



# 智能系统控制实践(I)-2

## - 直流电机原理与结构



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 上节课小结

对磁路应掌握:

1) 基本关系/定义:

$$B = \mu H \quad \phi = Bs \quad F = Ni \quad U_m = Hl = \phi R_m \quad R_m = \frac{l}{\mu s}$$

2) 磁场/磁路基本定理:

$$\sum \phi_i = 0 \quad \sum H_i l_i = \sum Ni \quad e = -\frac{d\phi}{dt} = Blv \quad F = qv \times B = Bil$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 上节课小结

### 对比： 电路和磁路

电路	磁路
电动势 $E$ [V]	
电流 $I$ [A]	
电导率 $\gamma$ [S/m]	
电阻 $R(R=L/(\gamma S))$ [ $\Omega$ ]	
电导 $G(1/R)$ [1/S]	
欧姆定律 $U=IR$	
基尔霍夫第一定律 $\sum I=0$	
基尔霍夫第二定律 $\sum E=\sum U$	

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 思考

仔细观察录像中制作的简易旋转电机，根据电路课程已学知识，分析其原理。

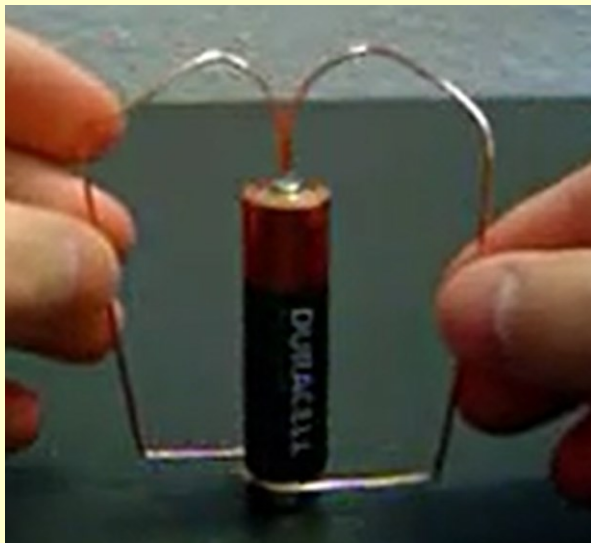
提示：1) 碱性干电池的外筒是钢质材料

2) 圆筒磁钢可以导电，且磁钢的电阻率较大。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 思考



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 目录

1. 电机概述
2. 直流电机工作原理
3. 直流电机结构
4. 电机中的铁磁与永磁材料
5. 直流电机的磁场
6. 直流电机的换向

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 一、电机概述

### 1. 电机在国民经济中的作用

世界总用电量的70%以上为电机直接消耗。

**工农业生产**

**交通运输等其它领域**

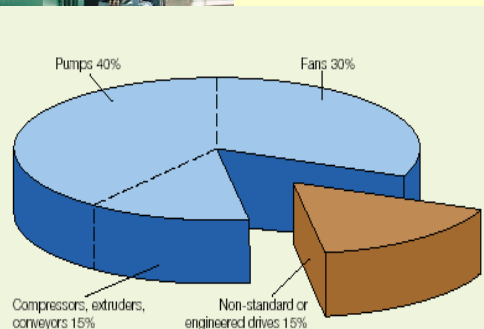
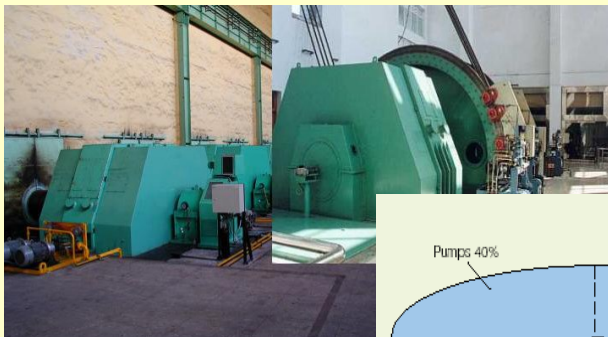
**军事国防领域**

**日常生活及家用电器**

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 一、电机概述



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 一、电机概述



大型同步轧钢电机



隐极同步电机



直流电动机

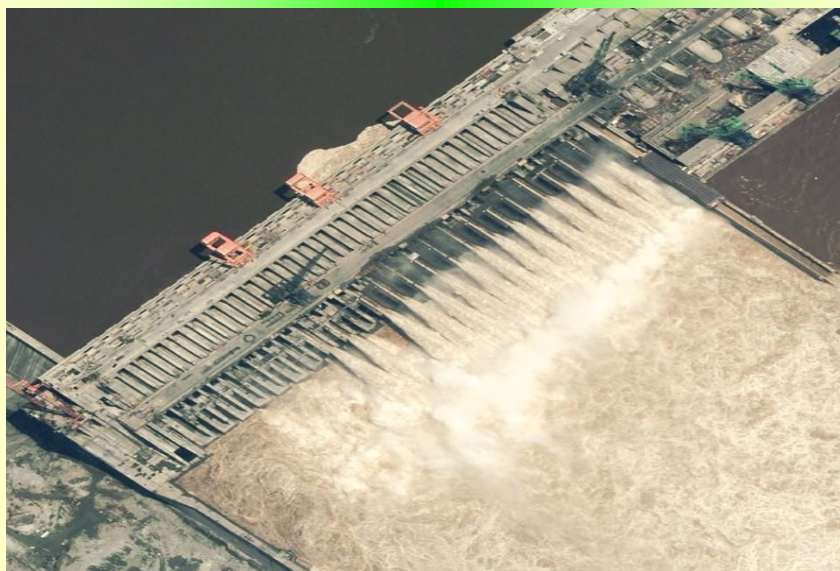


异步电动机

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 一、电机概述



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 一、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元/(kW·h)计算，每年售电收入可达181亿~219亿元

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 一、电机概述

### 我国电机工业的发展现状

- 中小型电机生产总量为世界第一
- 大型发电机国产化已经世界领先
- 新型电机紧跟世界先进水平
- 稀土永磁电机异军突起

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



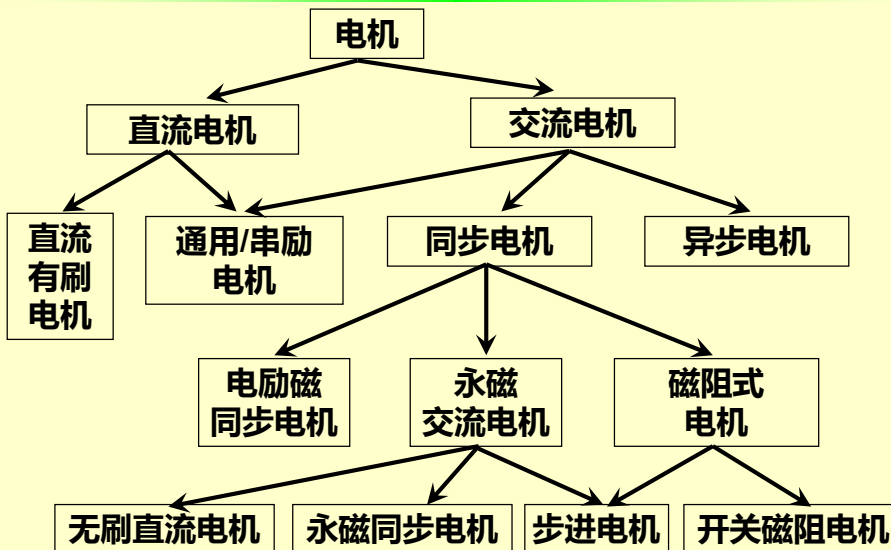
## 一、电机概述

### 2. 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。



## 一、电机概述



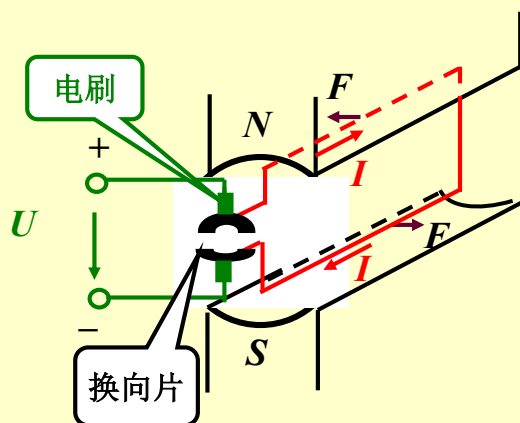
## 目 录

1. 电机概述
2. 直流电机工作原理
3. 直流电机结构
4. 电机中的铁磁与永磁材料
5. 直流电机的磁场
6. 直流电机的换向

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 二、直流电机的工作原理



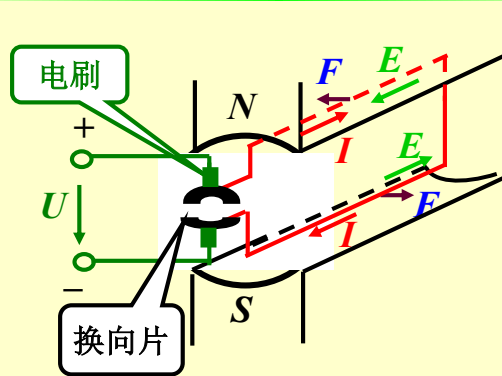
由左手定则，通电线圈在磁场的作用下，使线圈逆时针旋转。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心





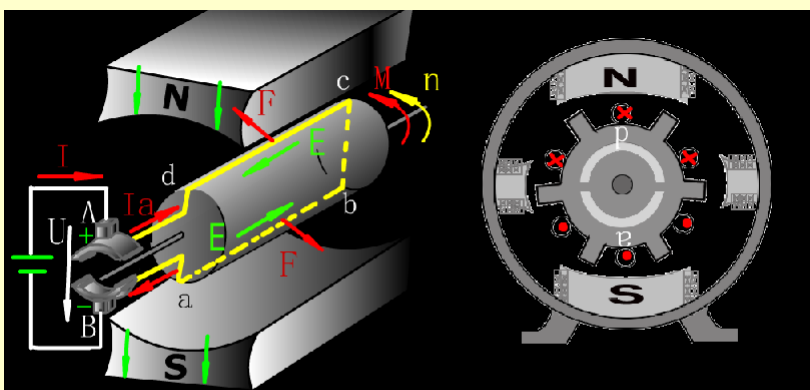
## 二、直流电机的工作原理



由右手定则，线圈在磁场中旋转，将在线圈中产生感应电动势，感应电动势的方向与电流的方向相反。



## 二、直流电机的工作原理



### 工作原理:

外接电源-电枢电流-电磁力-电磁转矩-电枢旋转-感应电势  
 <动力矩> <反电动势>



## 目 录

1. 电机概述
2. 直流电机原理
- 3. 直流电机结构**
4. 电机中的铁磁与永磁材料
5. 直流电机的磁场
6. 直流电机的换向

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



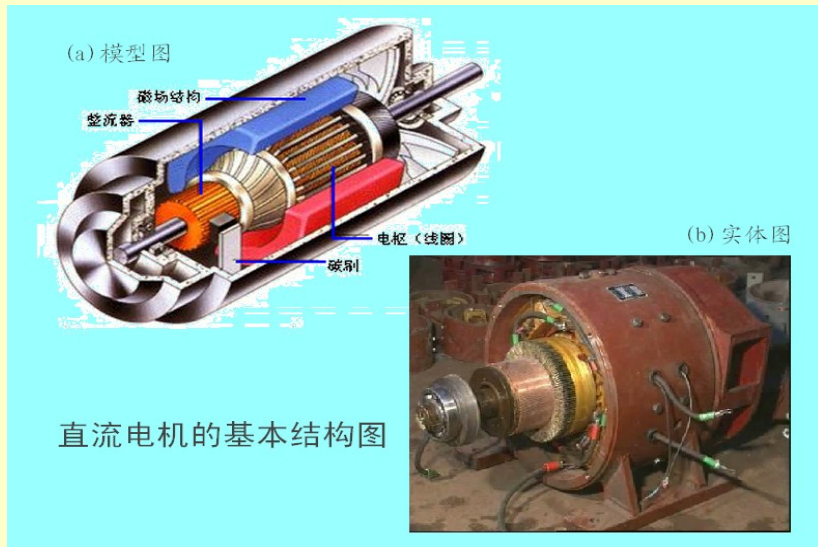
## 三、直流电机的结构



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 三、直流电机的结构



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 三、直流电机的结构

#### 1. 定子

按定子磁场产生方式分类：

- 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：磁极上的线圈通以直流电产生磁通，称为励磁。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



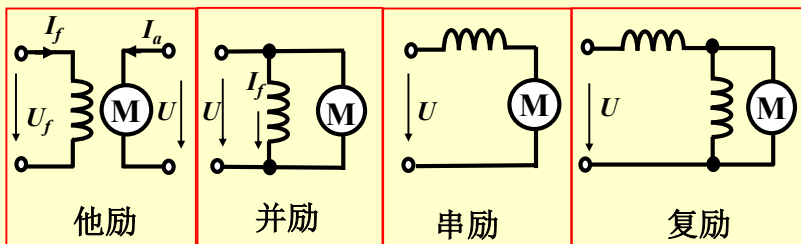
### 三、直流电机的结构

**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联接有串有并，接在同一电源上。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 三、直流电机的结构

#### 1. 定子

##### 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。

##### 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、电刷装置

作用：对电枢电路的引出（或引入）装置。

构成：电刷、刷盒、刷杆和连线等。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 三、直流电机的结构

#### 2. 转子（又称电枢）

主要由换向器、铁芯、绕组组成。

#### 4、换向器

作用：与电刷配合逆变（电动机）或整流（发电机）。

构成：由许多燕尾形的换向片排列成一个圆筒，片间用V形云母绝缘，两端用两个形环夹紧而构成。

#### 5、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：用厚0.2-0.5mm，冲有齿、槽的硅钢片叠压夹紧而成。



### 三、直流电机的结构

#### 6、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导线绕成，上下层线圈之间以及线圈与电枢铁心间绝缘，并用槽楔压紧。

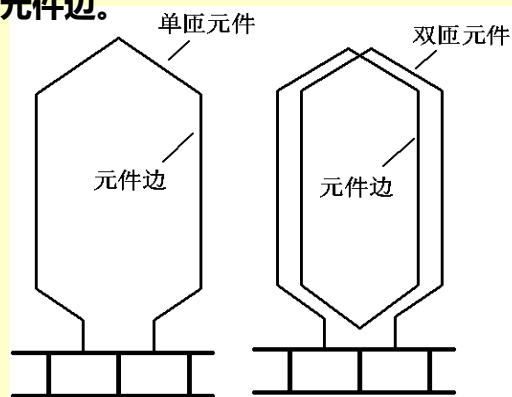
- **电枢绕组是直流电机电路部分，是机电能量转换枢纽。**
- **电枢绕组构成原则：**
  1. **产生最大的感应电势；**
  2. **可以承载一定的电流；**
  3. **结构简单；**
  4. **节约有色金属。**



### 三、直流电机的结构

#### 直流电机的电枢绕组

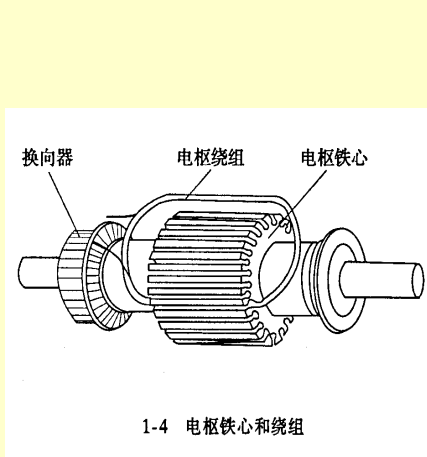
- 元件:又称线圈,是构成绕组的基本单元。
- 有效边:切割磁场的元件边。
- 匝数:单匝、多匝
- 层数:单层、多层



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 三、直流电机的结构



1-4 电枢铁心和绕组

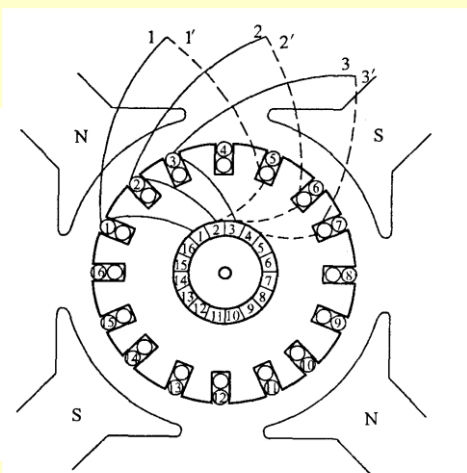


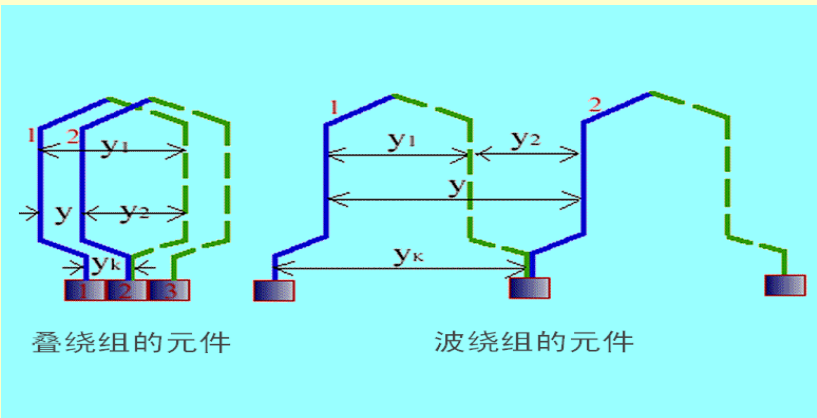
图 1-21 绕组元件在电枢上的排列方式

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

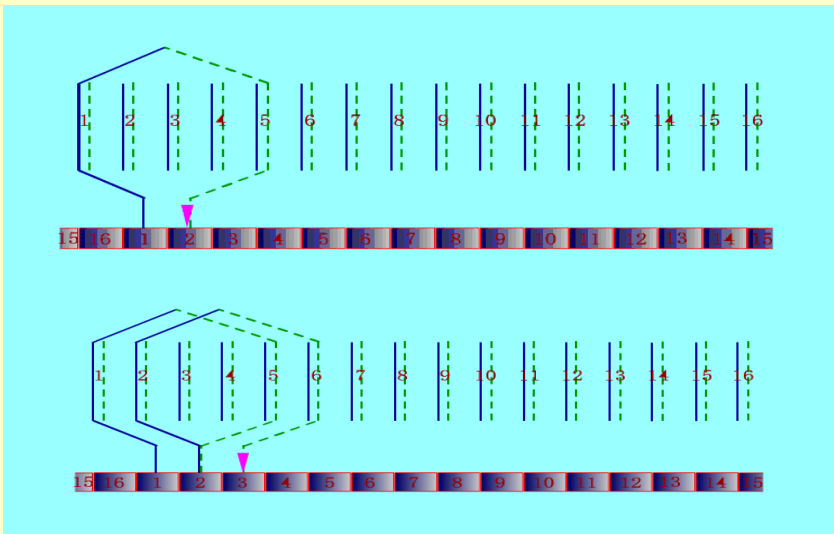


### 三、直流电机的结构

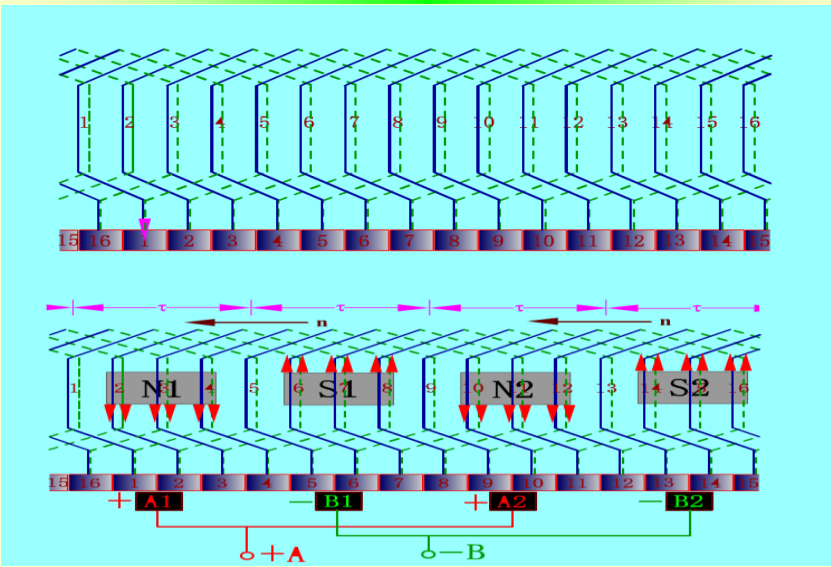
电枢绕组分类：  
叠绕组，波绕组



### 三、直流电机的结构



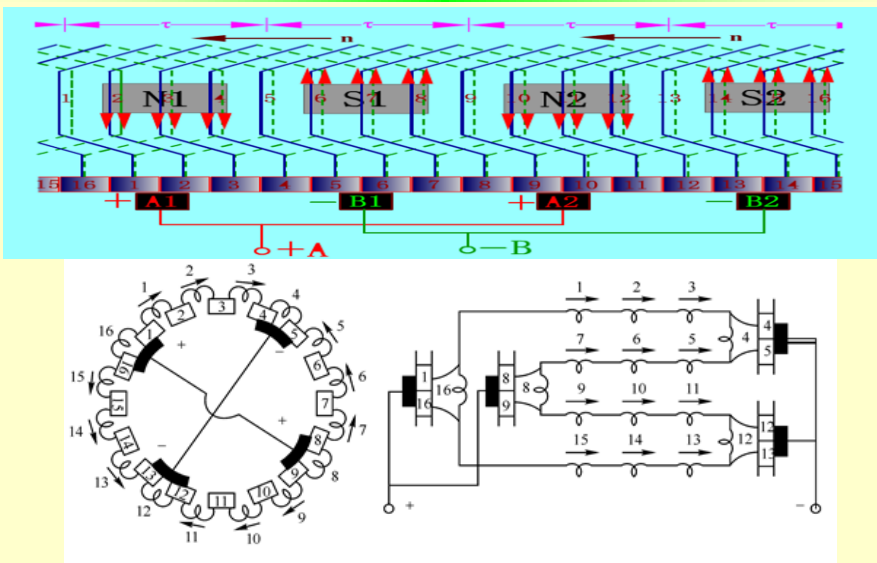
### 三、直流电机的结构



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



### 三、直流电机的结构



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心





### 三、直流电机的结构

直流电机的电枢绕组

- 对于常见的单叠绕组：

磁极对数 $p$  = 电刷对数 $m$  = 电流支路对数 $a$

换向片数 $K$  = 电枢绕组元件数 $C$  = 槽数 $S$



### 三、直流电机的结构

直流电机结构小结：

定子

**主磁极**：产生恒定气隙磁通，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**



## 目 录

1. 电机概述
2. 直流电机原理
3. 直流电机结构
4. 电机中的铁磁与永磁材料
5. 直流电机的磁场
6. 直流电机的换向

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 四、电机中的铁磁与永磁材料

### 1. 磁化曲线和磁滞回线

电机的材料主要包括：铜、铁

铜—绕组：电机的电路部分

铁—铁心：电机的磁路部分



非线性的B-H曲线

磁导率 $\mu$ 大，是真空磁导率 $\mu_0$ 的2000 ~ 8000倍。

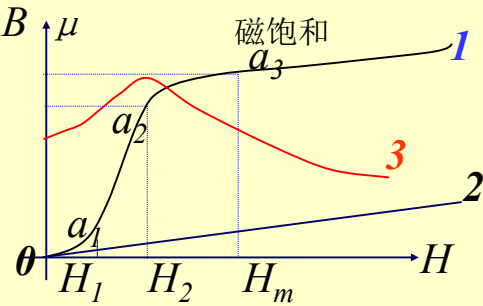
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 四、电机中的铁磁与永磁材料

### 铁磁材料的导磁性能

铁磁材料中的磁感应强度  $B$  随外磁场  $H$  变化。



$$B = \mu H$$

- 1 -- 铁磁材料的磁化曲线
- 2 -- 真空磁化曲线
- 3 -- 铁磁材料的磁导率曲线

铁磁材料的磁导率不是常数,而是随外磁场的变化而变化。

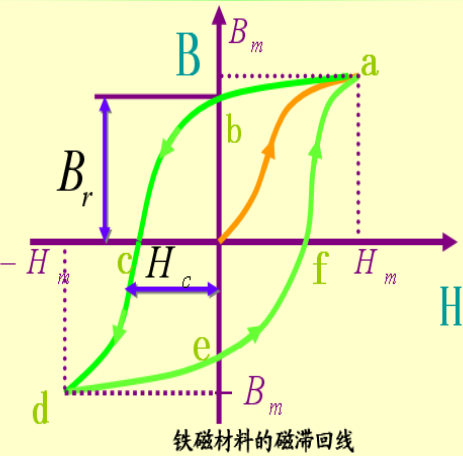


## 四、电机中的铁磁与永磁材料

### 磁滞现象与磁滞回线

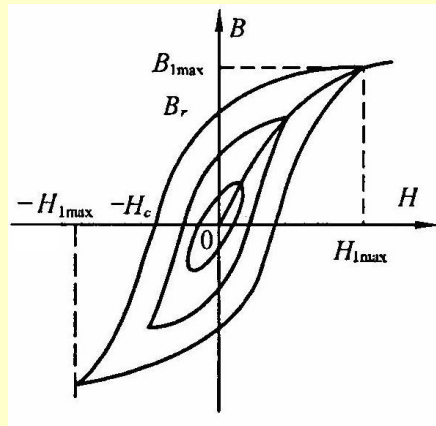
磁感应强度  $B$  的变化总是落后于外磁场  $H$  的变化, 称**磁滞现象**。

$B_r$  — 铁磁材料的剩余感应强度, 剩磁  
 $H_c$  — 铁磁材料的矫顽力



## 四、电机中的铁磁与永磁材料

若反复磁化若干循环后，就可得到一个近似对称于原点的闭合曲线，称为铁磁材料的**磁滞回线**。各磁滞回线顶点的连线称为**基本磁化曲线**。



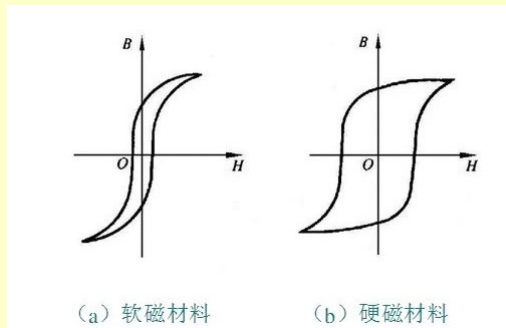
铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线



## 四、电机中的铁磁与永磁材料

**软磁材料**： $B_r$ ,  $H_c$  较小，磁滞回线较窄，磁滞损耗小  
如：纯铁、铸铁、电工钢、坡莫合金

**硬磁材料**： $B_r$ ,  $H_c$  较大，磁滞回线较宽，磁滞损耗大  
如：钨钢、钴钢、镍钴合金、稀土合金



(a) 软磁材料

(b) 硬磁材料

工程上铁磁材料的基本磁化曲线可用数据表或曲线表达。



## 四、电机中的铁磁与永磁材料

铁心损耗

铁心损耗包括磁滞损耗和涡流损耗.

铁心损耗 $P_c$ 的经验公式:

$$P_c = P_h + P_e = (k_h f B_m^\alpha + k_e f^2 B_m^2) V$$

工程应用中更常用铁磁材料的单位质量铁耗:

$$P_{Fe} = P_{1/50} (f/50)^\beta B_m^2$$

$$\beta = 1.2$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

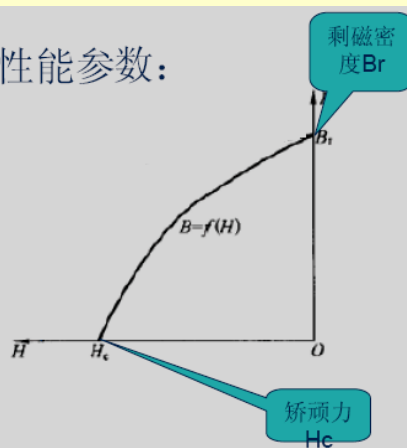


## 四、电机中的铁磁与永磁材料

永磁材料

● 永磁材料的主要性能参数:

- 剩磁密度  $B_r$
- 矫顽力  $H_c$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

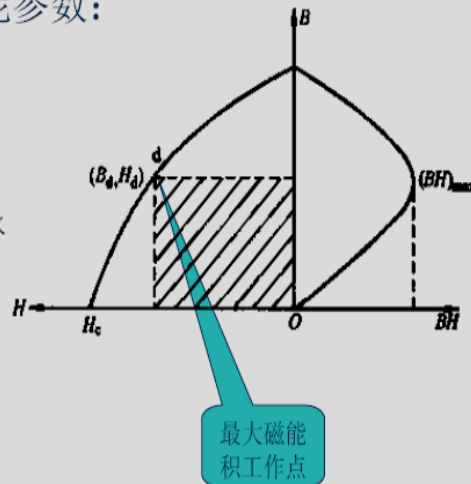


## 四、电机中的铁磁与永磁材料

### ● 永磁材料的主要性能参数：

- 最大磁能积 $(BH)_{\max}$
- 退磁线上某点表示永磁材料的一个工作状态，该点的磁能积为 $BH$ 的乘积，表征该状态下永磁材料的磁场能量密度。

- $(BH)_{\max}$ 代表了永磁材料的磁性能



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 四、电机中的铁磁与永磁材料

### ● 永磁电机的磁路计算：

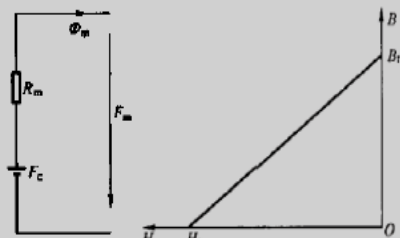
- 永磁电机磁路由永磁体、空气隙和铁心构成，磁路可分为永磁体部分和外磁路部分
- 外磁路部分与电励磁电机相同，只是注意永磁体部分磁路的计算

### ● 永磁体的等效磁路

- 永磁体在整个磁路中相当于一个带内磁阻的磁源（压源 $F_m$ 流源）

$$B = B_r - \frac{B_r}{H_c} H = B_r - \mu_0 \mu_r H$$

$$\text{考虑: } \phi_m = BS_m, F_m = Hh_m$$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 四、电机中的铁磁与永磁材料

### ● 永磁材料的主要性能参数：

#### - 温度系数（通常为负的）

对于永磁材料而言，是一个很不利性能参数

永磁体通常工作在电磁装置内，装置所处环境温度的变化和装置产生的热量使永磁体工作温度变化，对永磁体的性能有一定影响，其影响可用温度系数表示。

在永磁体允许的工作范围内，其所处环境温度每变化  $1^{\circ}\text{C}$ ，剩余磁感应强度变化的百分比称为剩磁温度系数，矫顽力变化的百分比称为矫顽力温度系数，分别用  $\alpha_{Br}$  和  $\alpha_{Hc}$  表示。温度系数表征了永磁材料的温度稳定性。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 四、电机中的铁磁与永磁材料

### ● 主要永磁材料的性能：钕铁硼

钕铁硼永磁的主要成分是  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ，是目前磁性能最强的永磁材料。它的最大磁能积可达  $398\text{kJ}/\text{m}^3$ ，为铁氧体永磁材料的 5~12 倍、铝镍钴永磁材料的 3~10 倍，理论值为  $527\text{kJ}/\text{m}^3$ ；剩磁最高可达  $1.47\text{T}$ ，矫顽力最高可超过  $1000\text{kA}/\text{m}$ ，能吸起相当于自身重量 640 倍的重物。由于不含钴且钕在稀土中的含量是钕的十几倍，钕铁硼的价格比稀土钴要低得多。

钕铁硼磁体居里温度低，为  $310\sim 410^{\circ}\text{C}$ ，温度稳定性较差，剩磁温度系数为  $-(0.095\sim 0.15)\%/K$ ，矫顽力温度系数为  $-(0.4\sim 0.7)\%/K$ ，通常最高工作温度为  $150^{\circ}\text{C}$ ，目前已有商业化的耐  $200^{\circ}\text{C}$  高温的钕铁硼永磁。常温下退磁曲线为直线，但高温下退磁曲线的下部发生弯曲，若设计不当，易发生不可逆退磁。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 四、电机中的铁磁与永磁材料

其它铁磁材料主要特性

温度特性

当铁磁材料的温度升到一定程度时,铁磁材料会变为弱磁物质。居里点: 铁磁材料转化为弱磁物质 $\mu_r = 1$ 的温度称为居里点。

电阻率特性

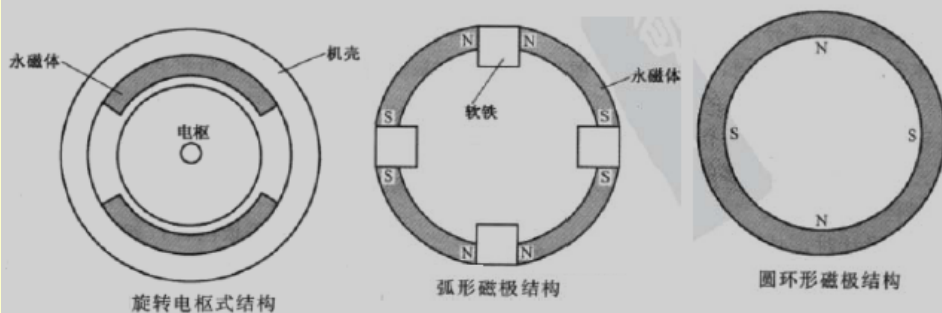
常用的铁氧体、钕铁硼等永磁材料的电阻率是纯铁的100-1000倍以上, 铁耗小。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 四、电机中的铁磁与永磁材料

### ● 永磁电机的磁路结构:



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心





# 目 录

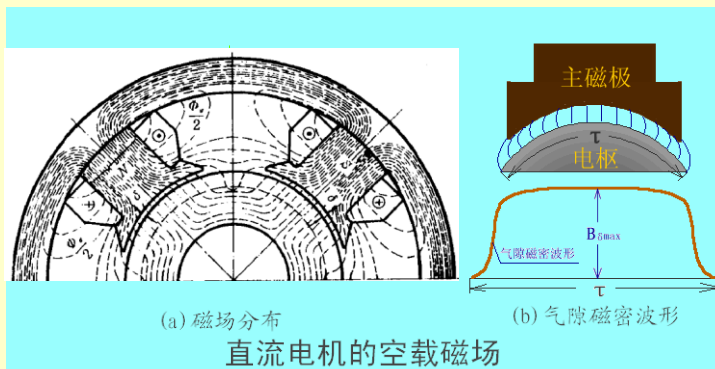
1. 电机概述
2. 直流电机原理
3. 直流电机结构
4. 电机中的铁磁与永磁材料
5. 直流电机的磁场
6. 直流电机的换向



## 五、直流电机的磁场

### • 1、空载时直流电机的磁场

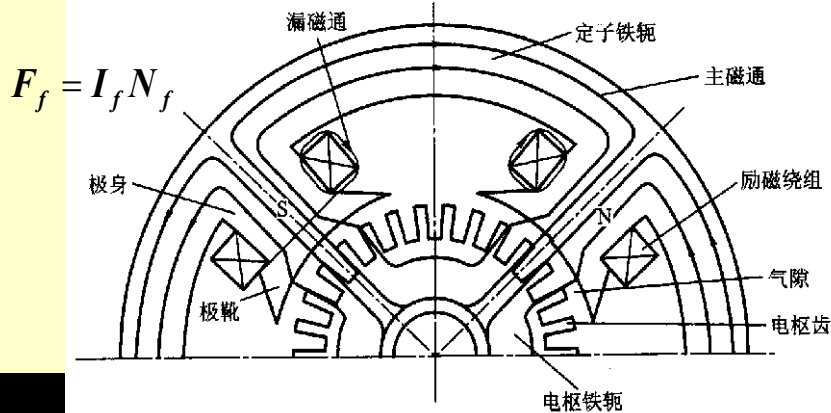
空载磁场为电枢电流等于零时，由励磁绕组电流单独作用产生的磁场，又称为主极磁场。



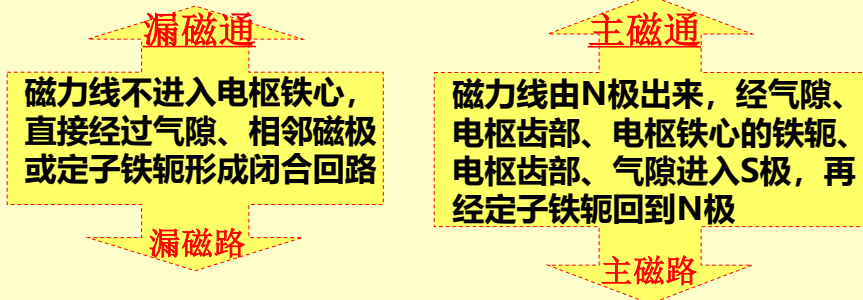
## 五、直流电机的磁场

以一台四极直流电机空载时的磁场为例：

当励磁绕组的串联匝数为 $N_f$ ，流过电流 $I_f$ ，每极的励磁磁动势为： $I_f$



## 五、直流电机的磁场

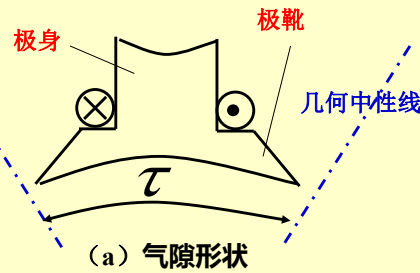


直流电机中，主磁通是主要的，它能在电枢绕组中感应电动势或产生电磁转矩，而漏磁通没有这个作用，它只是增加主磁极磁路的饱和程度。在数量上，漏磁通比主磁通小得多，大约是主磁通的20%。

## 五、直流电机的磁场

空载时，励磁磁动势主要消耗在气隙上。当忽略铁磁材料的磁阻时，主磁极下气隙磁通密度的分布就取决于气隙的大小和形状。

磁极中心及附近的气隙小且均匀，磁通密度较大且基本为常数，靠近极尖处，气隙逐渐变大，磁通密度减小；极尖以外，气隙明显增大，磁通密度显著减少，在磁极之间的几何中性线处，气隙磁通密度为零。

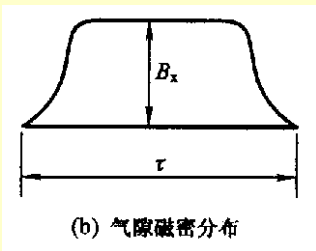


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

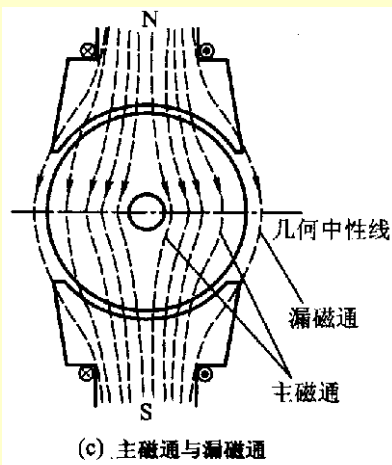


## 五、直流电机的磁场

空载时的气隙磁通密度为一平顶波，如下图(b)所示。



空载时主磁极磁通的分布情况，如右图(c)所示。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

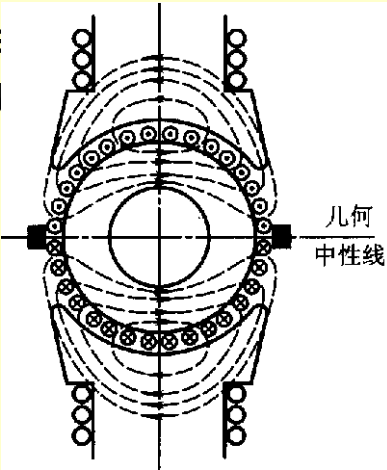


## 五、直流电机的磁场

### 2、负载时直流电机的磁场

直流电机负载后，电枢电流产生的磁动势，电枢磁动势的出现使电机磁场发生变化。

假设励磁电流为零，只有电枢电流。由图可见电枢磁动势产生的气隙磁场在空间的分布情况，电枢磁动势为交轴磁动势。



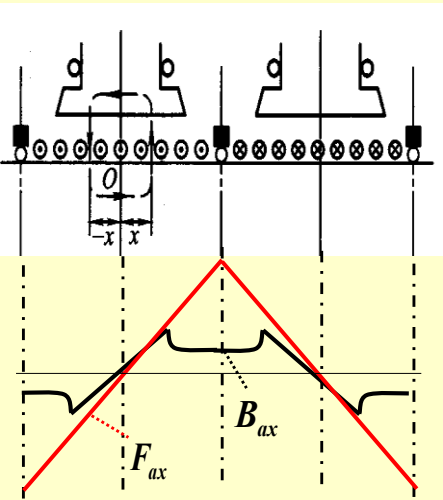
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 五、直流电机的磁场

假定电枢上有无穷多元件分布，则电枢磁动势在气隙圆周方向空间分布呈三角波，如图中  $F_{ax}$  所示。

主磁极下气隙长度基本不变，而两个主磁极之间，气隙长度增加得很快，致使电枢磁动势产生的气隙磁通密度为对称的马鞍型，如图中  $B_{ax}$  所示。

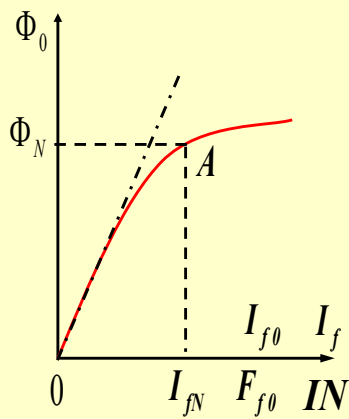


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 五、直流电机的磁场

为了经济、合理地利用材料，一般直流电机额定运行时，额定磁通  $\Phi_N$  设定在图中A点，即在磁化特性曲线开始进入饱和区的位置。

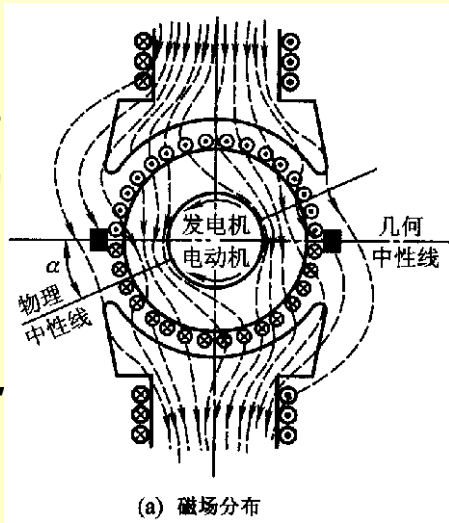


## 五、直流电机的磁场

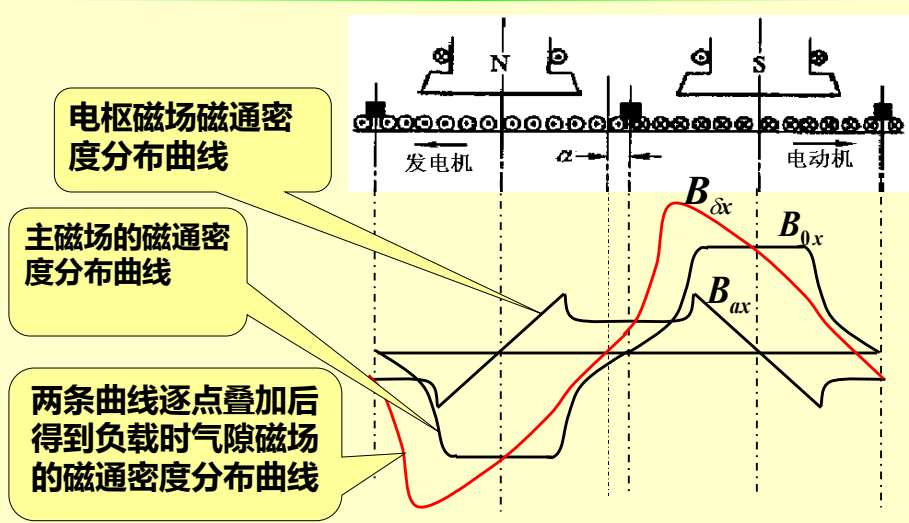
### 3、直流电机的电枢反应

电机负载运行后，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**。

1、当电刷在几何中性线上时，将主磁场分布和电枢磁场分布叠加，可得到负载后电机的磁场分布情况，如图 (a) 所示。



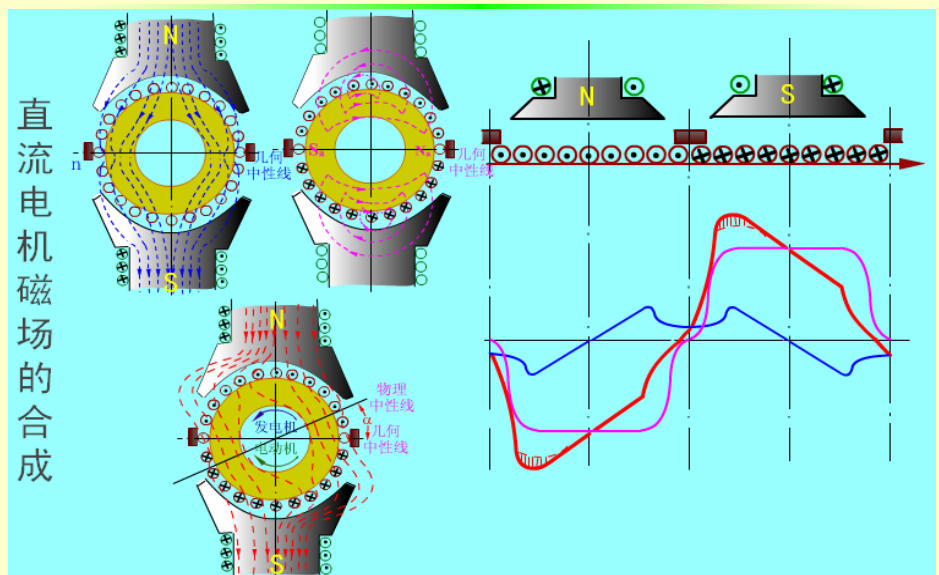
## 五、直流电机的磁场



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 五、直流电机的磁场



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 五、直流电机的磁场

电刷在几何中性线时，电枢反应的特点：

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，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，磁通密度的曲线与空载时不同。

2) 对主磁场起去磁作用 电机正常运行于磁化曲线的膝部，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。



## 目 录

1. 电机概述
2. 直流电机原理
3. 直流电机结构
4. 电机中的铁磁与永磁材料
5. 直流电机的磁场
6. 直流电机的换向



## 六、直流电机的换向

### 换向概述

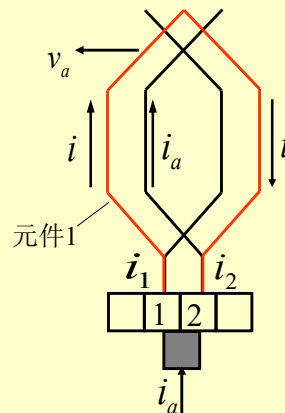
直流电机的某一个元件经过电刷，从一条支路换到另一条支路时，元件里的电流方向改变，即换向。

为了分析方便假定换向片的宽度等于电刷的宽度。

电刷与换向片1接触时，元件1中的电流方向如图所示，大小为  $i = i_a$ 。

电枢移到电刷与换向片2接触时，元件1的被短路，电流被分流。

电刷仅与换向片2接触时，元件1中的电流方向如图所示，大小为  $i = -i_a$ 。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 六、直流电机的换向

元件从开始换向到换向终了所经历的时间，称为换向周期。换向周期通常只有千分之几秒。直流电机在运行中，电枢绕组每个元件在经过电刷时都要经历换向过程。

换向问题很复杂，换向不良会在电刷与换向片之间产生火花。当火花大到一定程度，可能损坏电刷和换向器表面，使电机不能正常工作。

产生火花的原因很多，除了电磁原因外，还有机械的原因。此外换向过程还伴随着电化学和电热学等现象。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心





## 六、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**  $e_L$ ：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、切割电动势总是阻碍换向的。

换向元件中的合成电动势为：
$$\sum e = e_L + e_a$$



## 六、直流电机的换向

### 改善换向的方法

- 1 将电刷由几何中性面向物理中性面移动，直至换向火花最小为止，实际移动角度大于物理中性面偏移角度。
- 2 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。
- 3 选择合适的电刷，改善换向片与电刷的电接触。



## 本节课小结

1. **掌握**直流电机工作原理。
2. **熟悉**直流电机的结构组成。
3. **了解**直流电机中的铁磁/永磁材料基本特点，**了解**直流电机运行中磁场和换向的基本特点。

参考教材:

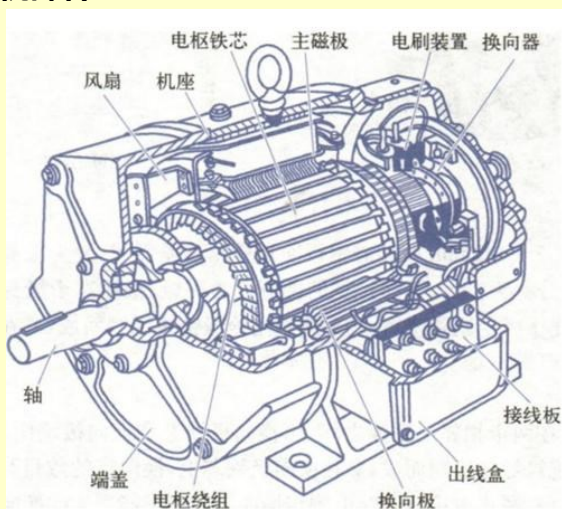
顾绳谷.《电机及拖动基础(第n版)》.机械工业出版社

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 本节课小结

识别下面直流电机部件:

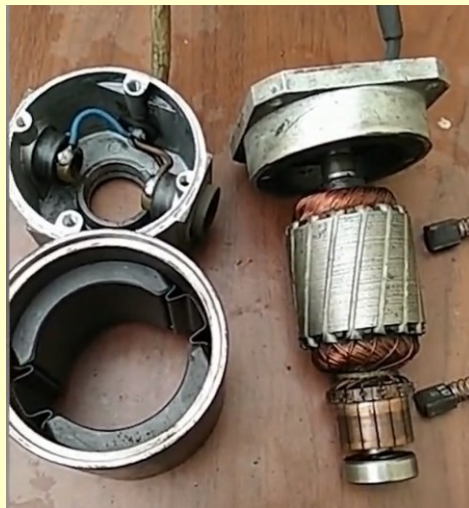


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 本节课小结

拆开的直流电机，识别各主要部件，讨论如何组装？



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 致 谢

本文档所引用的许多素材，来源于互联网上国内外的课件、科技论文、文章、网页等。本文引用只是为了给学生提供更好的教学素材，非商业目的。对这些所引用素材的原创者，在此表示深深的谢意。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

