



自动控制实践I

# 直流电机的原理与基本结构

哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 解伟男

# 上节回顾

## ○ 磁基本常识

- n 磁通密度：表示磁场强弱的物理量
- n 磁力线：人们假象的曲线，以形象描述磁场分布
- n 磁通：通过磁场中某一曲面的磁感应线数
- n 磁场强度：计算磁场时所引用的一个物理量
- n 磁导率：用来表示物质导磁能力大小的物理量
- n 磁通密度与磁场强度的区别

## ○ 磁路

- n 安培环路定理：

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \sum I$$

- n 磁路欧姆定律

$$F_m = \Phi R_m$$

- n 磁路基尔霍夫第一定律

$$\oiint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

- n 磁路基尔霍夫第二定律

$$Ni = \sum_{i=1}^n H_i l_i = \sum_{i=1}^n \Phi_i R_{mi}$$

# 上节回顾

## ○ 电磁感应定律

n 感应电动势

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}$$

$$e = Blv$$

## ○ 电磁力与电磁转矩

n 磁场中载流导体所受的电磁力

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$$

$$F = BIl$$

n 圆柱面磁场间的力矩

$$T = K \sin pq$$

# 上节回顾

## ○ 磁性材料

- n 磁性物质：顺磁物质，抗磁物质，铁磁物质
- n 铁磁物质的磁化
- n 磁化曲线：起始磁化曲线、磁滞回线、基本磁化曲线
- n 软磁材料与硬磁材料
- n 铁心损耗：磁滞损耗、涡流损耗

# 目 录

---

- 1 电机概述
- 2 直流电机工作原理
- 3 直流电机结构
- 4 直流电机的绕组
- 5 直流电机的励磁方式及磁场
- 6 直流电机的换向

# 1 电机概述

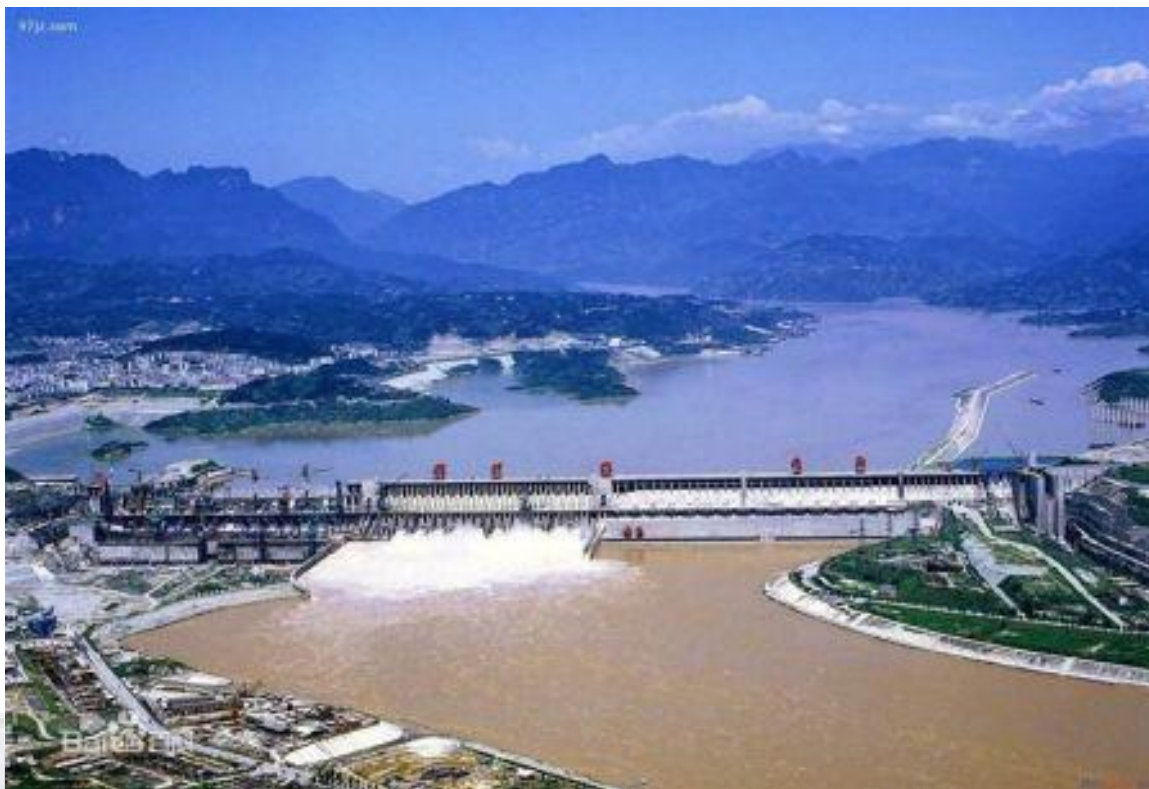
## ○ 电机的定义

电机是以电磁感应定律为原理，来实现能量转换或信号传递的电气设备或机电元件。



# 1 电机概述

## ○ 电机的应用——电力系统



三峡大坝安装了**32**台单机容量为**70**万千瓦的水电机组，装机容量达**2240**万千瓦。

三峡大坝每小时可以产电**2240**万(kWh)，若以**0.5**元/kWh的电价计算，三峡大坝每小时售电收入为**1120**万元。



# 1 电机概述

## n 电机的应用——工厂

车床



数控机床

## n 电机的应用——交通运输

高铁



新能源汽车



# 1 电机概述

军事：  
雷达



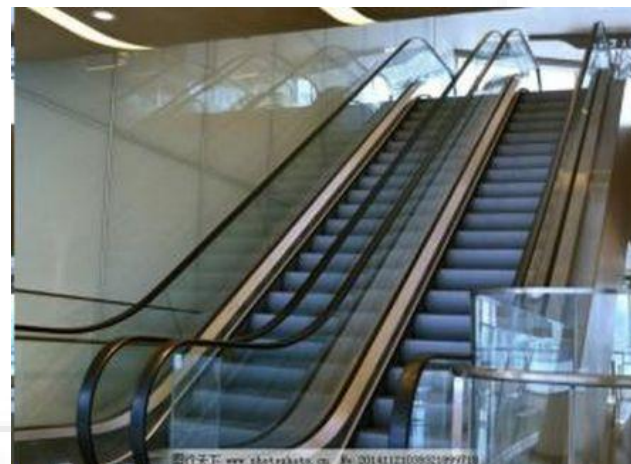
医疗：  
CT机



家用电器



电梯



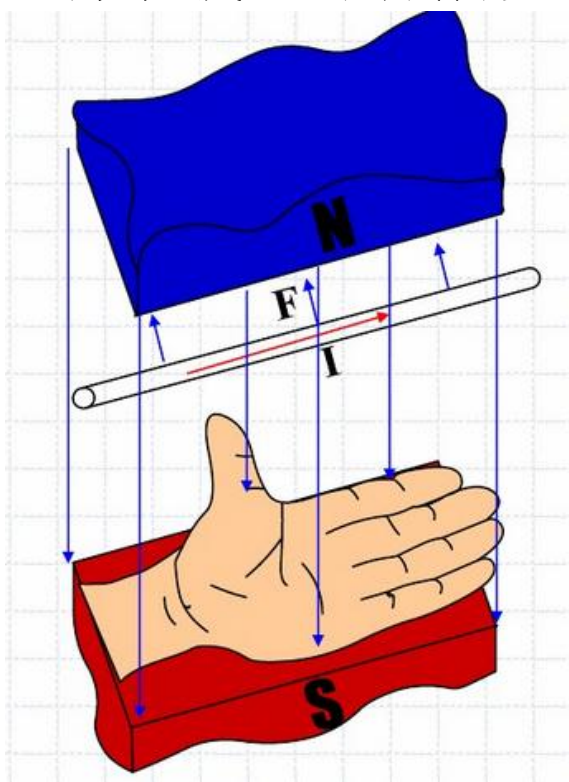
# 1 电机概述

## ○ 电机的分类

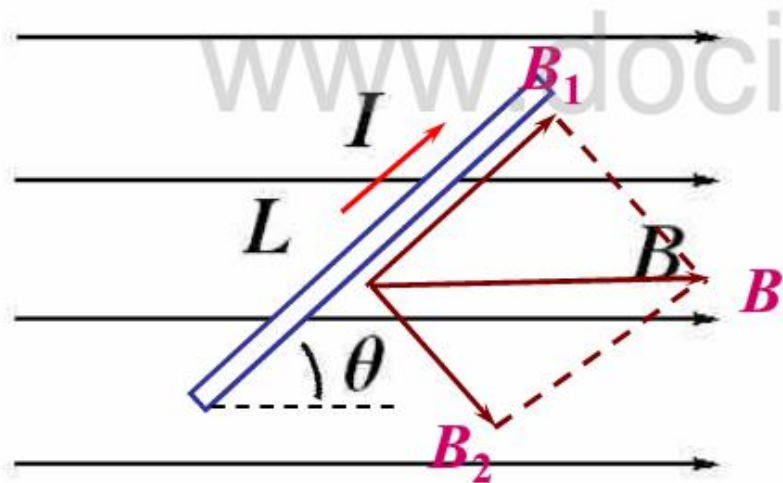
- n 按原理分：电动机、发电机、变压器
- n 按电流性质分：直流电机、交流电机(同步电机、异步电机、变压器)
- n 按运动方式分：旋转电机、直线电机、静止电机(变压器)

## 2 直流电机工作原理

### ○ 磁场中载流导体所受的电磁力(安培力)



方向：左手定则



导线在均匀磁场中的受力

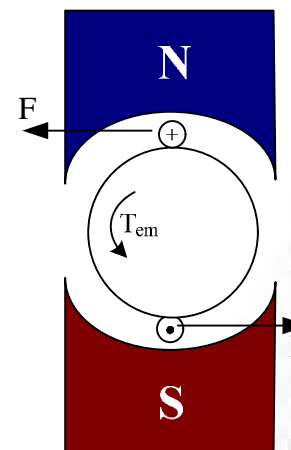
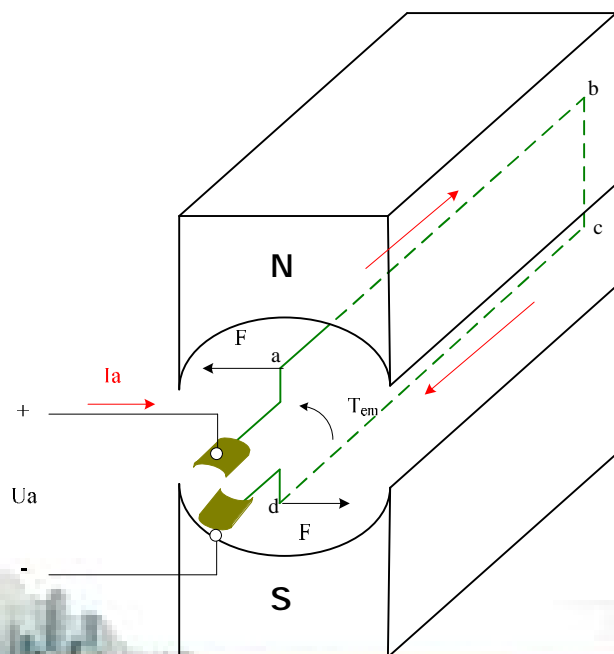
$$F = BIl \sin \theta$$

## 2 直流电机工作原理

### ○ 直流电动机工作原理

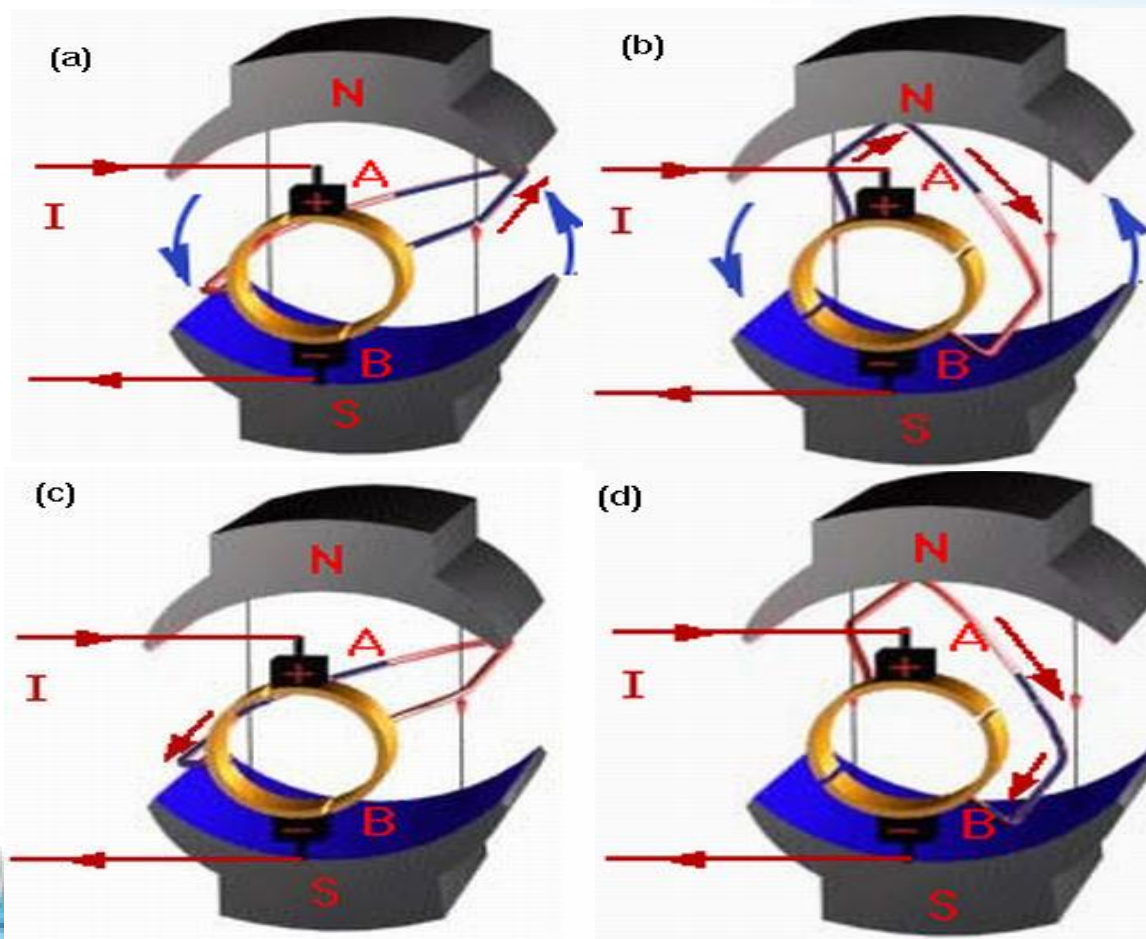
n 模型组成:

固定的磁极、电枢、换向片与电刷



## 2 直流电机工作原理

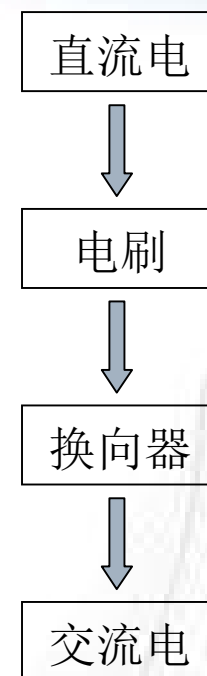
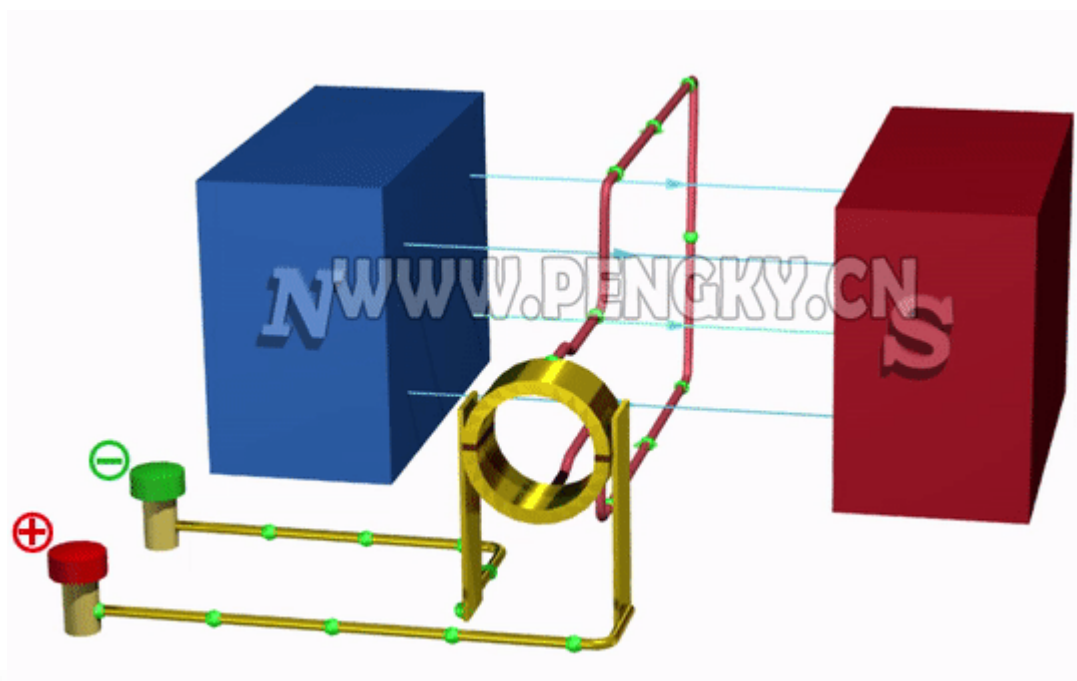
### ○ 直流电动机工作原理





## 2 直流电机工作原理

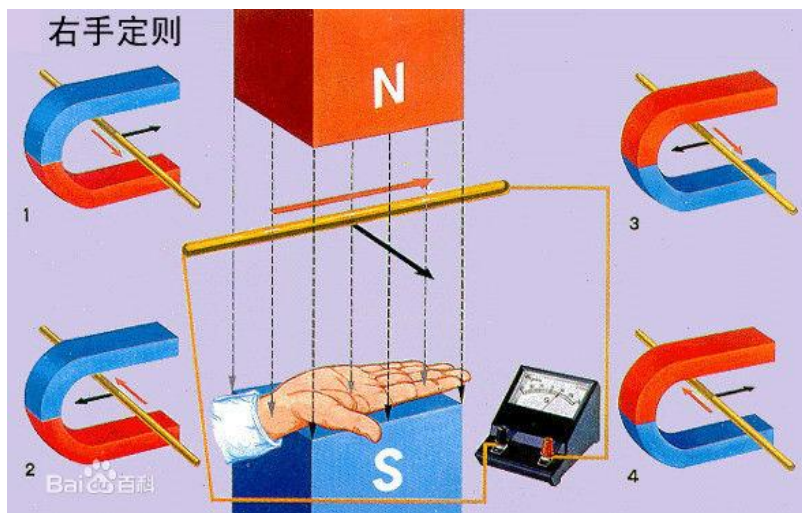
### ○ 直流电动机工作原理



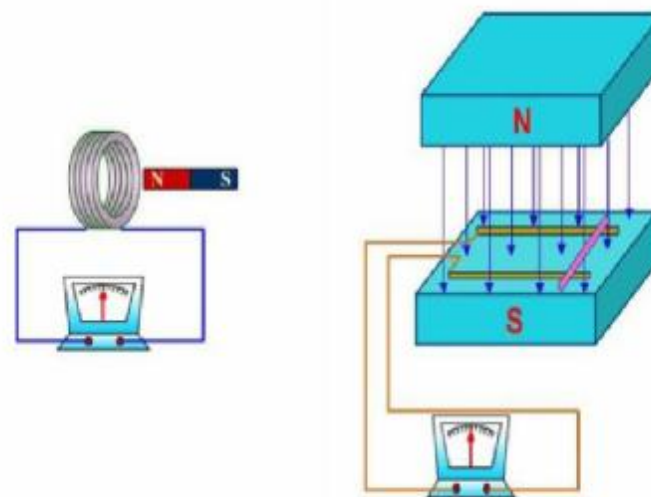


## 2 直流电机工作原理

### ○ 电磁感应定律和右手定则



方向：右手定则

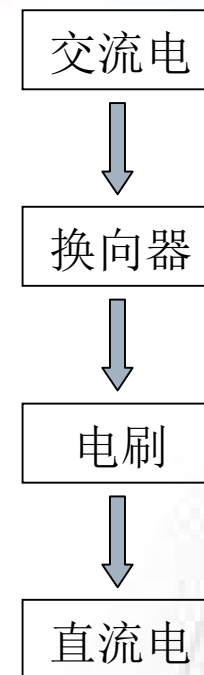
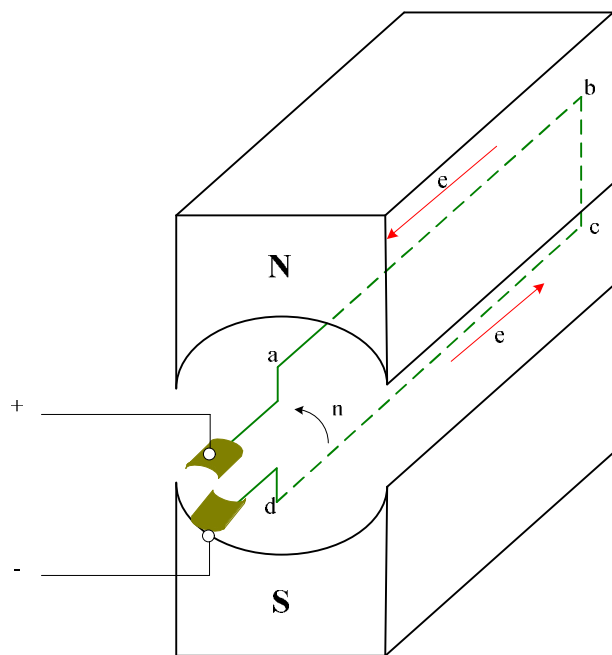


导线切割磁力线产生的电动势

$$e = Blv$$

## 2 直流电机工作原理

### ○ 直流发电机工作原理

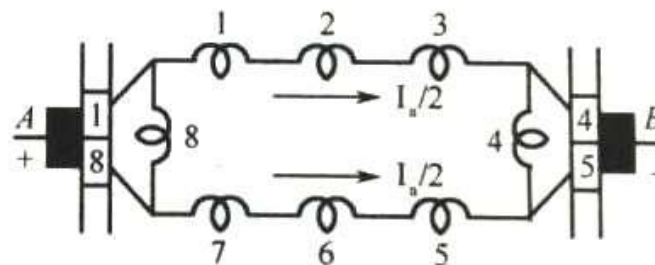
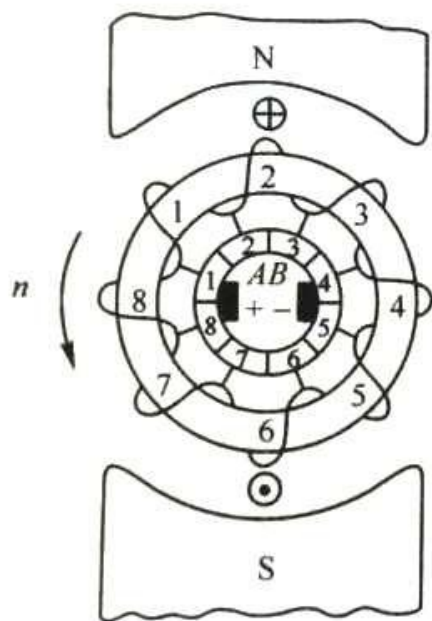


## 2 直流电机工作原理

### ○ 直流电机环形绕组

单匝绕组：感应转矩较小，转矩波动较大(某一位置转矩为零)

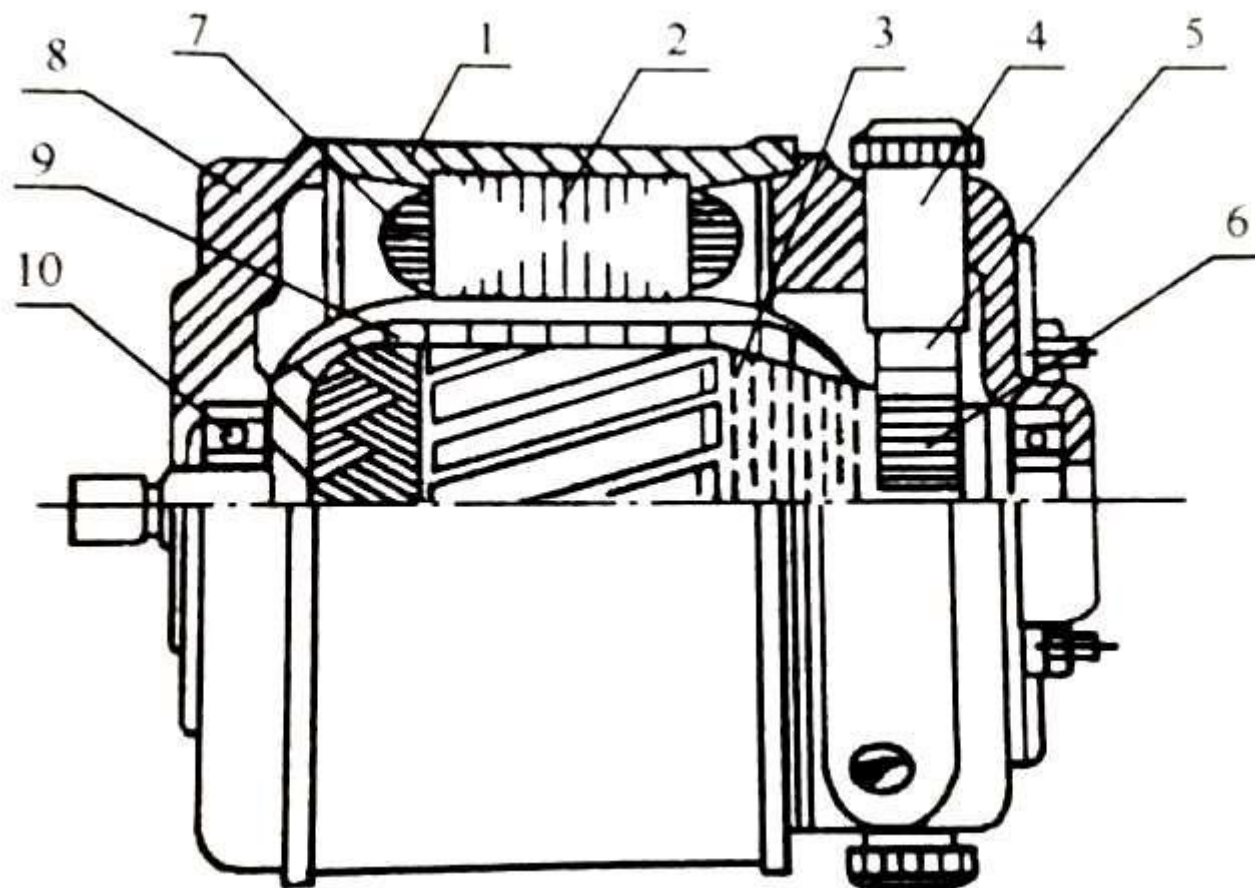
无铁心：气隙大，磁密小，转矩小



缺点：内腔导体不受电磁力作用，铜的利用率低；制造时不能使用成型线圈，工艺性不好！

### 3 直流电机结构

- 1—机壳
- 2—定子铁心
- 3—电枢
- 4—电刷座
- 5—电刷
- 6—换向器
- 7—激磁绕组
- 8—端盖
- 9—空气隙
- 10—轴承



### 3 直流电机结构

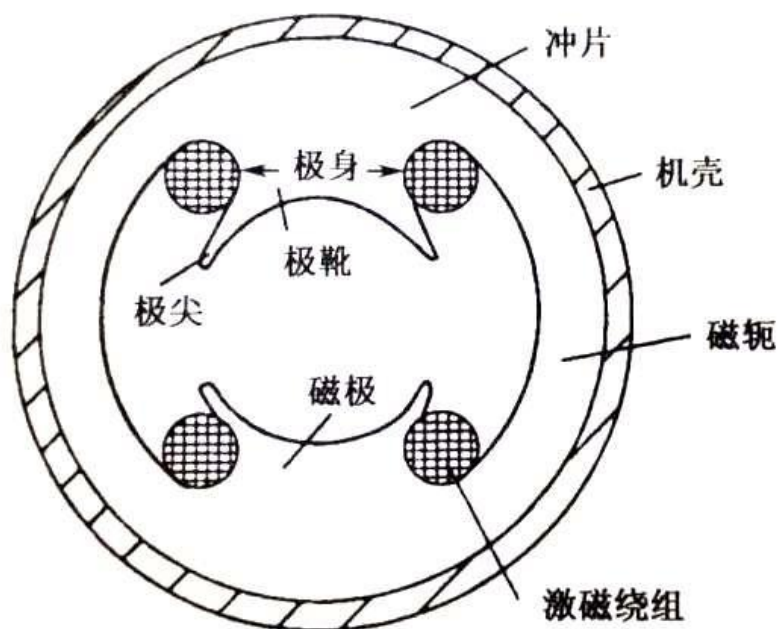


### 3 直流电机结构

#### ○ 主磁极                      作用：建立主磁场

按激磁方式，直流电机可分为电磁式和永磁式。

- n 电磁式：应用于大功率场合，有激磁(励磁)绕组产生主磁场，定子铁心用硅钢片冲片叠压而成。



磁轭：磁极间的通路；

极身：较窄，外装激磁绕组；

极靴：使主磁通在气隙中分布更合理些；

极尖：极靴两边伸出极身之外的部分；



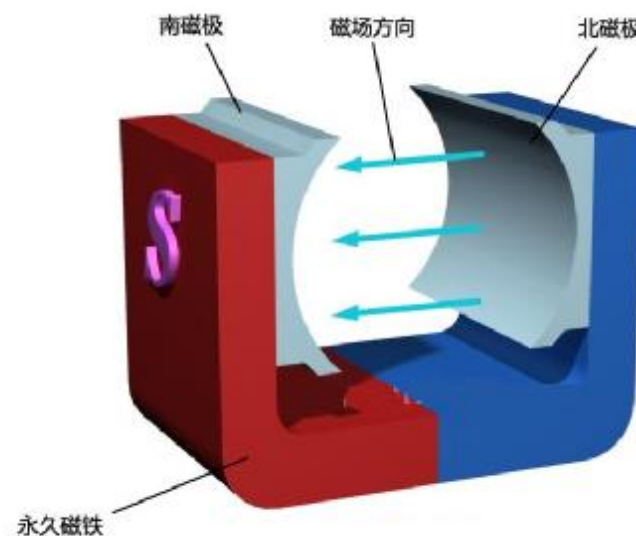
### 3 直流电机结构

#### ○ 主磁极

**n** 永磁式：应用于小功率场合，磁极由永磁体做成。

优点：体积小，重量轻，效率高，结构紧凑；

缺点：主磁场弱，磁场不能调节，永磁材料硬脆，加工困难。



### 3 直流电机结构

#### ○ 机壳

作用：固定主磁极和端盖  
磁路的一部分

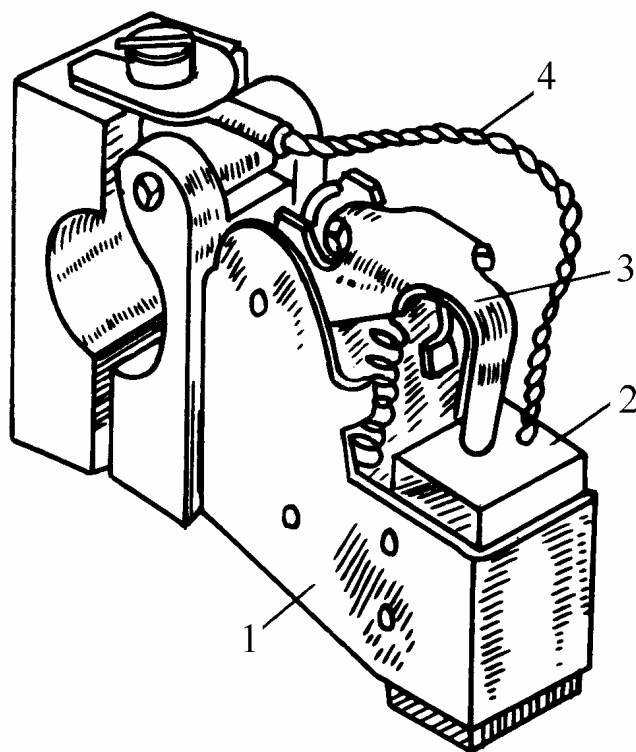
磁轭：机壳中有磁通经过的部分称为磁轭

通常由铸钢或厚钢板焊成。

### 3 直流电机结构

#### ○ 电刷装置

作用：电刷装置是把直流电压、直流电流引入或引出的装置。



1—刷握

2—电刷

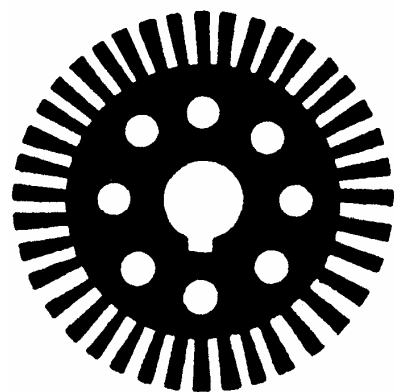
3—压紧弹簧

4—铜丝辫

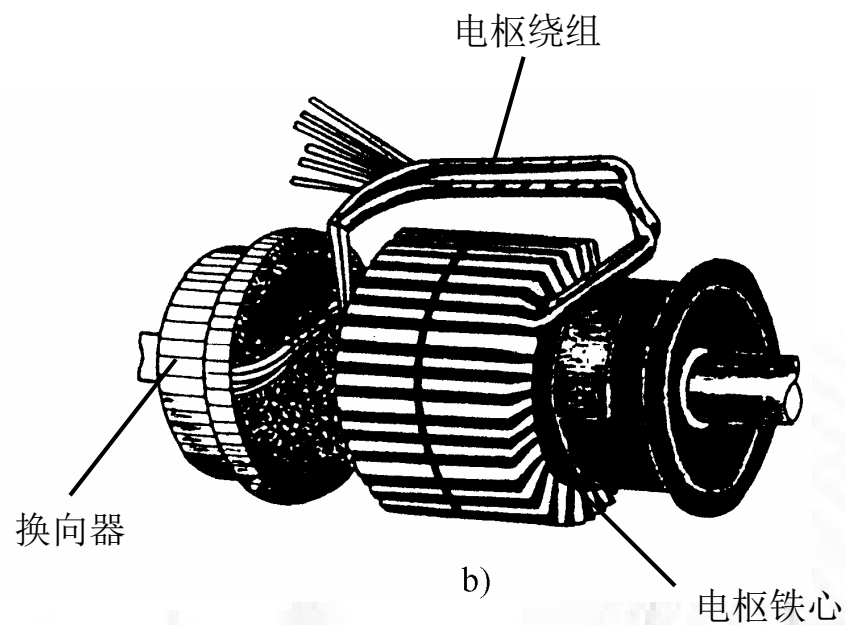
### 3 直流电机结构

#### ○ 电枢铁心

作用：主磁路的一部分，嵌放电枢绕组。



a)

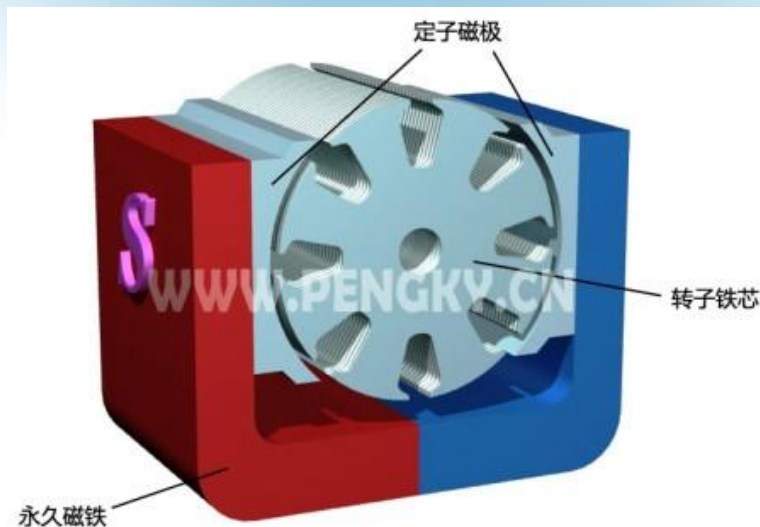


b)

### 3 直流电机结构

#### ○ 电枢铁心

作用：主磁路的一部分，嵌放电枢绕组。

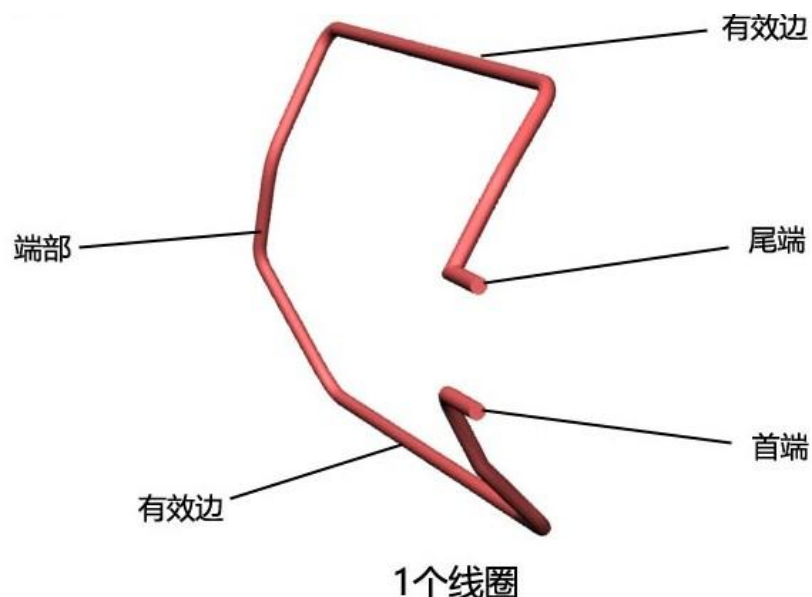


当电枢在磁场中旋转时，铁心中的磁通方向不断变化，因而会产生涡流及磁滞损耗。为减小损耗，电枢铁心用**0.5mm**或**0.35mm**硅钢片的冲片叠压而成，冲片之间有绝缘片。

### 3 直流电机结构

#### ○ 电枢绕组

作用：直流电机电路的一部分，由许多按一定规律的线圈组成。是实现能量转换的关键部件。



电机中的一个线圈(可以有很多匝)又称为绕组元件。

每个绕组元件的两个直边放在电枢铁心槽内，其处于电机气隙磁场中，产生感应电势或电磁力矩，称为有效边。

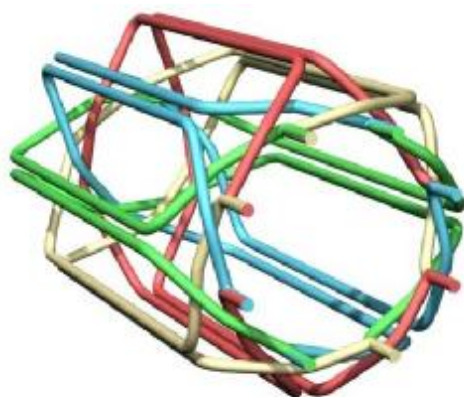
每个绕组元件在槽外的部分处于气隙磁场外，直起连接作用，称为端接部分。



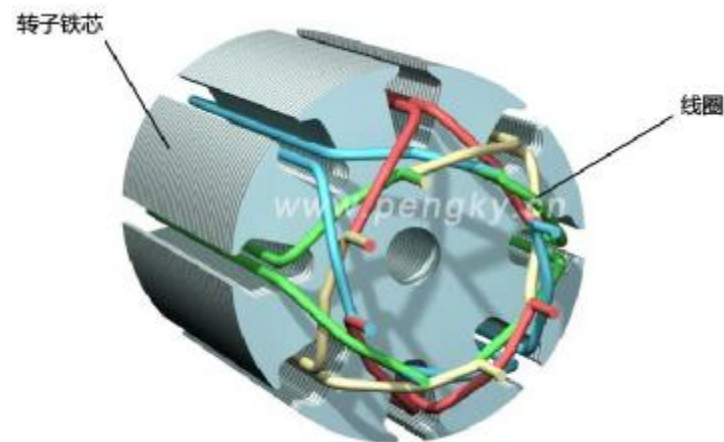
### 3 直流电机结构

#### ○ 电枢绕组

作用：直流电机电路的一部分，由许多按一定规律的线圈组成。是实现能量转换的关键部件。



全部 8 个线圈



### 3 直流电机结构

#### ○ 电枢绕组

作用：直流电机电路的一部分，由许多按一定规律的线圈组成。是实现能量转换的关键部件。

1—槽楔

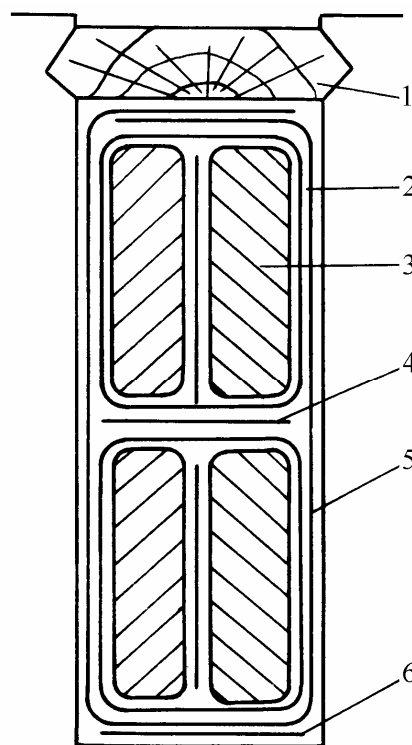
2—线圈绝缘

3—导体

4—层间绝缘

5—槽绝缘

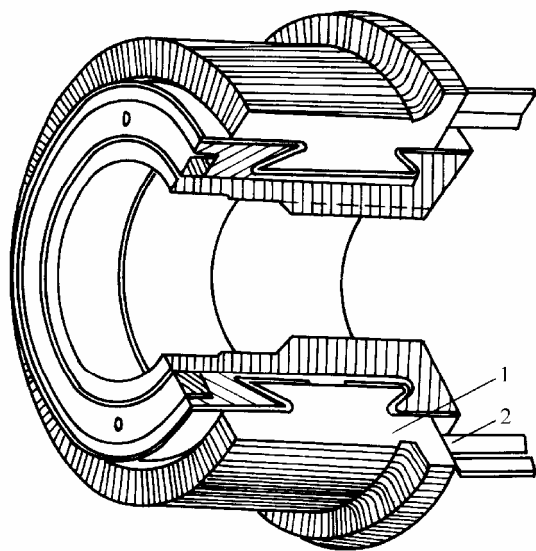
6—槽底绝缘



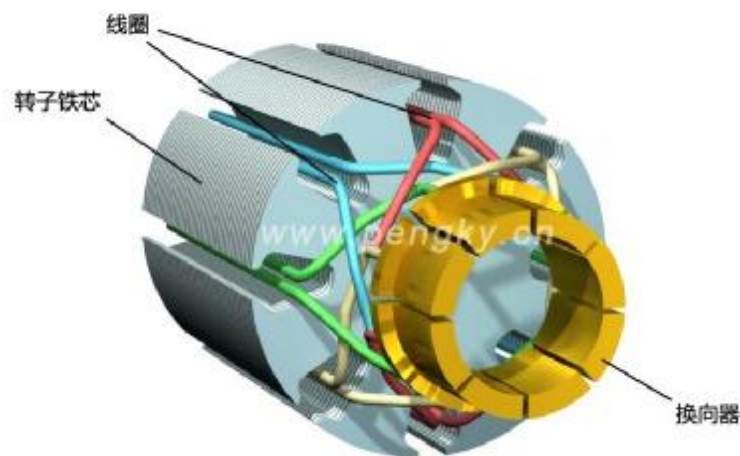
### 3 直流电机结构

#### ○ 换向器

作用：电刷和绕组之间的直流和交流相互转换。

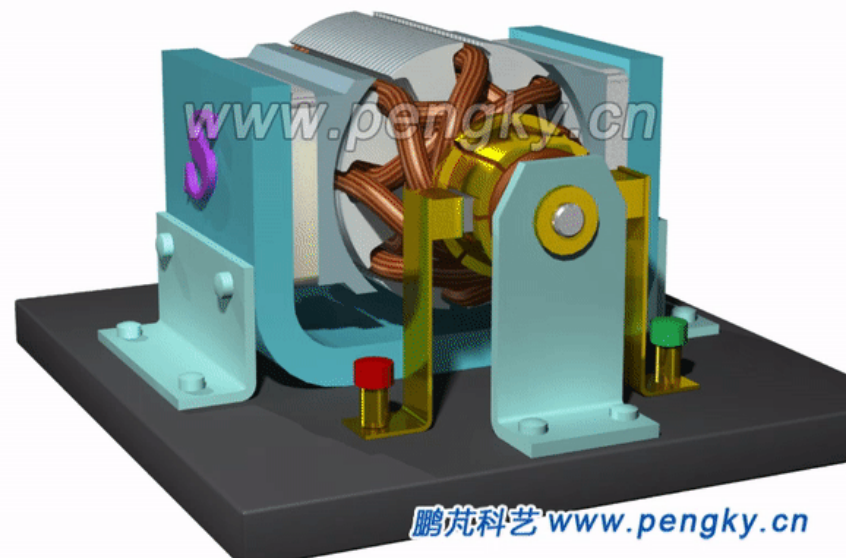
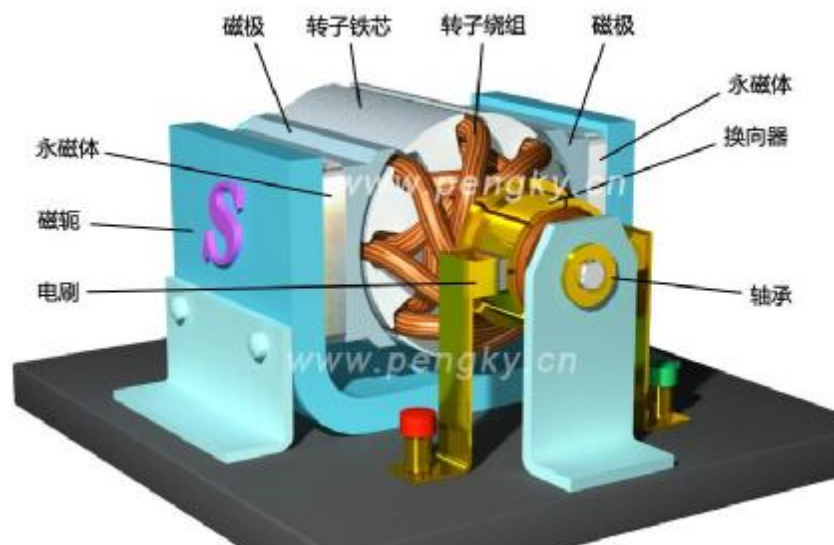


1—换向片      2—连接片



### 3 直流电机结构

#### ○ 直流电机模型



## 4 直流电机的绕组

### ○ 实现能量转换

n 电动机：电能转化为机械能

n 发电机：机械能转化为电能

### ○ 构成原则

n 产生最大感应电动势

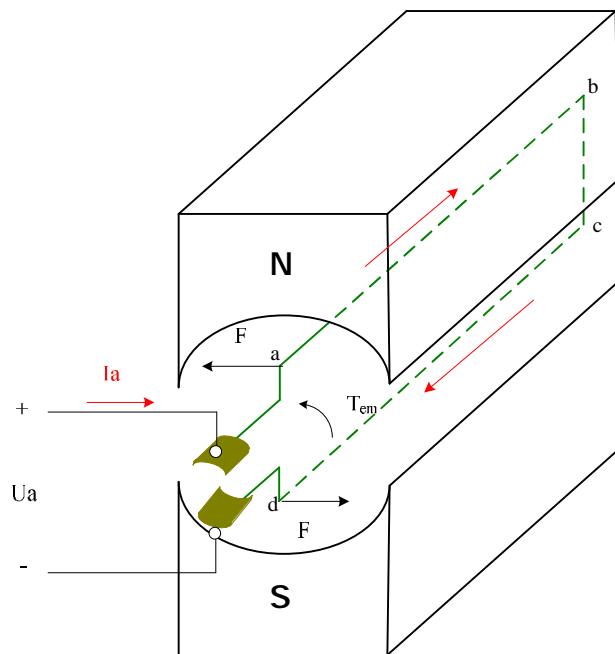
n 可以承载一定量的电流

n 结构简单

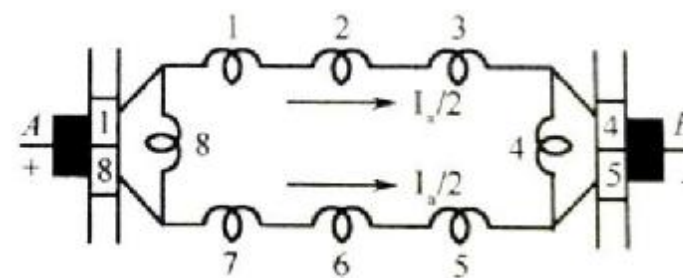
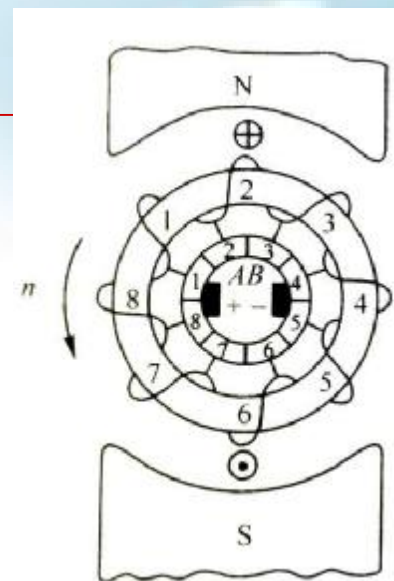
n 节约有色金属

## 4 直流电机的绕组

### ○ 环形绕组



直流电机模型



环形绕组



## 4 直流电机的绕组

### ○ 环形绕组

n 相对于电机模型的优点:

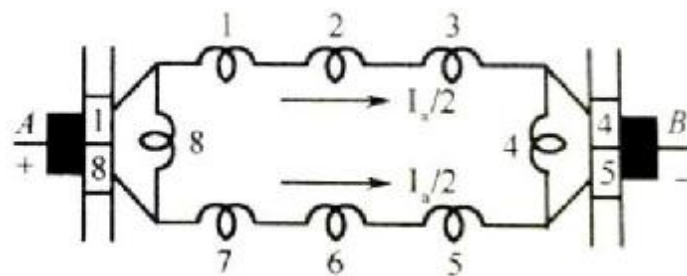
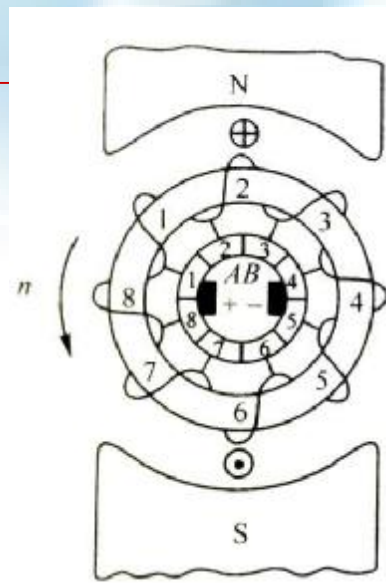
1 增加铁心，减小了气隙，增加了磁密，提升了转矩

2 绕组分成若干支路，减小了转矩波动。

n 缺点:

1 环形铁心内腔磁密为零，所以内腔的导体不受电磁力作用，不产生电磁转矩，利用率低；

2 环形绕组在制造上不能用成型线圈，经济性和工艺性不好；



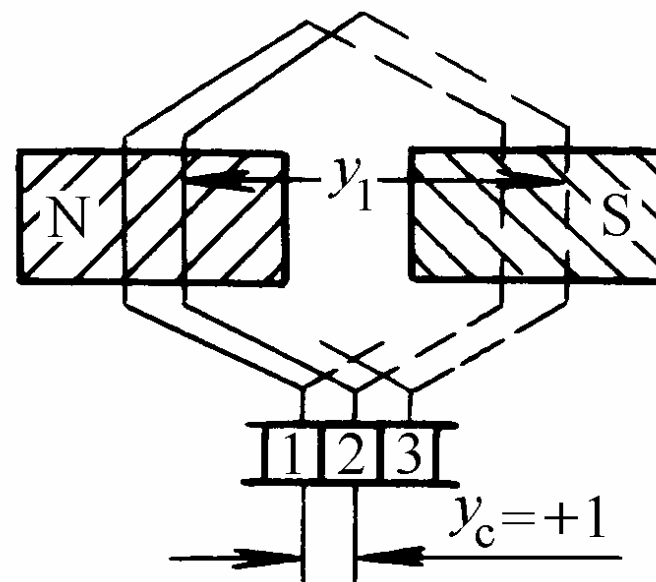
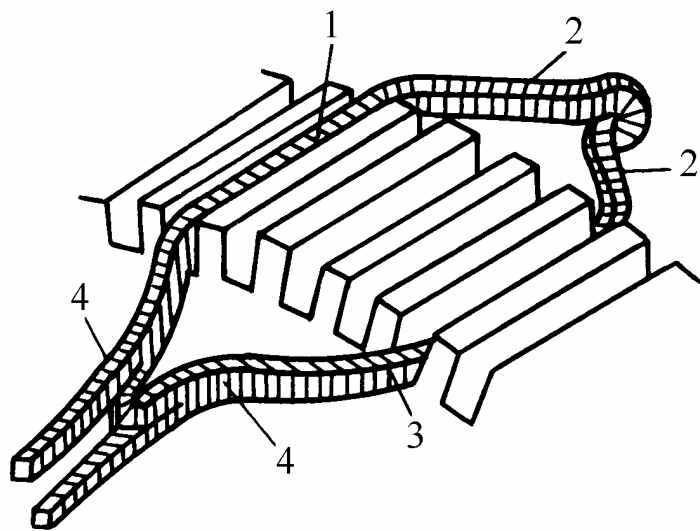
环形绕组

## 4 直流电机的绕组

### ○ 鼓型绕组

#### n 单叠绕组:

- 1 元件两个端子连接于相邻的两个换向片上。
- 2 上层元件用实线表示，下层元件用虚线表示。
- 3 所有元件依次串联，即后一元件的首端与前一元件的末端连在一起，并接到一个换向片上。

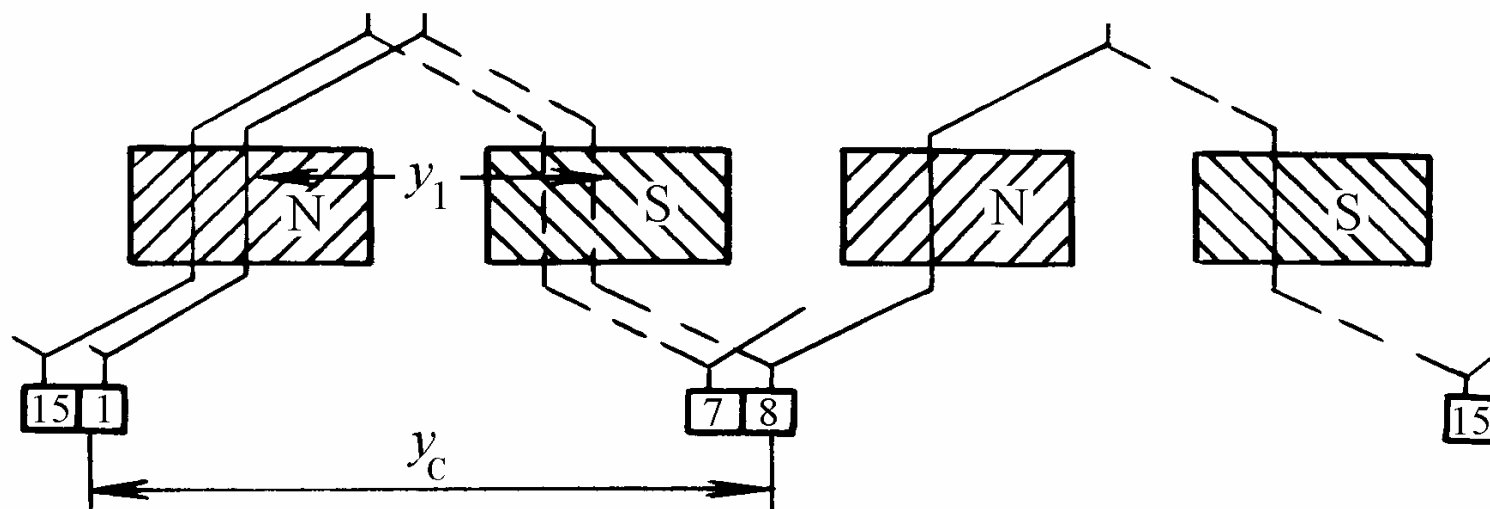


## 4 直流电机的绕组

### ○ 鼓型绕组

n 单波绕组:

- 1 把相隔大约两个极距，在磁场中位置差不多对应的元件连接起来，。
- 2 顺着串联绕组元件绕电枢一周以后，元件的末端不能与起始元件的首端连接相同的换向片，而必须与其相邻的换向片相连。



## 4 直流电机的绕组

### ○ 单叠绕组

n 举例:

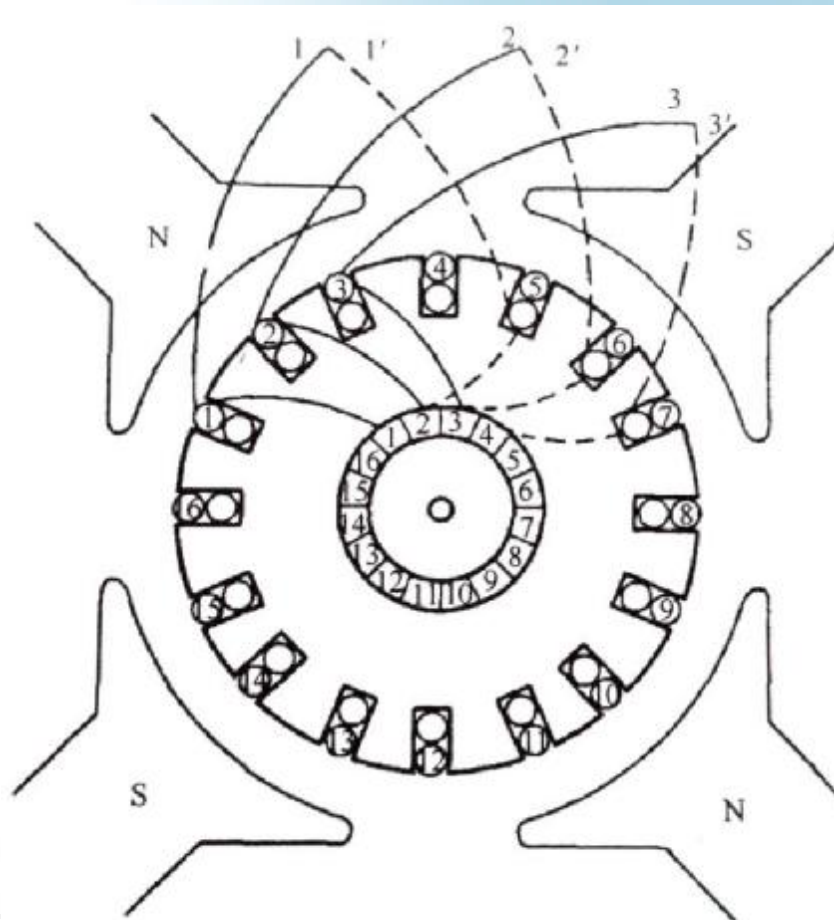
极对数 $p=2$ ;

槽数 $Q=16$ ;

元件数 $S=16$ ;

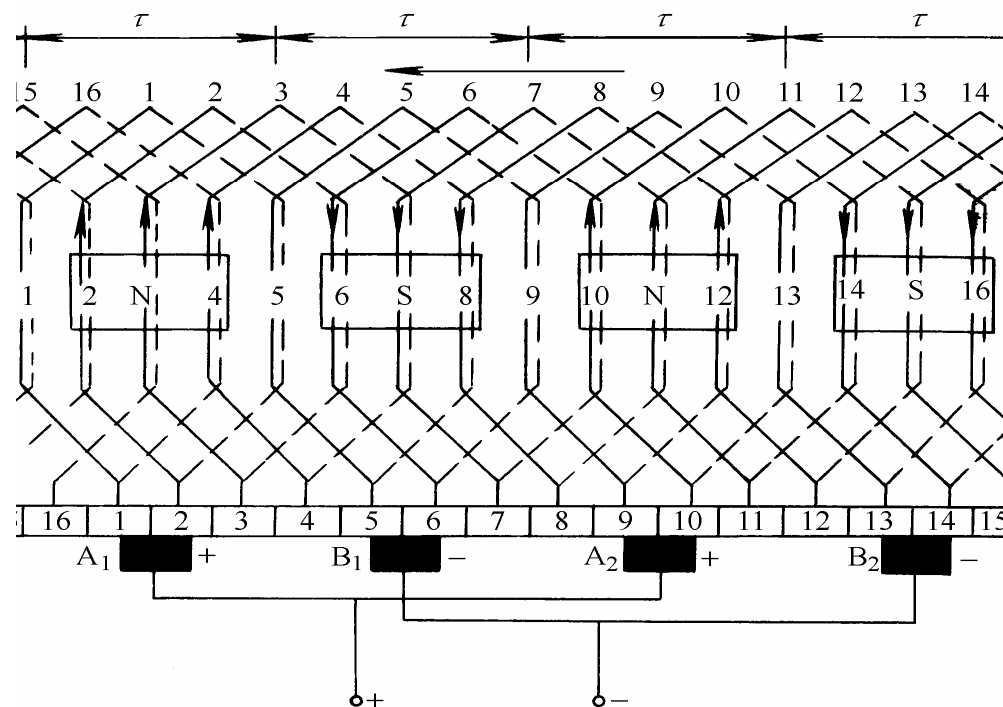
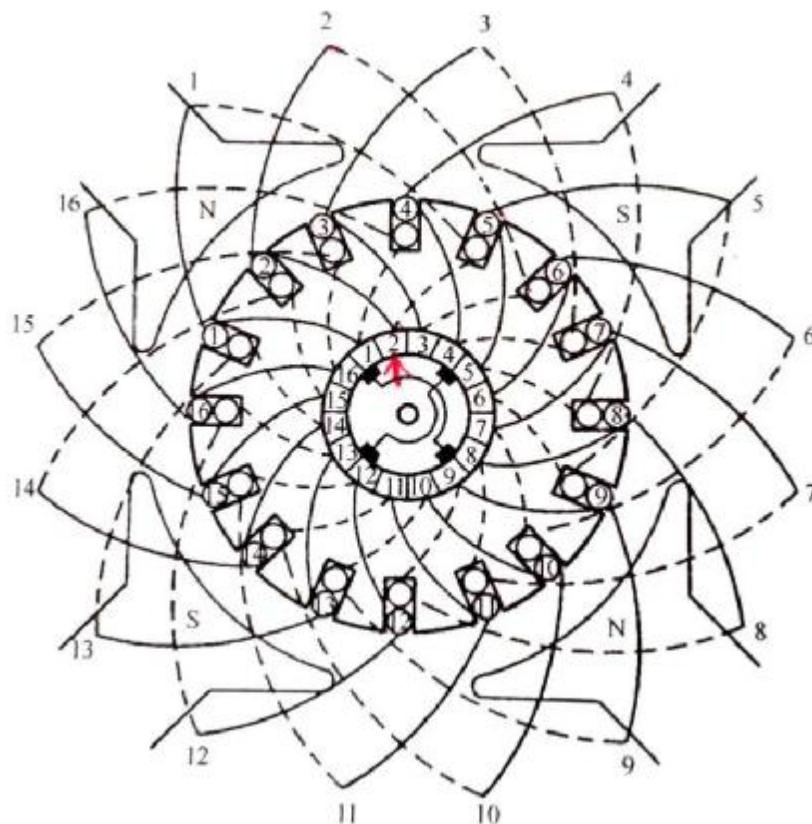
换向片数 $K=16$ ;

元件跨距为4个槽,  $y_1=4$



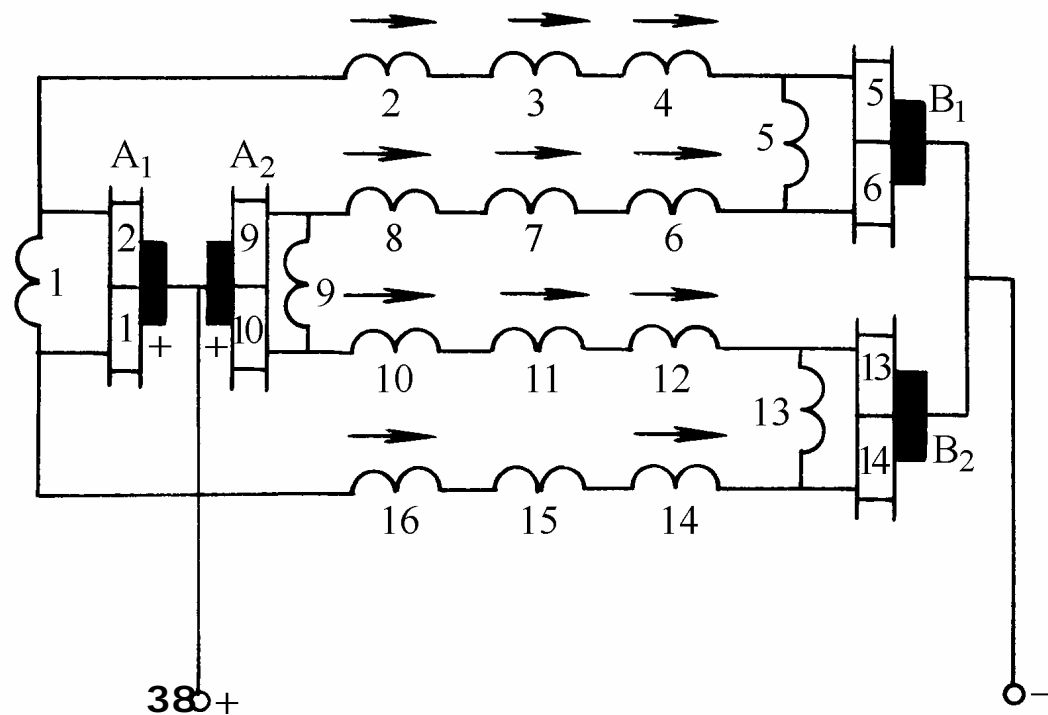
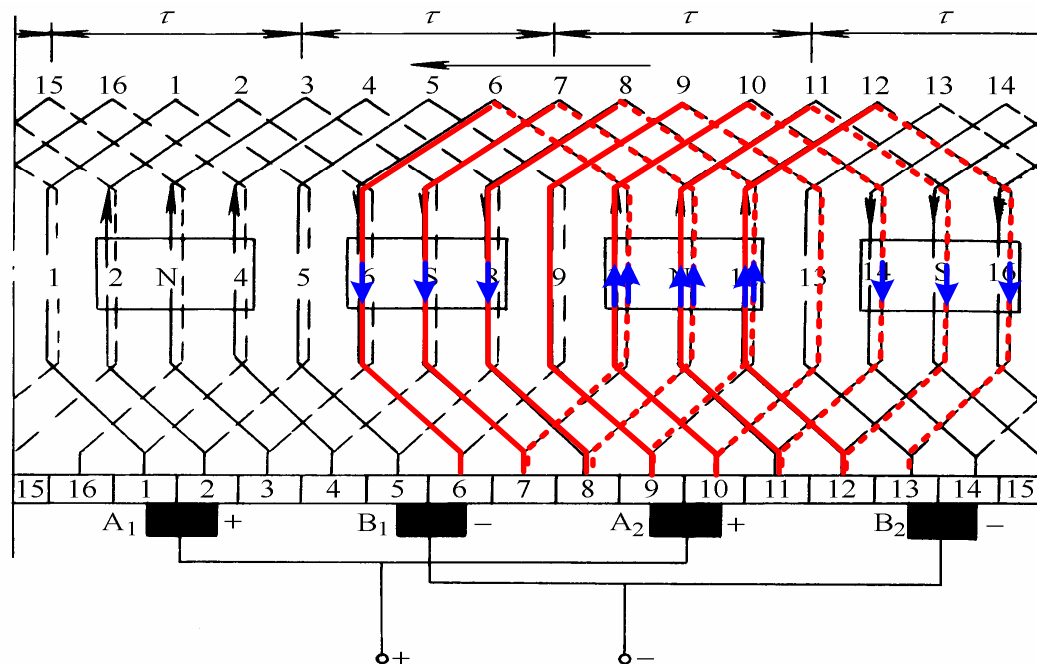
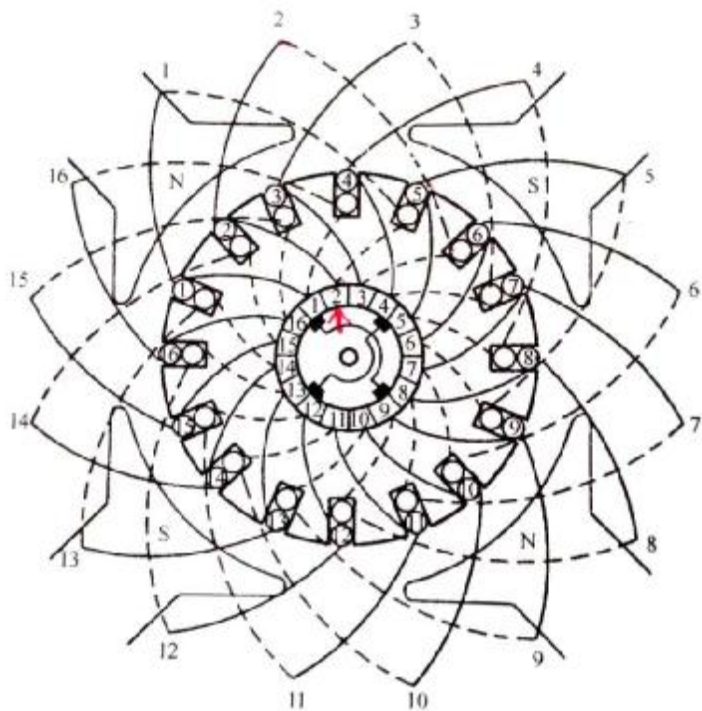
## 4 直流电机的绕组

### ○ 单叠绕组



## 4 直流电机的绕组

○ 单叠绕组



17:09:56

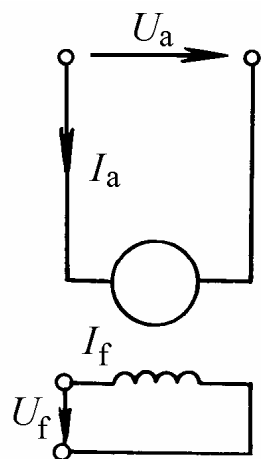


## 5 直流电机的励磁方式及磁场

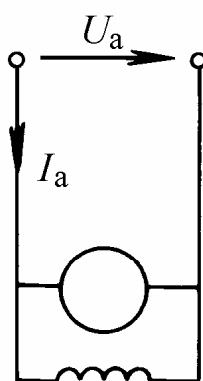
### ○ 直流电机的励磁方式

主磁场：由磁极的励磁磁动势单独建立的磁场，也称励磁磁场。

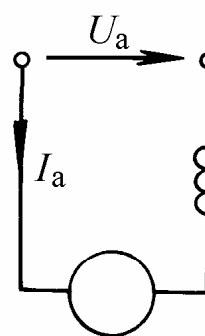
励磁方式：指对励磁绕组如何供电、产生励磁磁动势而建立主磁场的问题。



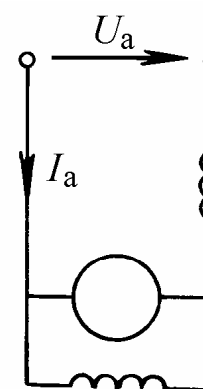
a)  
他励式



b)  
并励式



c)  
串励式



d)  
复励式

## 5 直流电机的励磁方式及磁场

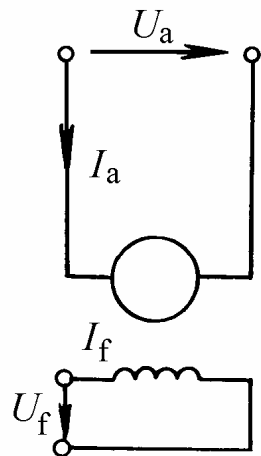
### ○ 直流电机的励磁方式

他励式：励磁绕组与电枢绕组无连接关系。永磁直流电机也可看作他励式。

并励式：励磁绕组与电枢绕组并联。

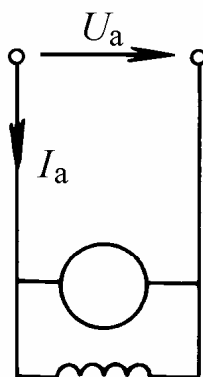
串励式：励磁绕组与电枢绕组串联。

复励式：有两个励磁绕组，一个与电枢电路并联，一个与电枢电路串联。



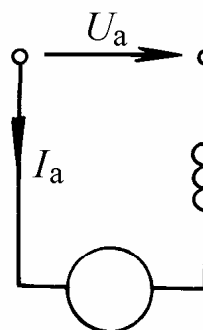
a)

他励式



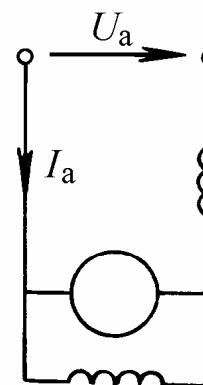
b)

并励式



c)

串励式



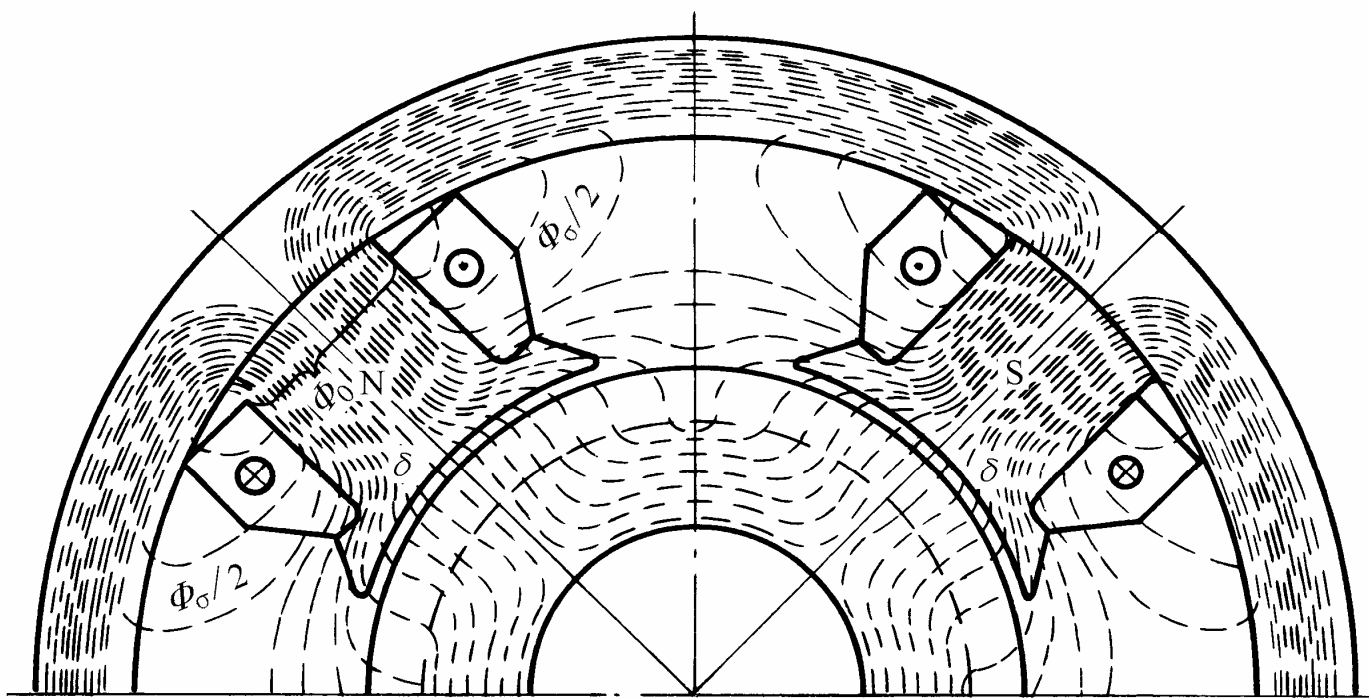
d)

复励式

## 5 直流电机的励磁方式及磁场

### ○ 直流电机的空载磁场

空载只是电枢电流等于零或者很小，且可以不计其影响的一种运行状态。所以直流电机的空载磁场是指由励磁磁动势单独建立的磁场。

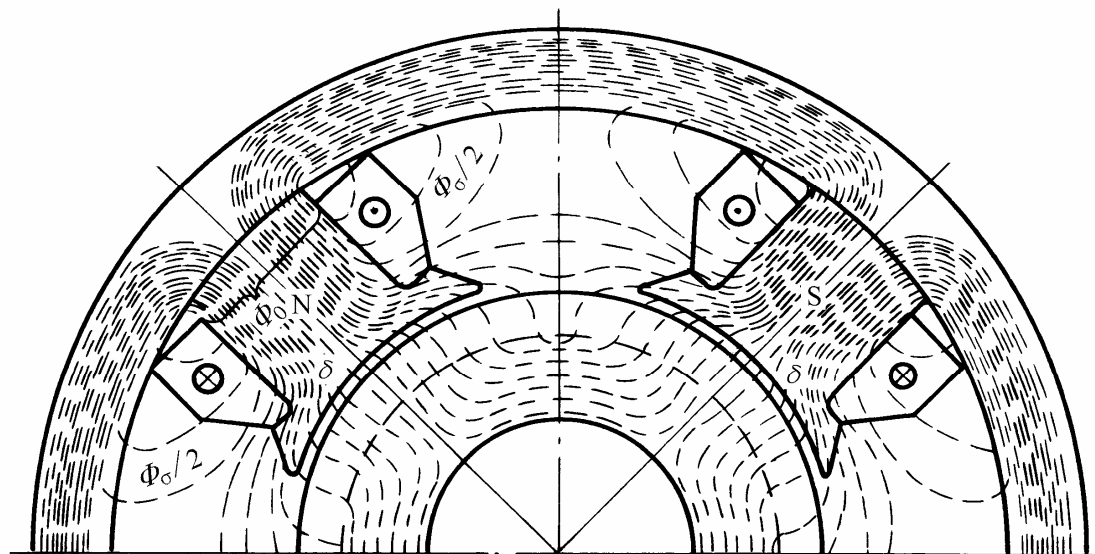


## 5 直流电机的励磁方式及磁场

### ○ 直流电机的空载磁场

主磁通：由**N**极出来穿过气隙进入电枢和电枢绕组，再穿过气隙进入**S**极，经过定子铁轭回到**N**极。

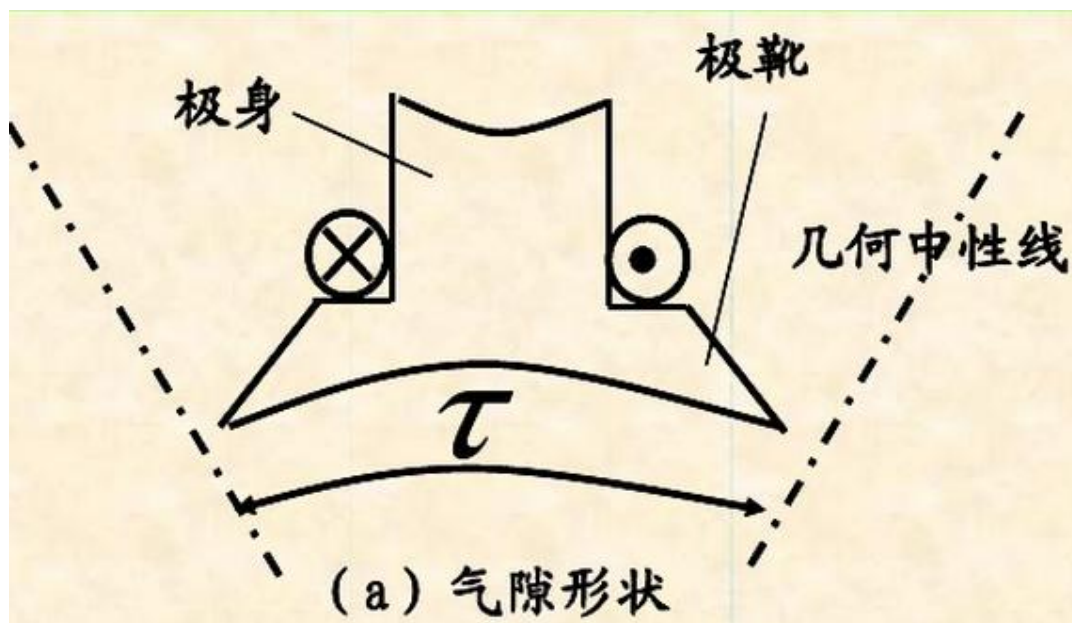
漏磁通：不经过电枢，只通过主磁极之间的空间，相邻磁极或定子铁轭。



主磁通回路气隙小，所以总磁导率较大，磁阻较小；而漏磁通气隙大，所以总磁导率较小，磁阻较大。作用于两个磁回路中的磁动势相同，故漏磁通数量比主磁通要小得多，一般漏磁通仅为主磁通的**20%**，在直流电机里，一般不计漏磁通。

## 5 直流电机的励磁方式及磁场

### ○ 直流电机的空载磁场

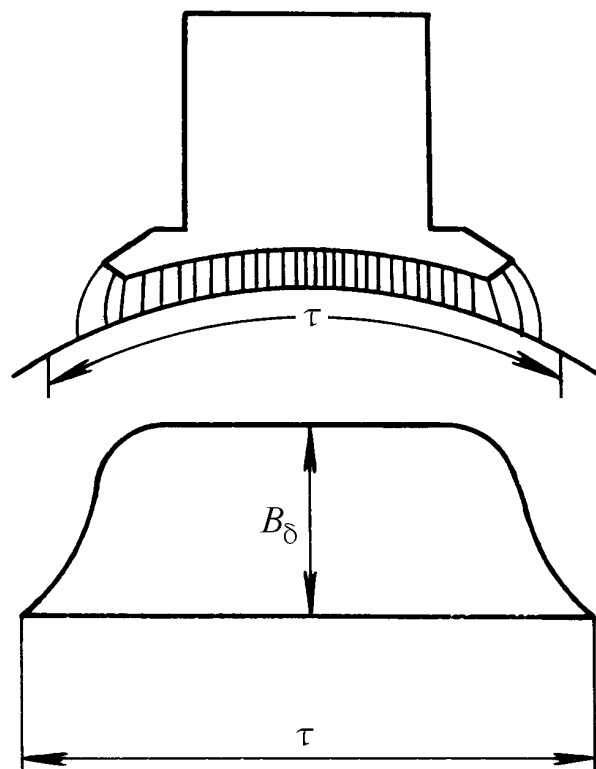


由于主磁极宽度比一个极距要小一些，导致极靴下的气隙分布不均：

- 1 磁极中心及附近的气隙小且均匀，磁密大且均匀；
- 2 靠近极尖处，气隙逐渐变大，磁密逐渐变小；
- 3 极尖以外，气隙明显变大，磁密明显变小；
- 4 几何中性线，两个磁极中间位置，磁密近似为零；

## 5 直流电机的励磁方式及磁场

### ○ 直流电机的空载磁场



气隙中主磁场密度分布图

由于主磁极宽度比一个极距要小一些，导致极靴下的气隙分布不均：

- 1 磁极中心及附近的气隙小且均匀，磁密大且均匀；
- 2 靠近极尖处，气隙逐渐变大，磁密逐渐变小；
- 3 极尖以外，气隙明显变大，磁密明显变小；
- 4 几何中性线，两个磁极中间位置，磁密近似为零；



## 5 直流电机的励磁方式及磁场

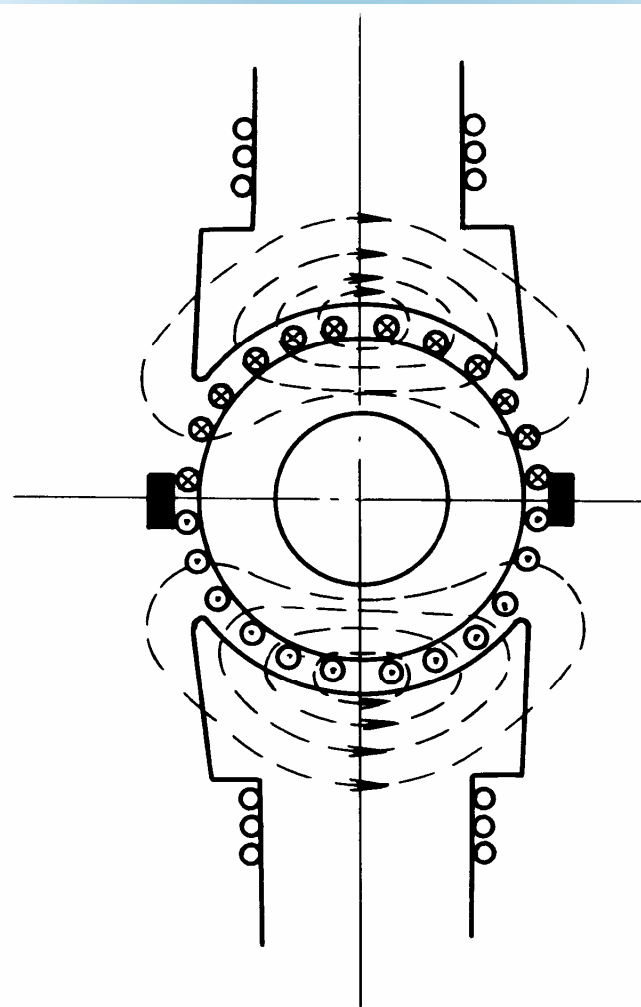
### ○ 直流电机负载时磁场

当电机带载时，电枢绕组内流过电流，与励磁绕组相同，也会产生磁动势，这个由电枢电流所建立的磁动势称为电枢磁动势。

尽管电枢在转动，然而每极下的元件边中的电流方向是不变的，因此电枢磁动势以及由电枢磁动势建立的电枢磁场是不变的。

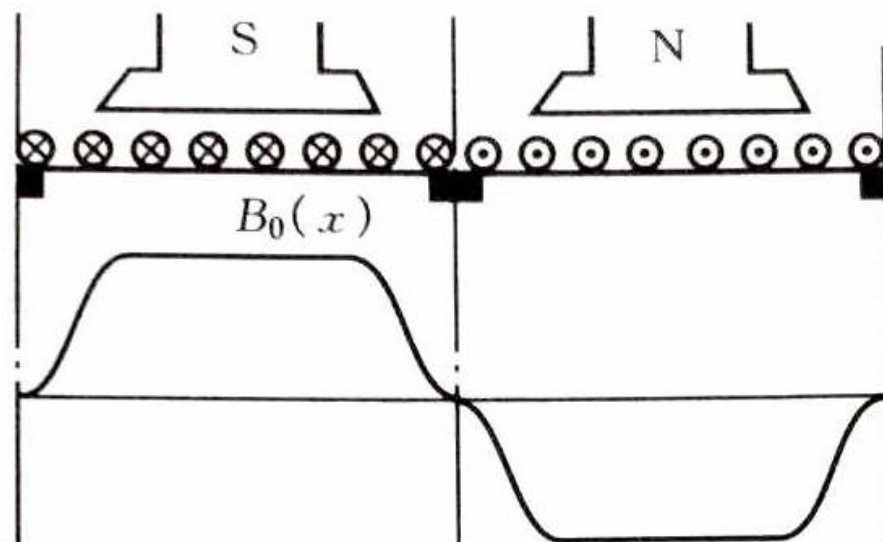
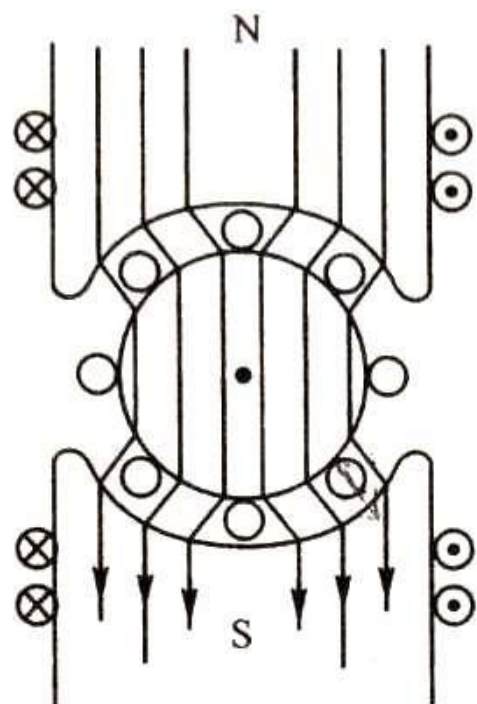
负载时，气隙磁场由励磁磁动势和电枢磁动势共同建立的。

**电枢反应：**电枢磁动势对励磁磁动势所产生的气隙磁场的影响称为电枢反应。



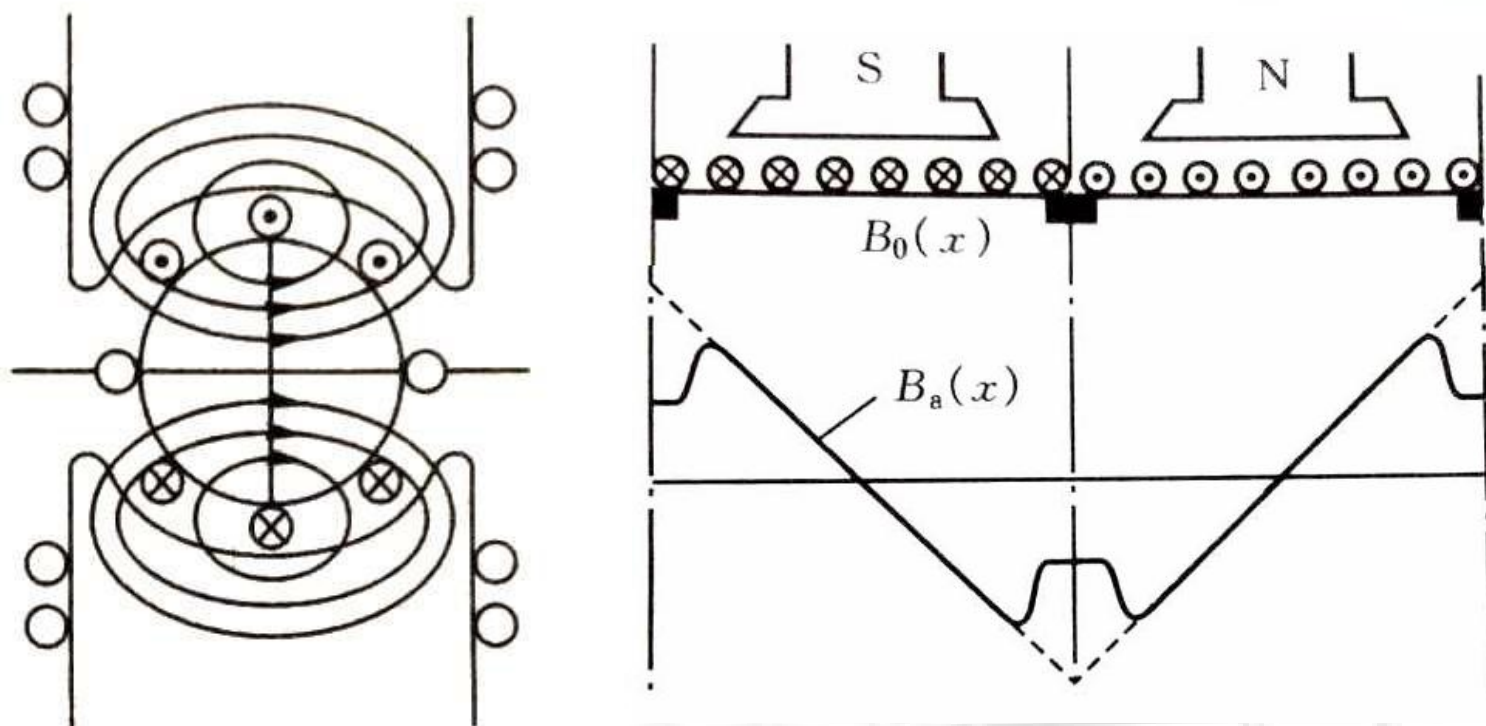
## 5 直流电机的励磁方式及磁场

### ○ 直流电机空载时磁场



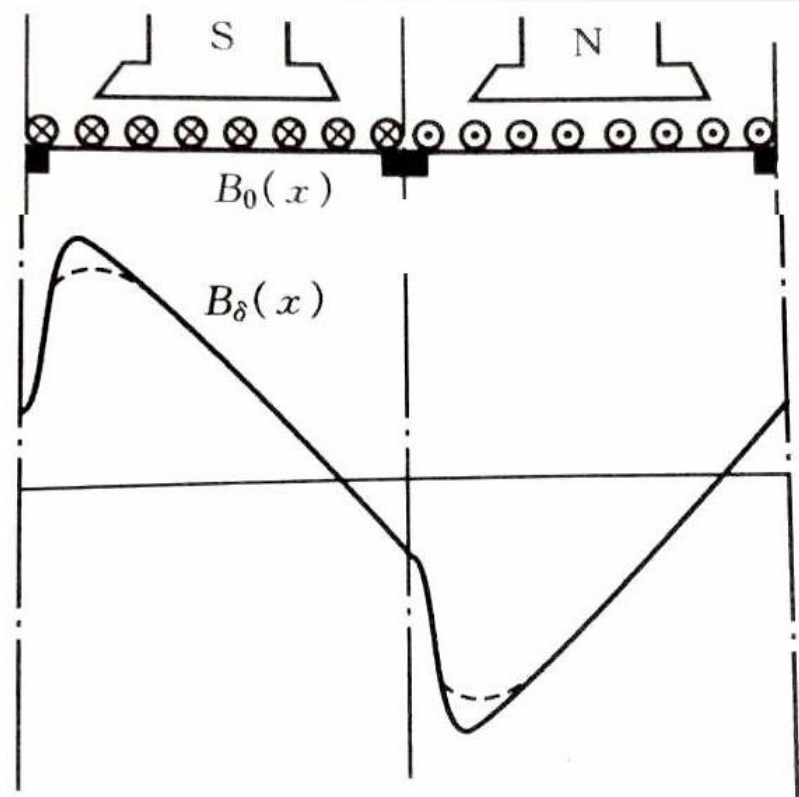
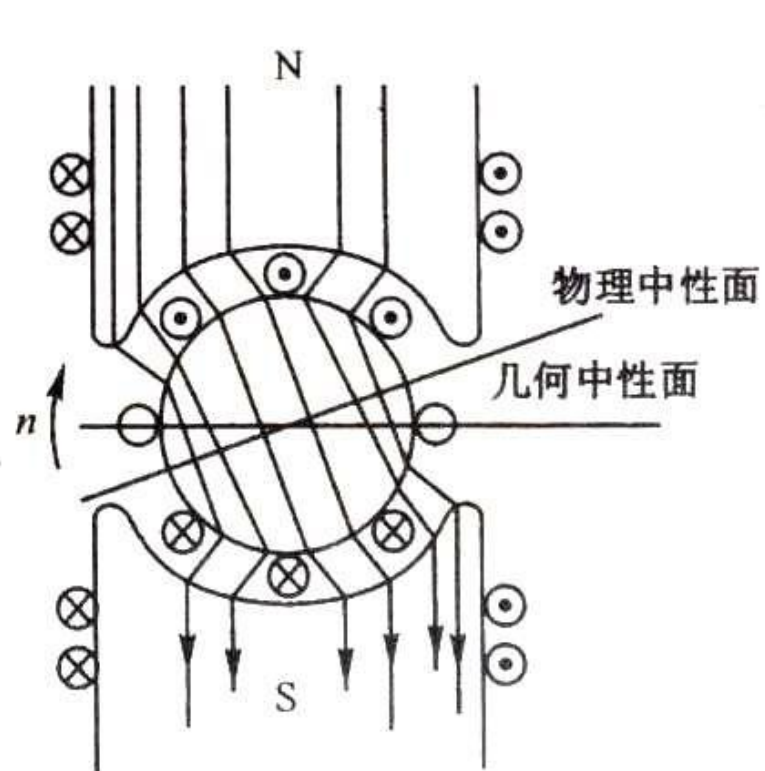
## 5 直流电机的励磁方式及磁场

### ○ 直流电机电枢磁场



## 5 直流电机的励磁方式及磁场

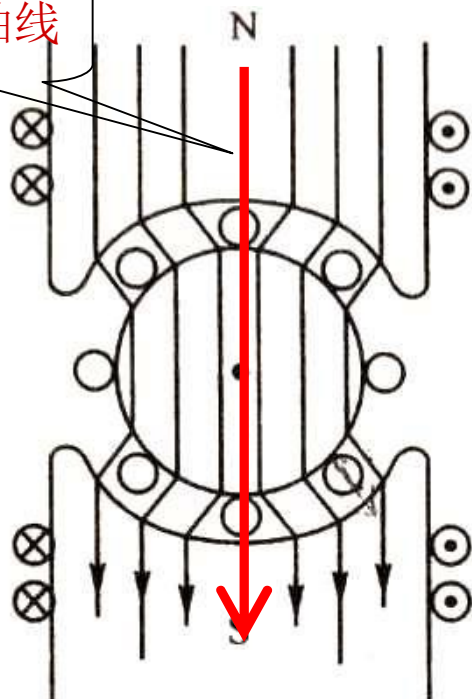
### ○ 直流电机负载时合成磁场



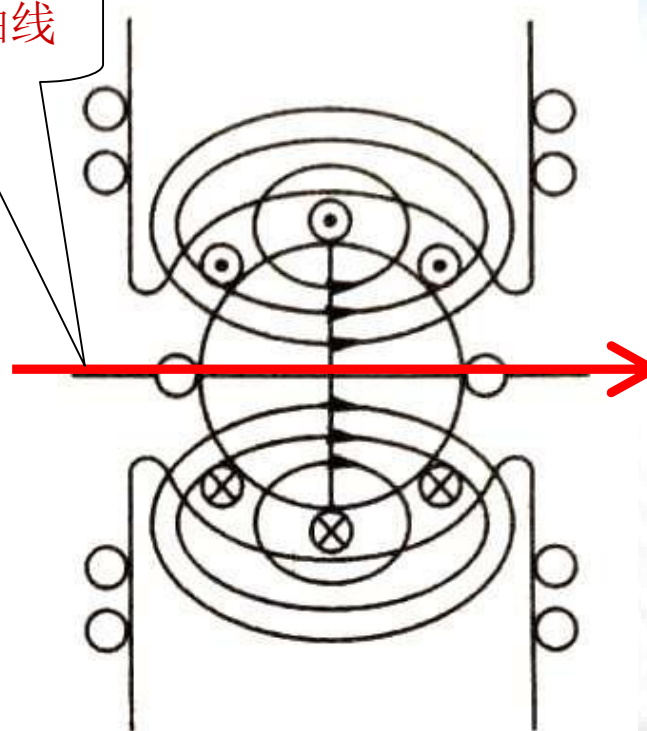
## 5 直流电机的励磁方式及磁场

### ○ 直流电机负载时磁场——磁场轴线

主磁场轴线



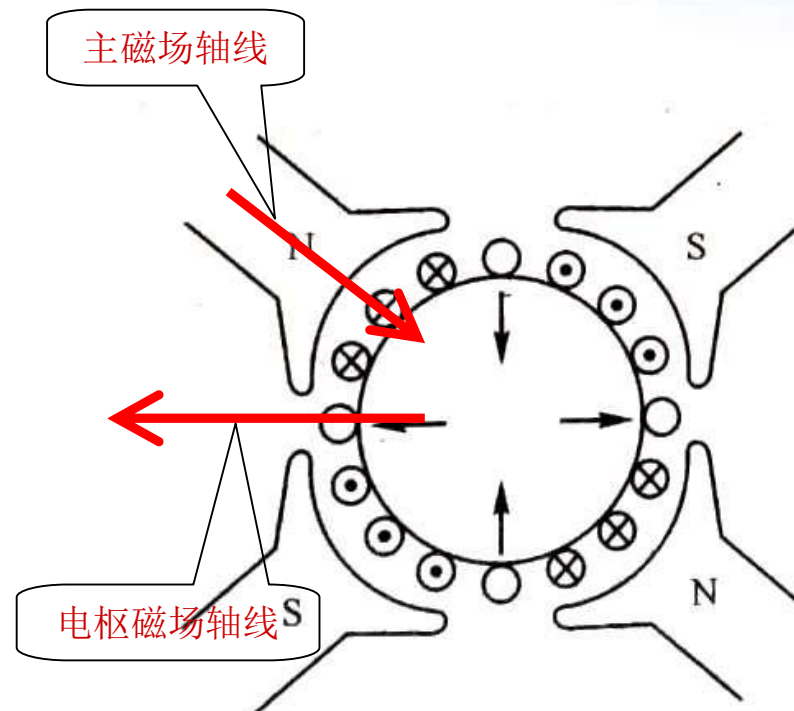
电枢磁场轴线



2极电机，电枢磁场轴线与磁极磁场轴线夹角为 $90^\circ$

## 5 直流电机的励磁方式及磁场

### ○ 直流电机负载时磁场——磁场轴线



4极电机，电枢磁场轴线与磁极磁场轴线夹角为 $45^\circ$



## 5 直流电机的励磁方式及磁场

### ○ 直流电机负载时磁场

以此类推，对于 $p$ 对极直流电机，两个磁场的轴线夹角是 $90^\circ / p$

定义**电角**：

$$\text{电角} = \text{极对数 } p \times \text{机械角}$$

因此，直流电机电枢磁场轴线与磁极主磁场轴线的夹角为 $90^\circ$  电角。尽管电机在运行过程中电枢转子在不断地转动，但是两磁极轴线夹角不变。

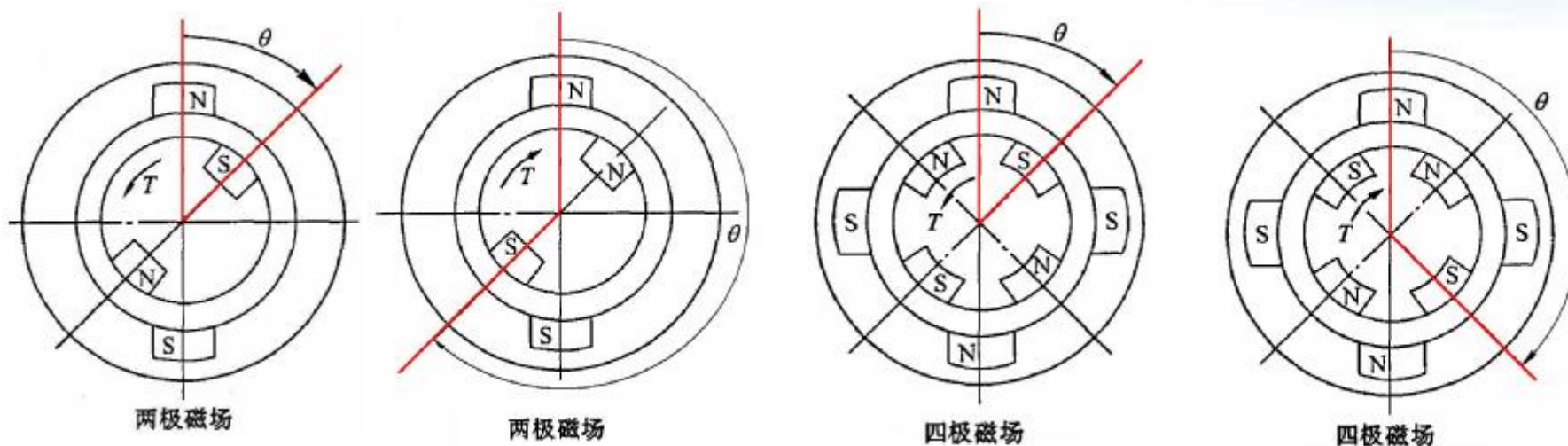
直流电机中的电磁转矩为：

$$T = K \sin(p\theta) = K \sin 90^\circ = K$$

对于其他种类电机，磁场间的夹角 $p\theta$ 一般不是 $90^\circ$ ，所以其他条件相同时，直流电机的转矩最大。

## 5 直流电机的励磁方式及磁场

### ○ 圆柱面磁场间的力矩



极对数 p		0°	~	90°	~	180°	~	270°	~	360°	周期
1	q	0	+	+	+	0	-	-	-	0	360°
2	T	0	+	0	-	0	+	0	-	0	180°

$$T = K \sin(pq) = K \sin 90^\circ = K$$

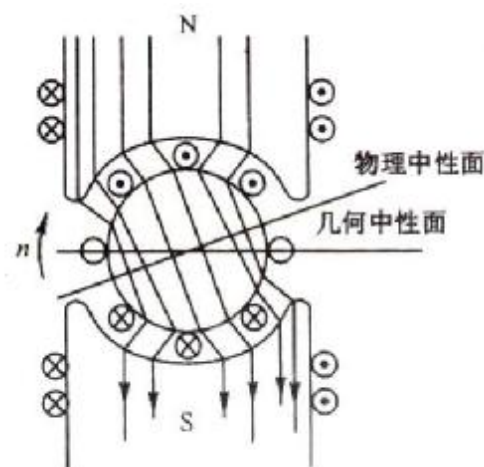
## 5 直流电机的励磁方式及磁场

### ○ 电枢反应的影响

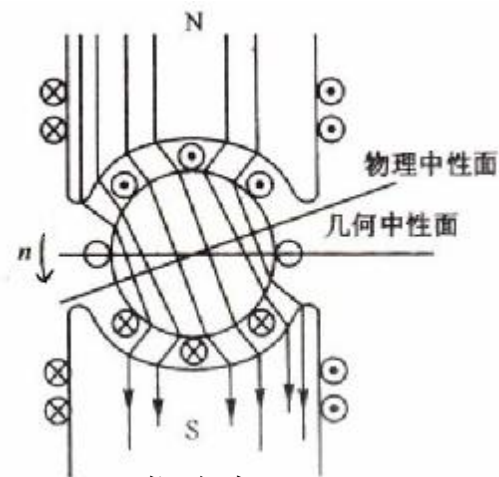
- n 使气隙磁场发生畸变：使物理中性面和几何中性面不再重合，几何中性面磁密不为零。

电动机：物理中性面逆着电机旋转方向转过一个角度。

发电机：物理中性面顺着电机旋转方向转过一个角度。



电动机



发电机

## 5 直流电机的励磁方式及磁场

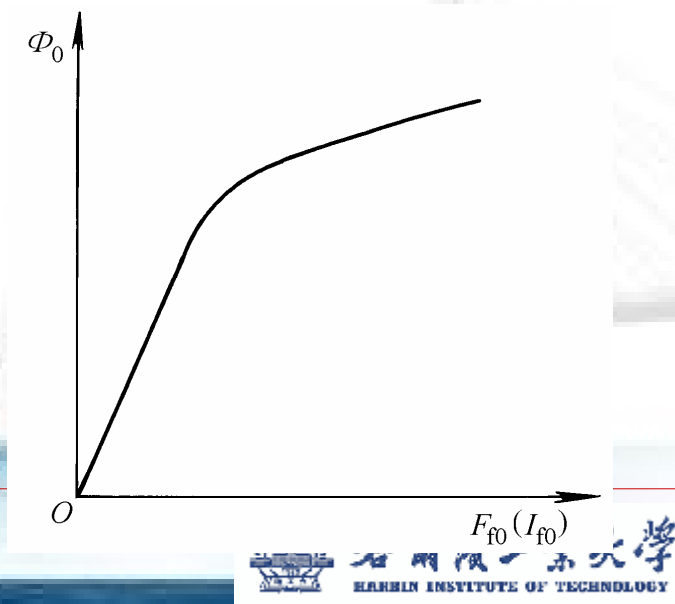
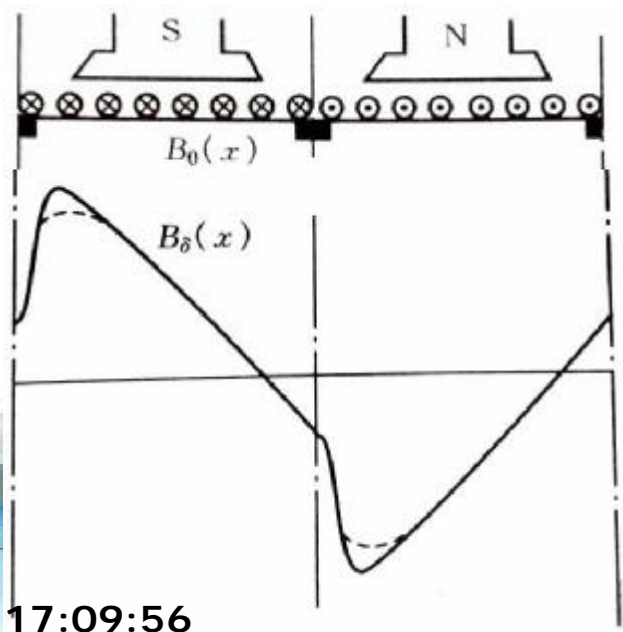
### ○ 电枢反应的影响

n 呈去磁作用。

半个磁极下的气隙磁通增加，半个磁极下的气隙磁通减少。

若磁路不饱和：增加的磁通量等于减少的磁通量，总磁通保持不变。

若磁路饱和：增加磁通时磁阻变大，会使增加的磁通量变小，因此磁通量的增加值会小于磁通量的减少值，总气隙磁通将有所减小，呈去磁作用。



17:09:56

54

## 6 直流电机的换向

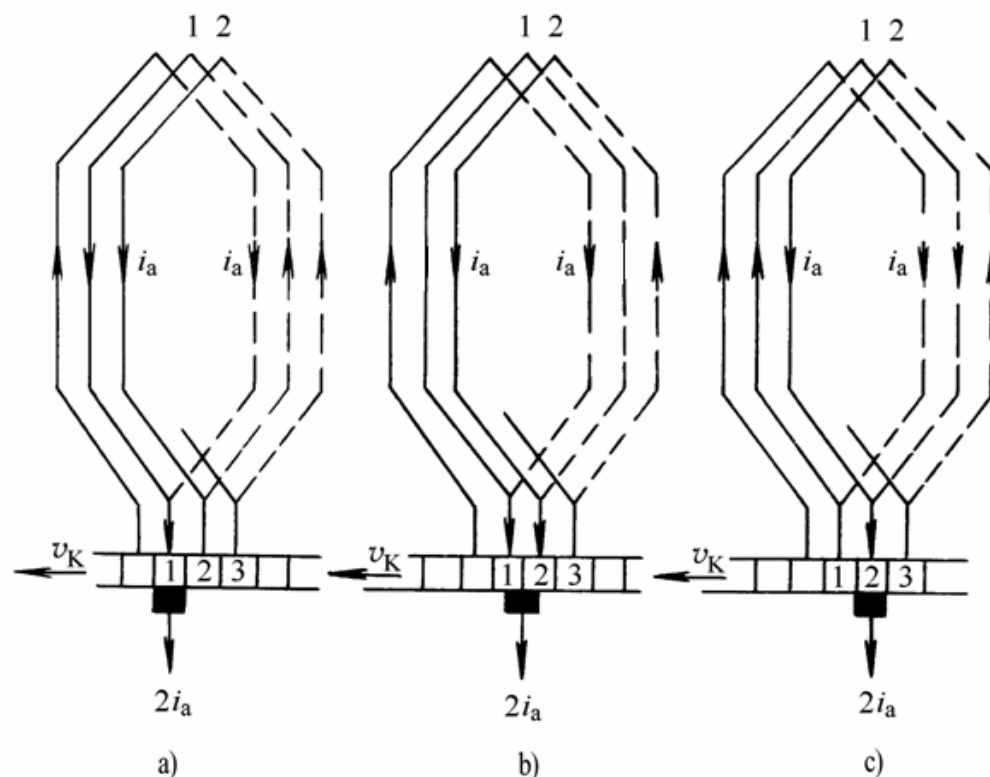
### ○ 直流电机的换向

**n** 换向过程：直流电机中，电枢绕组从一个磁极转向极性相反的另一个磁极，电枢绕组中的电流改变方向，这个过程叫做换向过程。

观察单叠绕组中元件1的实线电流：

- 1) 电刷与换向片1接触：元件1实线电流向下，大小为 $i_a$ ；
- 2) 电刷与换向片1和换向片2接触：元件1被电刷短路，电流为0；
- 3) 电刷与换向片2接触：元件1实线电流向上，大小为 $i_a$ ；

元件1中电流在被电刷短路过程中就改变了方向，即所谓进行了换向。



## 6 直流电机的换向

### ○ 直流电机的换向

- n** 换向过程：直流电机中，电枢绕组从一个磁极转向极性相反的另一个磁极，电枢绕组中的电流改变方向，这个过程叫做换向过程。
- n** 换向元件：处于换向过程的绕组元件叫换向元件。
- n** 换向周期：换向元件从开始换向到换向终止所经历的时间为换向周期。换向周期是极短的，只有千分之几秒。
- n** 换向位置：换向绕组元件所在的位置叫做换向位置。
- n** 换向问题是带有换向器电机的一个专门问题。换向不良将会在电刷下产生有害的火花，当火花超过一定程度，就会烧坏电刷和换向器，使电机不能继续运行。换向火花还产生高频的电磁波，干扰附近的电子设备。
- n** 转速和电枢电流越大，换向火花越大，因此直流电机的转速及电枢电流的最大值都要受到换向条件的限制。



## 6 直流电机的换向

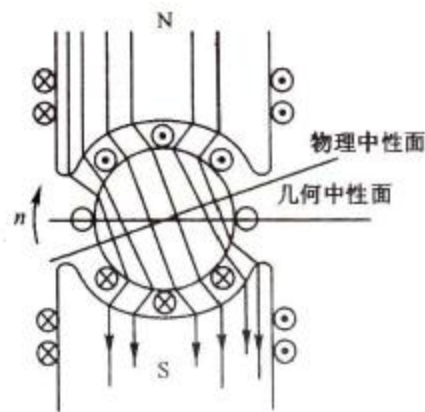
### ○ 换向过程中产生的两种电动势

#### n 自感电动势 $e_L$ :

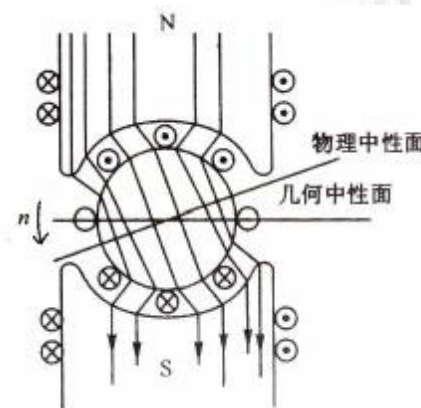
换向元件本身就是一个线圈，线圈必有自感作用，当换向元件中的电流由 $i_a$ 变为 $-i_a$ 时，换向元件必然产生自感电动势 $e_L$ ，根据楞次定律，自感电动势总是阻碍电流变化的，因为电流在减小，所以其方向与 $+i_a$ 方向相同。

#### n 感应电动势 $e_a$ :

换向元件处于几何中性线或其附近。而由于电枢反应，物理中性线与几何中性线不重合，即几何中性线处磁密不为零。换向元件切割磁力线产生感应电动势，根据右手定则，感应电动势与自感电动势方向相同。



电动机



发电机

## 6 直流电机的换向

### ○ 换向过程中产生的两种电动势

n 换向元件中总电势：

$$e_s = e_L + e_a$$

n 自感电动势和感应电动势总是阻碍换向的。

n 自感电动势和感应电动势使得换向元件被电刷短路时，换向元件内的电流不为零。

n 当被电刷短路的换向元件瞬时断开，换向元件中由于电流存在而存储的部分磁场能 $L_x i^2/2$ ，将以弧光放电的方式转化为热能，因而在电枢与换向片之间会出现火花。

n 电枢电流越大，电机转速越高，换向元件中的总电势 $e_s$ 越大，换向火花越强烈。

## 6 直流电机的换向

### ○ 改善换向的方法

直流电机在正常运行时允许有轻微火花，但不允许有强烈火花。

- n 移动电刷法：将电刷由几何中性面向物理中性面移动，直至换向火花最小位置，实际移动角度大于物理中性面便宜角度。
- n 换向磁极：在几何中性面设置附加换向磁极，它的激磁绕组与电枢绕组串联，使换向磁极的磁场方向必须与电枢磁场的方向相反。这个方法在大中型电机中广泛采用。
- n 选用合适电刷，改善换向片与电枢的电接触。

# 小结

## 电机概述

- n 电机定义：电磁感应定律为原理，来实现能量转换或信号传递的电气设备或机电元件。
- n 电机应用：电力系统，工厂，交通运输，军事，医疗，家用电器。
- n 电机分类：按原理分，按电流性质分，按运动方式分。

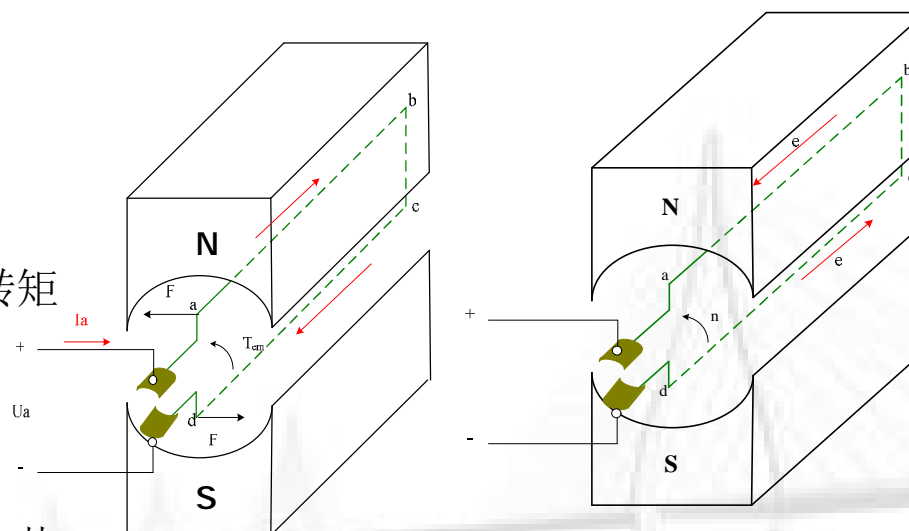
## 直流电机工作原理

- n 直流电动机工作原理：

外接电源  $\rightarrow$  电枢电流  $\rightarrow$  电磁转矩

- n 直流发电机工作原理：

外加力矩  $\rightarrow$  电枢转动  $\rightarrow$  感应电势



# 小结

## ○ 直流电机结构

定子 { 主磁极: 建立主磁场, 永磁式或电磁式  
机壳: 固定主磁极和端盖, 构成磁路的一部分  
电刷装置: 把直流电压、电流引入或引出的装置

气隙 使定子转子能够相对运动

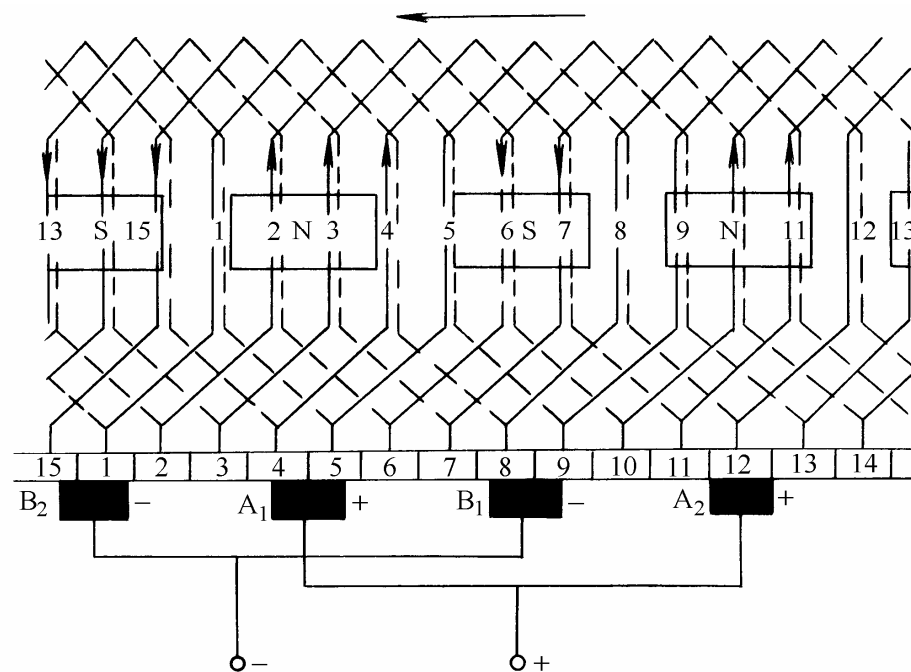
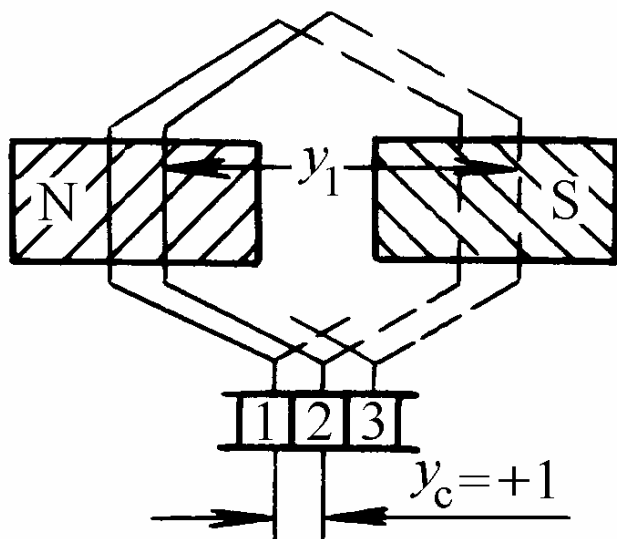
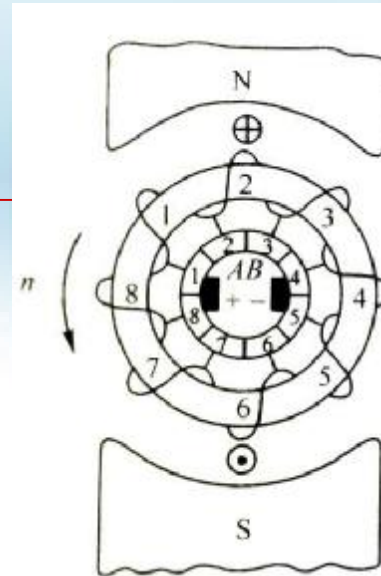
转子 { 电枢铁心: 主磁路的一部分, 嵌放电枢绕组  
电枢绕组: 电路的一部分, 实现能量转换  
换向器: 电刷和绕组之间直流和交流相互转换

# 小结

## ○ 直流电机的绕组

**n** 环形绕组

**n** 鼓形绕组：单叠绕组，单波绕组。





# 小结

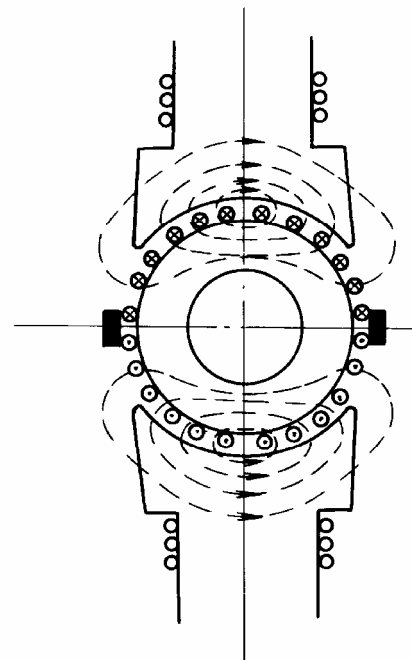
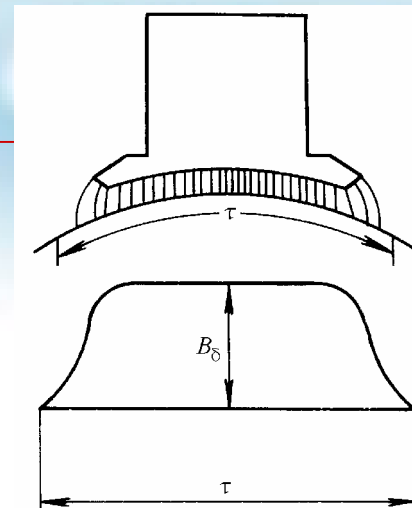
## ○ 直流电机的励磁方式

- n 永磁式
- n 电磁式：他励式、并励式，串励式、复励式

## ○ 直流电机的磁场

- n 空载磁场：电枢电流等于零或者很小，且可以不计其影响的一种运行状态  
主磁场+漏磁场
- n 负载磁场：空载磁场+电枢磁场
- n 电枢磁场：由电枢建立的磁场
- n 电枢反应：电枢磁动势对励磁磁动势所产生的气隙磁场的影响称为电枢反应
- n 电角：

$$\text{电角} = \text{极对数 } p \times \text{机械角}$$



# 小结

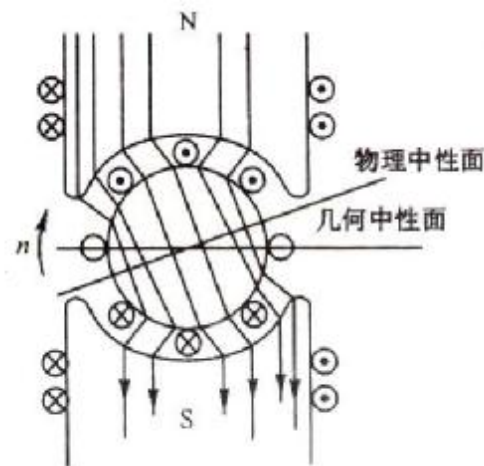
## ○ 电枢反应的影响

- n 使气隙磁场发生畸变：使物理中性面和几何中性面不再重合，几何中性面磁密不为零。

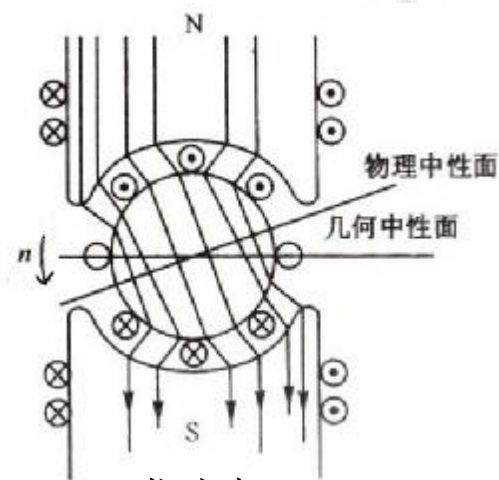
电动机：物理中性面逆着电机旋转方向转过一个角度。

发电机：物理中性面顺着电机旋转方向转过一个角度。

- n 呈去磁作用



电动机



发电机

# 小结

## ○ 直流电机的换向

- n 换向过程：直流电机中，电枢绕组从一个磁极转向极性相反的另一个磁极，电枢绕组中的电流改变方向，这个过程叫做换向过程。
- n 换向过程中产生的两种电动势：自感电动势+感应电动势
- n 自感电动势和感应电动势总是阻碍换向的。
- n 电枢电流越大，电机转速越高，换向元件中的总电势 $e_s$ 越大，换向火花越强烈。
- n 改善换向的方法：移动电刷、增加换向磁极、选用合适电刷