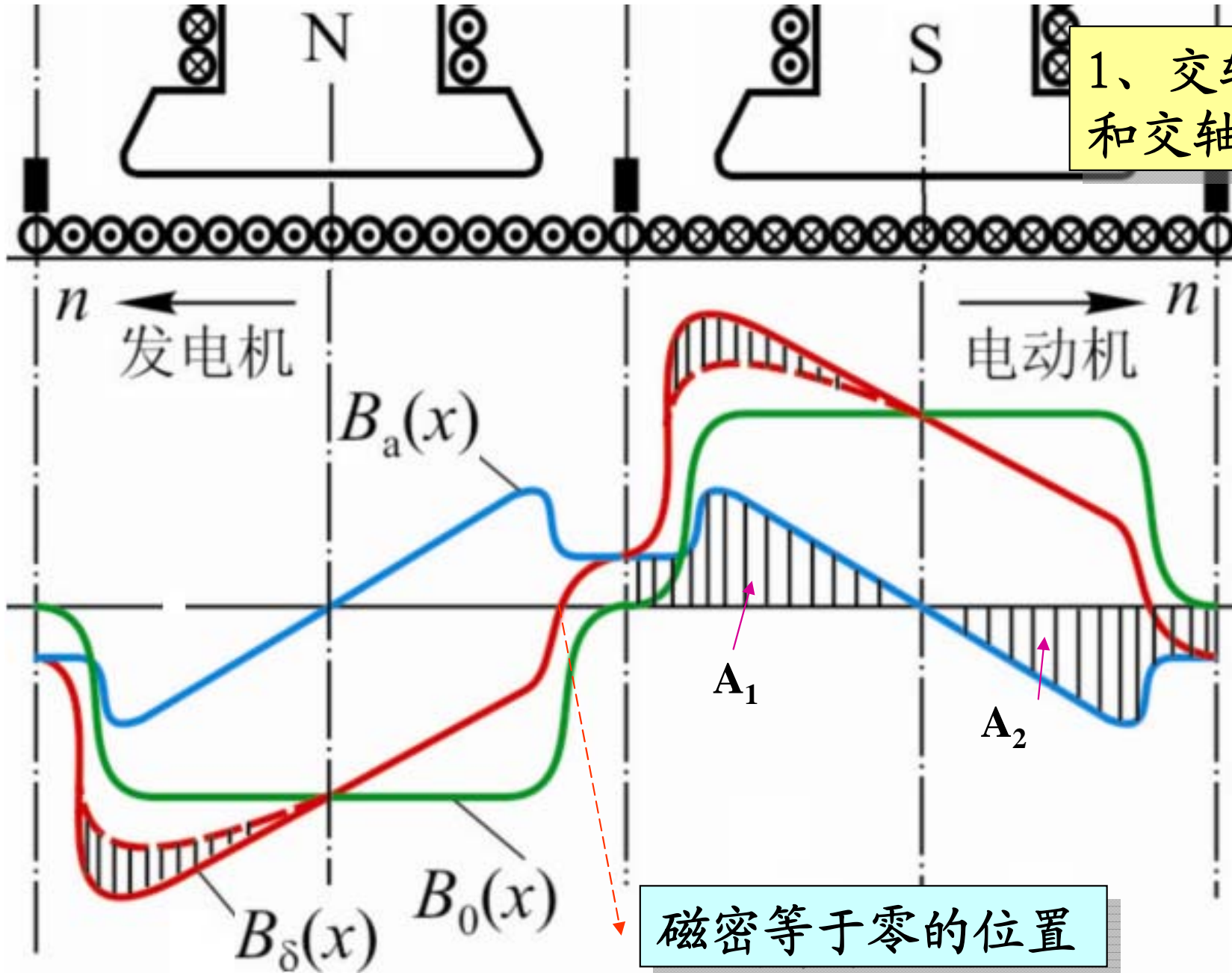
负载时合成磁场

物理中性线偏离几何中性线一个角度

站在发电机角度，合成磁场阻止电机旋转。

站在电动机角度，合成磁场驱使电机旋转。

1、交轴电枢磁动势和交轴电枢反应

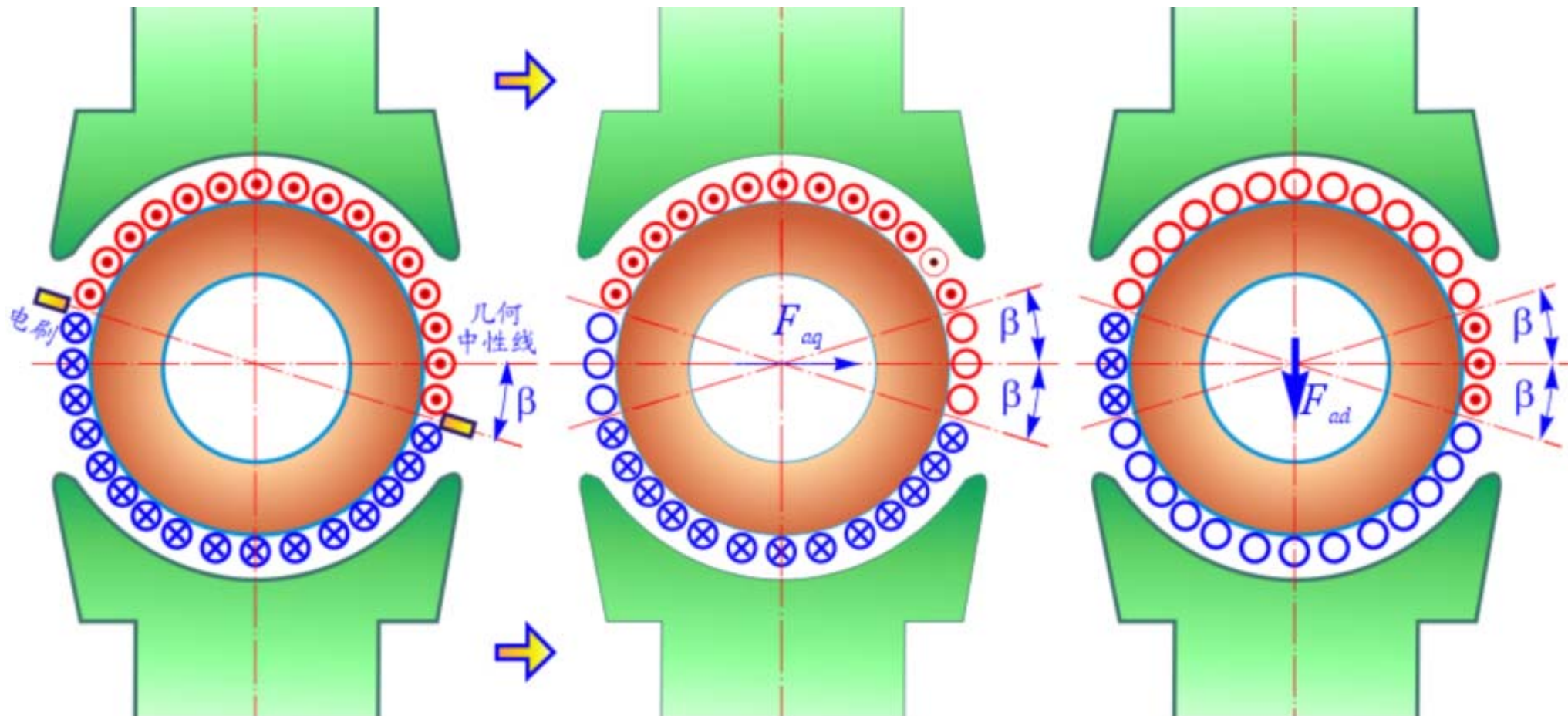


影响：
1) 引起气隙磁场畸变，使电枢表面磁密等于零的位置（物理中性线）偏离几何中性线。

磁密等于零的位置

2)、不计饱和时，交轴电枢反应既无增磁、亦无去磁用；计及饱和时，交轴电枢反应具有一定的去磁作用。

2. 电刷偏离



电枢磁动势

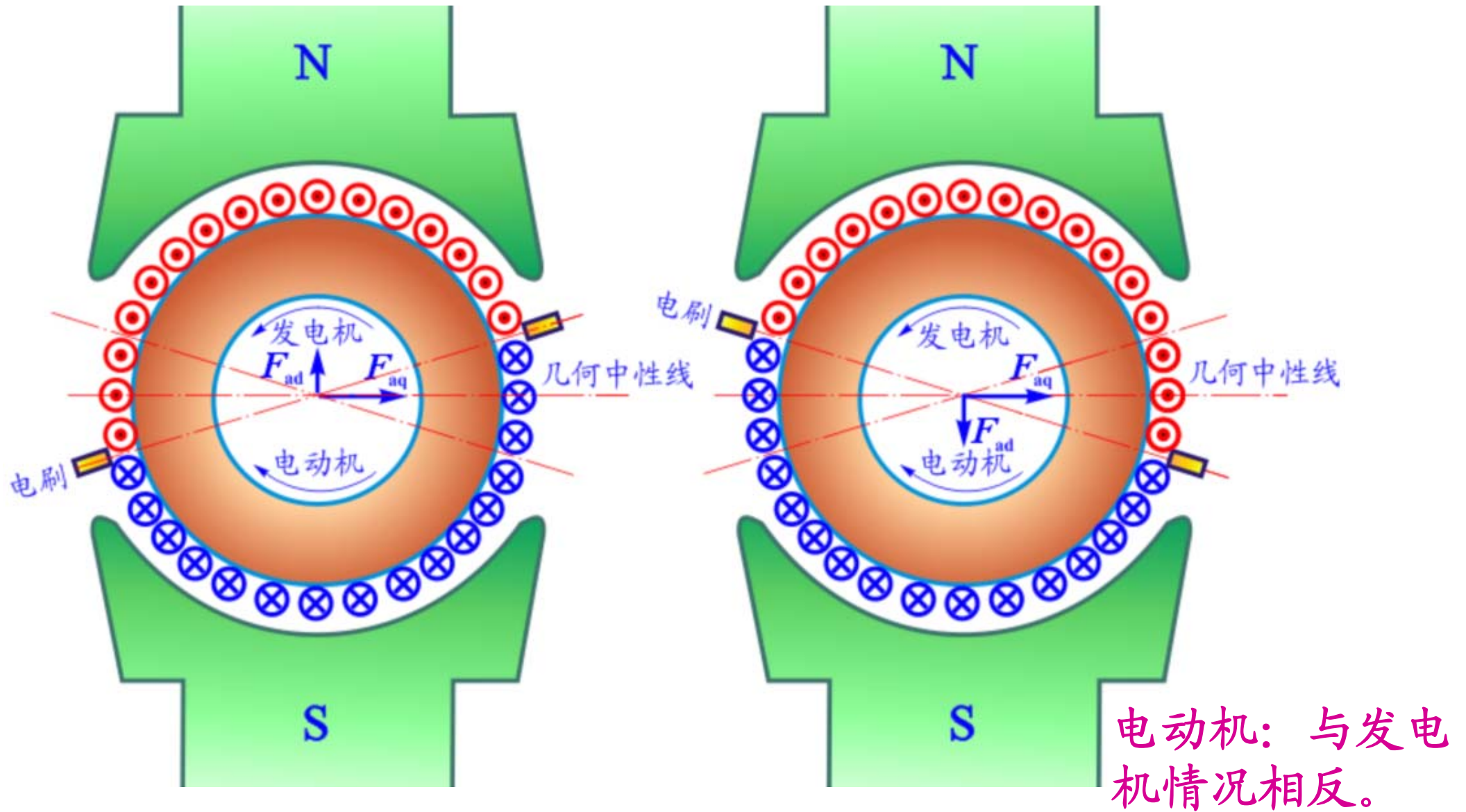
交轴分量

直轴分量

交轴电枢磁动势 $F_{aq} = A\left(\frac{\tau}{2} - b_{\beta}\right)$

直轴电枢磁动势 $F_{ad} = Ab_{\beta}$

2、直轴电枢磁动势和直轴电枢反应



发电机：电刷顺电枢旋转方向移动，电枢反应为去磁；
电刷逆电枢旋转方向移动，电枢反应为增磁。

小结

- 空载时直流电机的磁场
 - 由励磁磁势单独激励产生
 - 电机磁场分为漏磁场与气隙磁场两部分
 - 气隙磁场在极靴下最大且磁密均匀分布，在极靴两侧逐渐减小
- 负载时直流电机的磁场
 - 电枢反应
 - 交轴电枢反应的性质
 - 直轴电枢反应的性质
 - 电枢反应的大小和性质与：负载大小、电刷位置、电机运行状态以及磁路饱和程度等因素有关

3.4 直流电机的电枢电动势和电磁转矩

3.4 1. 直流电机的电枢电动势

产生: 电枢旋转时, 主磁场在电枢绕组中感应的电动势简称为电枢电动势。

大小:
$$E_a = \frac{pZ_a}{60a} \Phi n = C_e \Phi n$$

其中: $C_e = \frac{pZ_a}{60a}$ 为电机的结构常数 电动势常数

可见, 直流电机的感应电动势与电机结构、气隙磁通及转速有关

性质: 发电机——电源电势 (与电枢电流同方向);
电动机——反电势 (与电枢电流反方向)。

3.4 2.直流电机的电磁转矩

产生: 电枢绕组中有**电枢电流**流过时, 在磁场内受**电磁力**的作用, 该力与**电枢铁心半径之积**称为电磁转矩。

大小:

$$T_e = \frac{p}{2\pi} \frac{Z_a}{a_{\pm}} \Phi I_a = C_T \Phi I_a$$

其中

$$C_T = \frac{p}{2\pi} \frac{Z_a}{a_{\pm}}$$

为电机的转矩常数, 有 $C_T = 9.55C_e$

制造好的直流电机其电磁转矩与**气隙磁通**及**电枢电流成正比**

性质: 发电机——**制动** (与转速方向**相反**);
电动机——**驱动** (与转速方向**相同**)。