

自动控制实践(A)-2

- 直流电机原理与结构



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:

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

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 γ [S/m]	
电阻 $R(R=L/(\gamma S))$ [Ω]	
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



上节课思考

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。

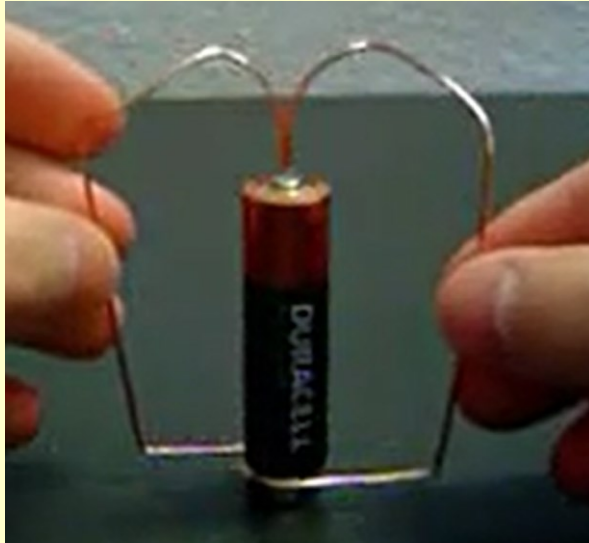
提示：1) 碱性干电池的外筒是钢质材料

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



上节课思考



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

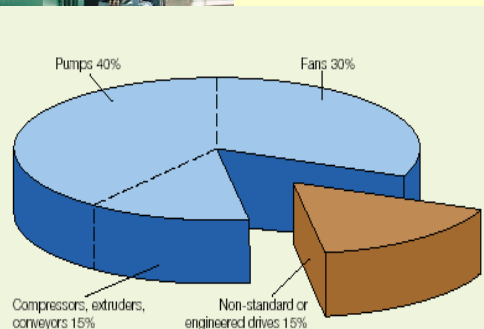
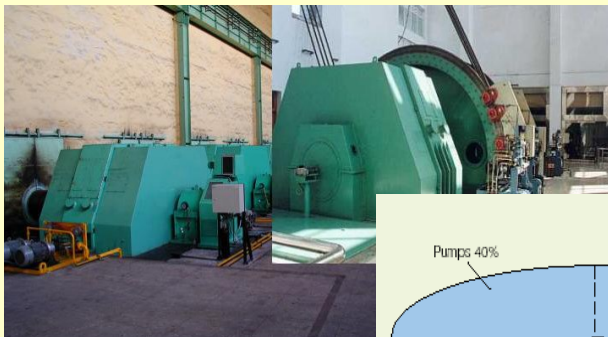
军事国防领域

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

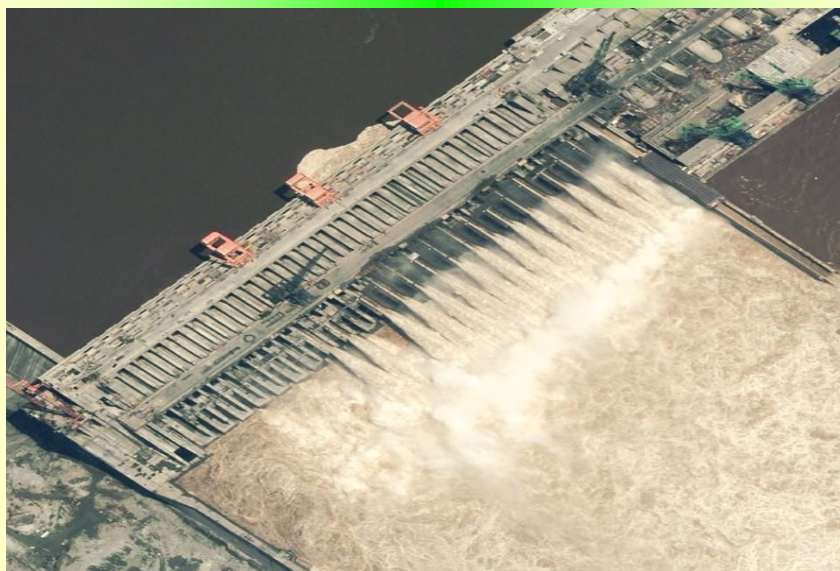


异步电动机

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

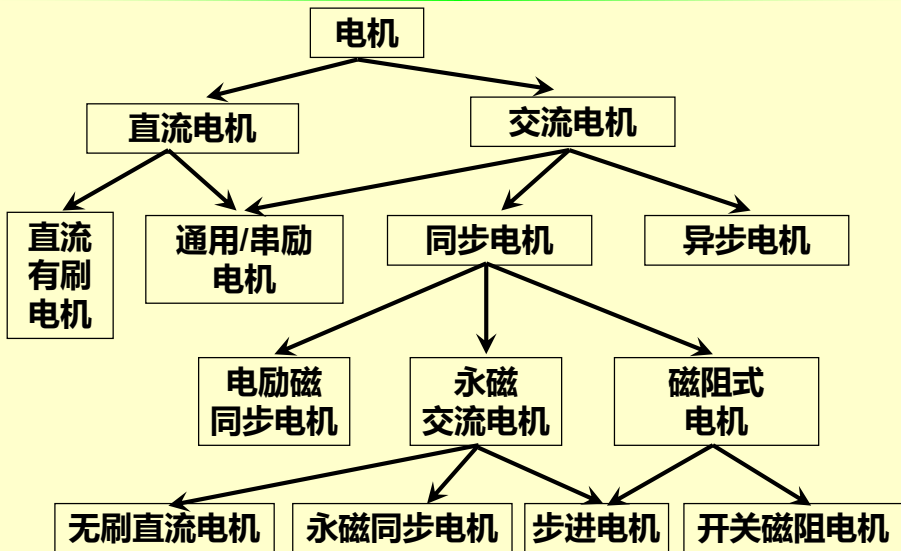
2. 电机的基本功能:

- * 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。

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

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
- 大型发电机已经可以实现国产化
- 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

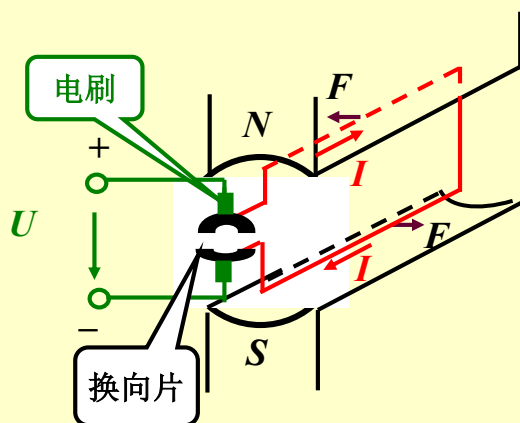


目 录

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



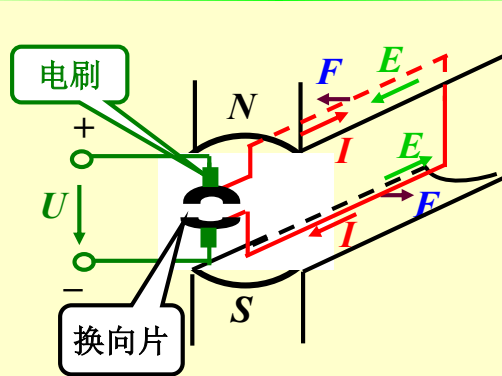
二、直流电机的工作原理



由左手定则，通电线圈在磁场的作用下，使线圈逆时针旋转。



二、直流电机的工作原理

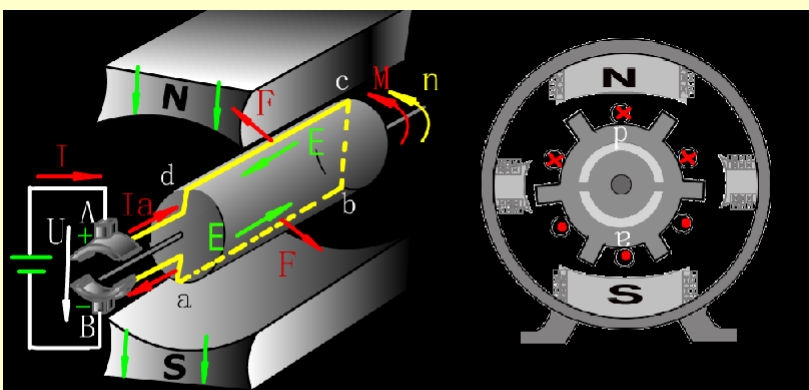


由右手定则，线圈在磁场中旋转，将在线圈中产生感应电动势，感应电动势的方向与电流的方向相反。

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



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>

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

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



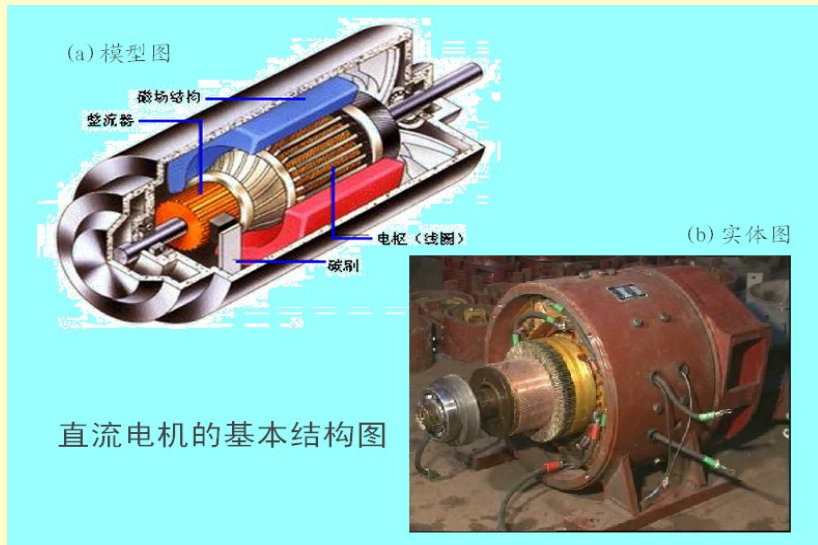
三、直流电机的结构



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



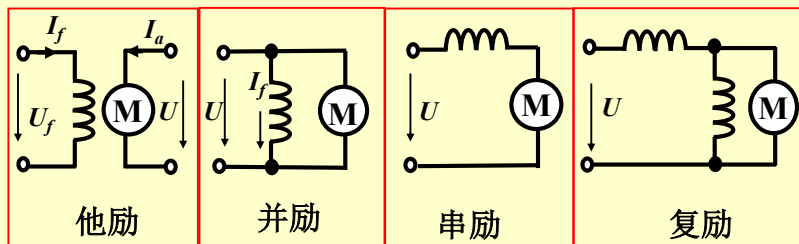
三、直流电机的结构

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。

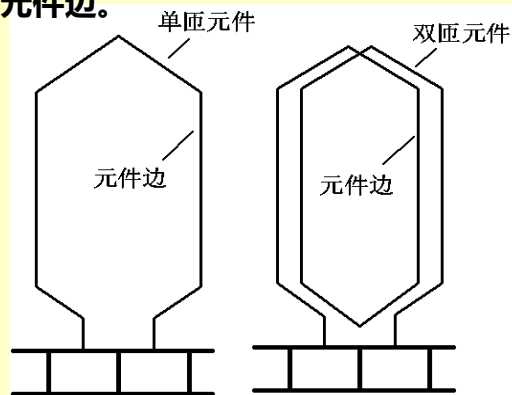
- **电枢绕组是直流电机电路部分，是机电能量转换枢纽。**
- **电枢绕组构成原则：**
 - 1. 产生最大的感应电势；**
 - 2. 可以承载一定的电流；**
 - 3. 结构简单；**
 - 4. 节约有色金属。**



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

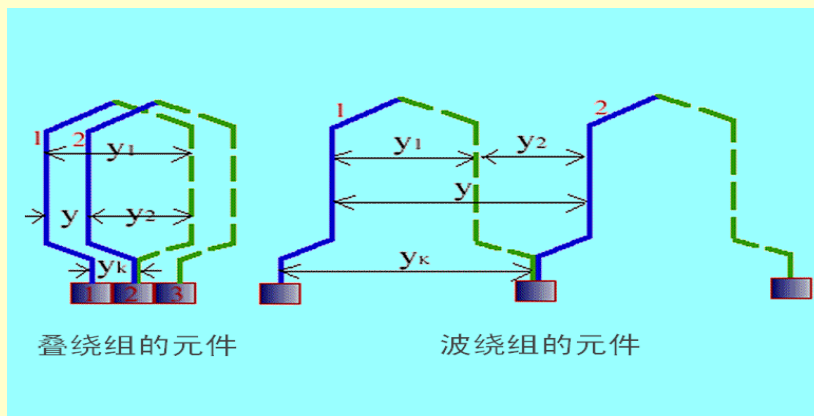


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



三、直流电机的结构

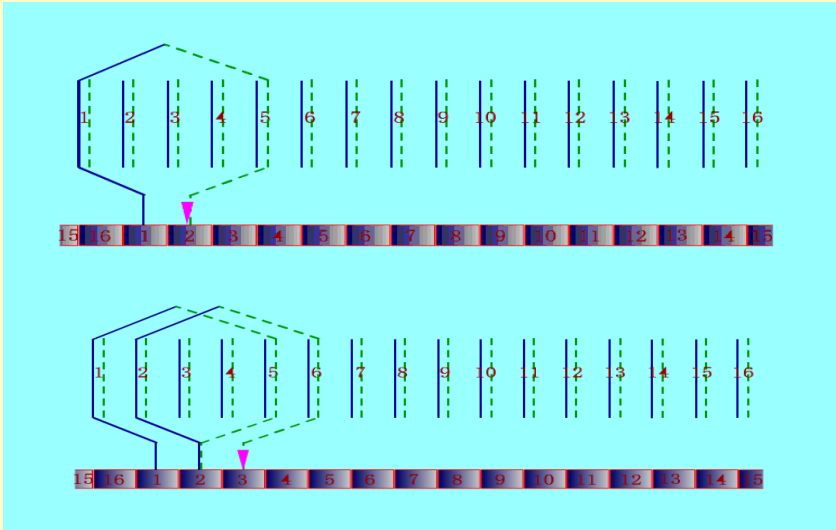
电枢绕组分类: 叠绕组, 波绕组



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



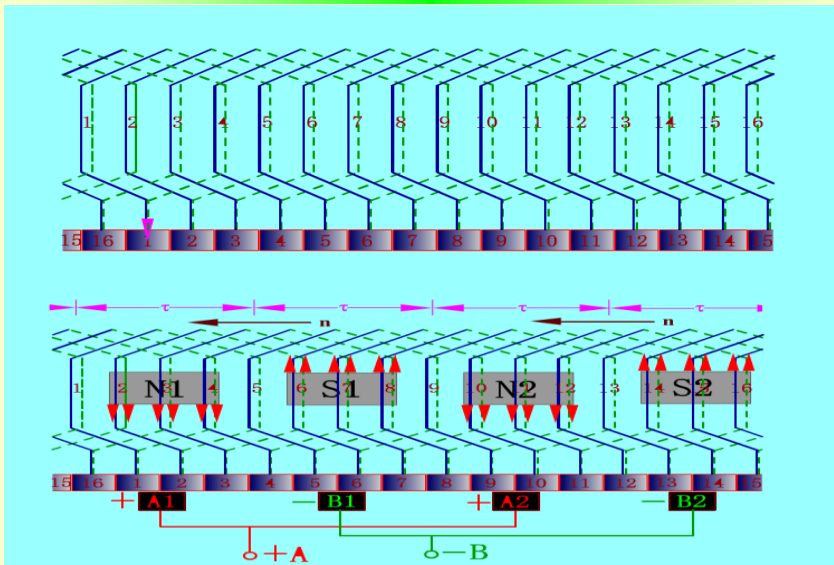
三、直流电机的结构



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

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 μ 大，是真空磁导率 μ_0 的2000 ~ 8000倍。

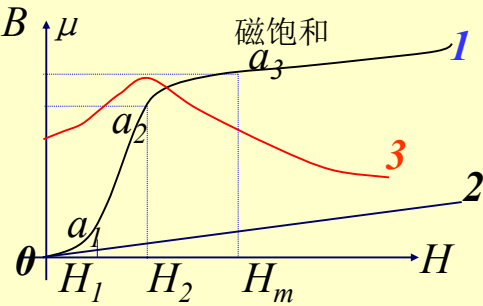
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



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。

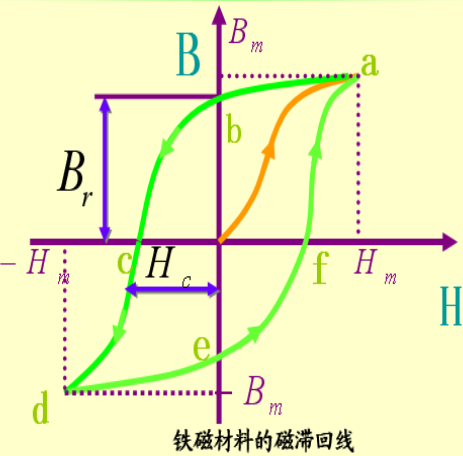


四、电机中的铁磁与永磁材料

磁滞现象与磁滞回线

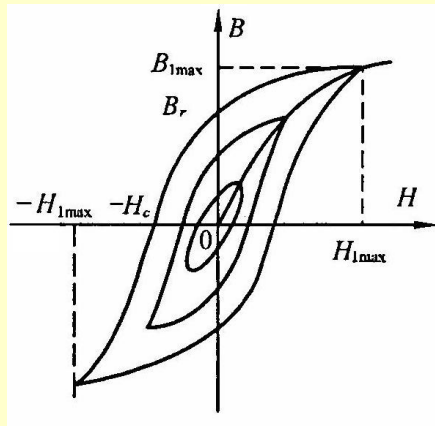
磁感应强度 B 的变化总是落后于外磁场 H 的变化, 称**磁滞现象**。

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

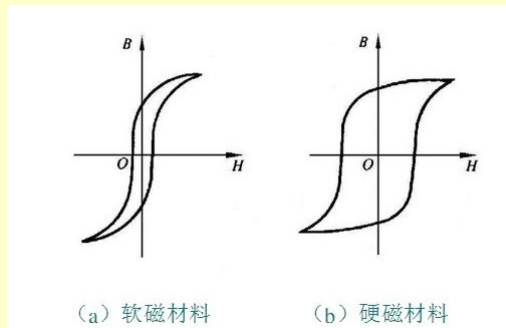
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



四、电机中的铁磁与永磁材料

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。

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:

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

$$\beta = 1.2 \square$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

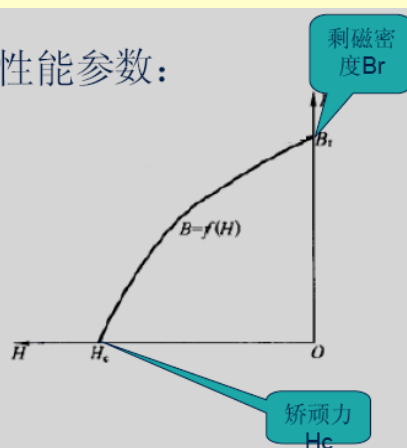


四、电机中的铁磁与永磁材料

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

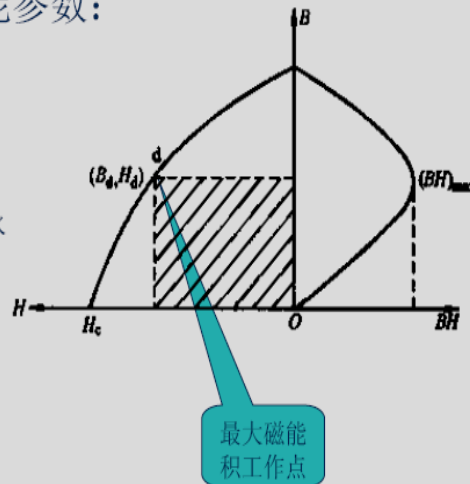


四、电机中的铁磁与永磁材料

● 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：

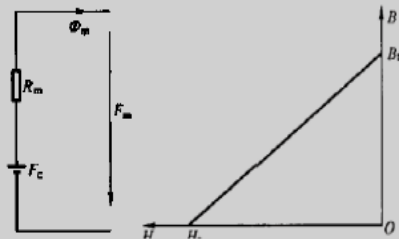
- 永磁电机磁路由永磁体、空气隙和铁心构成，磁路可分为永磁体部分和外磁路部分
- 外磁路部分与电励磁电机相同，只是注意永磁体部分磁路的计算

● 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°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 α_{Br} 和 α_{Hc} 表示。温度系数表征了永磁材料的温度稳定性。



四、电机中的铁磁与永磁材料

● 主要永磁材料的性能：钕铁硼

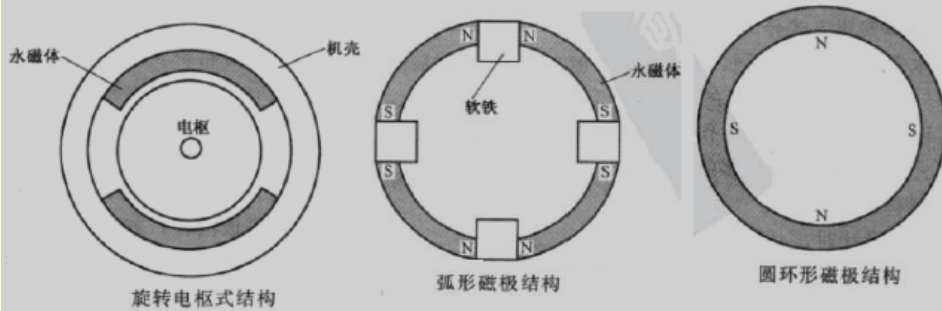
钕铁硼永磁的主要成分是 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ，是目前磁性能最强的永磁材料。它的最大磁能积可达 $398\text{kJ}/\text{m}^3$ ，为铁氧体永磁材料的 5~12 倍、铝镍钴永磁材料的 3~10 倍，理论值为 $527\text{kJ}/\text{m}^3$ ；剩磁最高可达 1.47T ，矫顽力最高可超过 $1000\text{kA}/\text{m}$ ，能吸起相当于自身重量 640 倍的重物。由于不含钴且钕在稀土中的含量是钕的十几倍，钕铁硼的价格比稀土钴要低得多。

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°C ，目前已有商业化的耐 200°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。



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



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



目 录

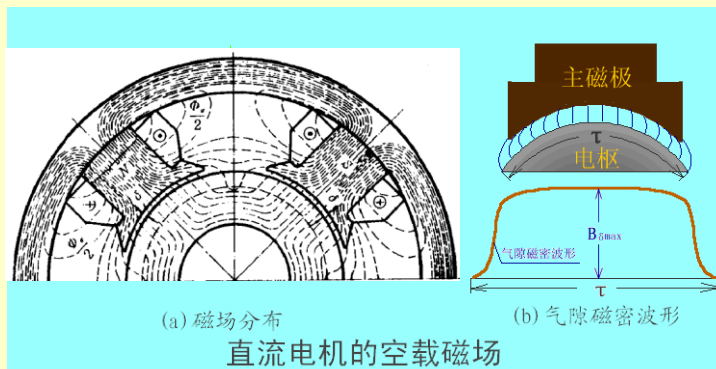
1. 电机概述
2. 直流电机原理
3. 直流电机结构
4. 电机中的铁磁与永磁材料
5. 直流电机的磁场
6. 直流电机的换向



五、直流电机的磁场

• 1、空载时直流电机的磁场

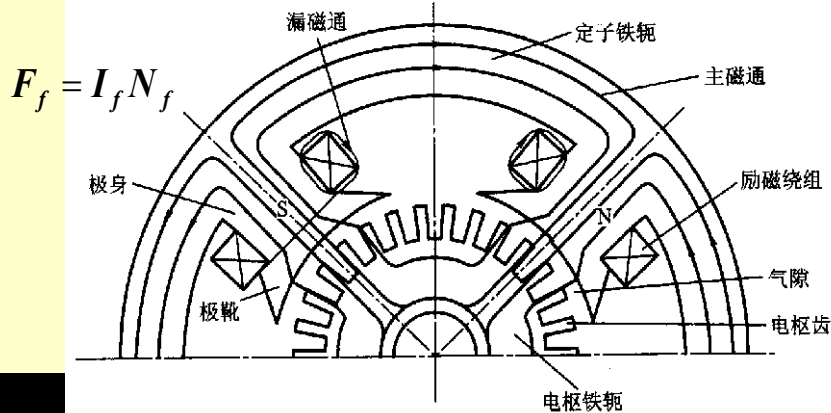
空载磁场为电枢电流等于零时，由励磁绕组电流单独作用产生的磁场，又称为主极磁场。



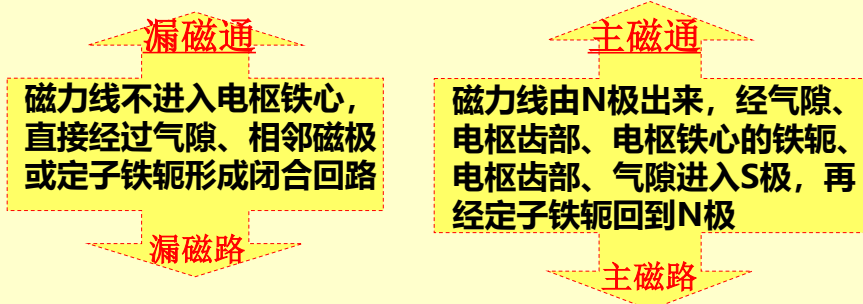
五、直流电机的磁场

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

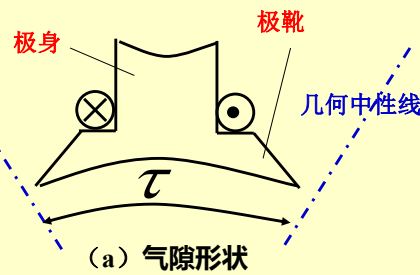


直流电机中，主磁通是主要的，它能在电枢绕组中感应电动势或产生电磁转矩，而漏磁通没有这个作用，它只是增加主磁极磁路的饱和程度。在数量上，漏磁通比主磁通小得多，大约是主磁通的20%。

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。

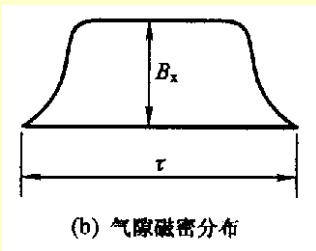


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

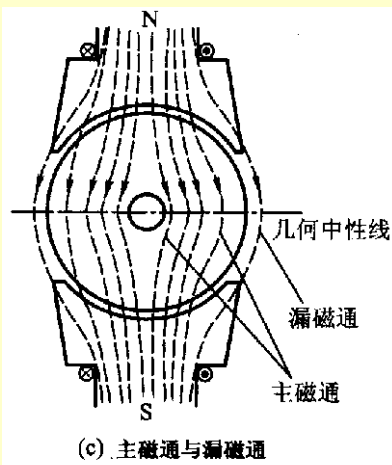


五、直流电机的磁场

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

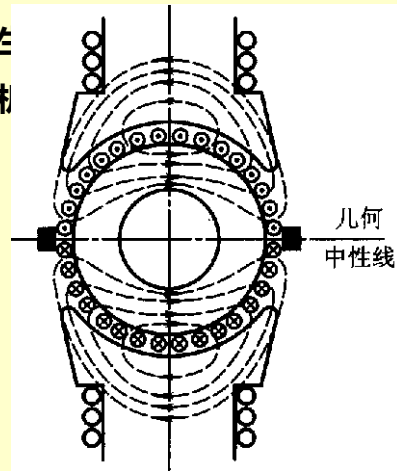


五、直流电机的磁场

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。



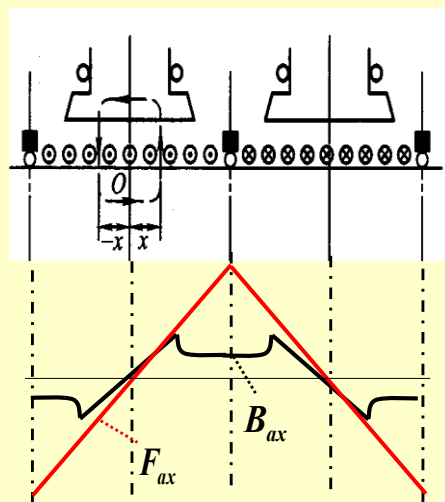
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



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。

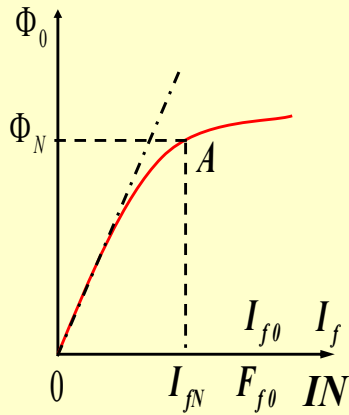


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



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 Φ_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。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

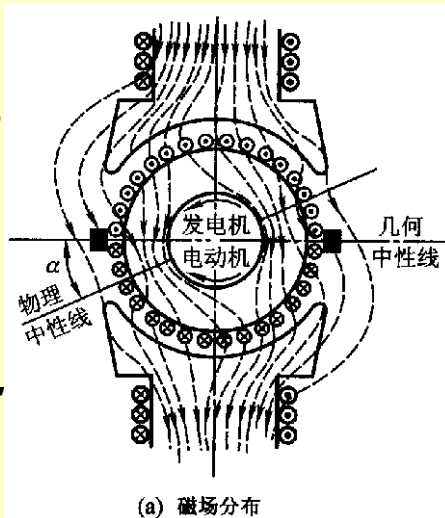


五、直流电机的磁场

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**。

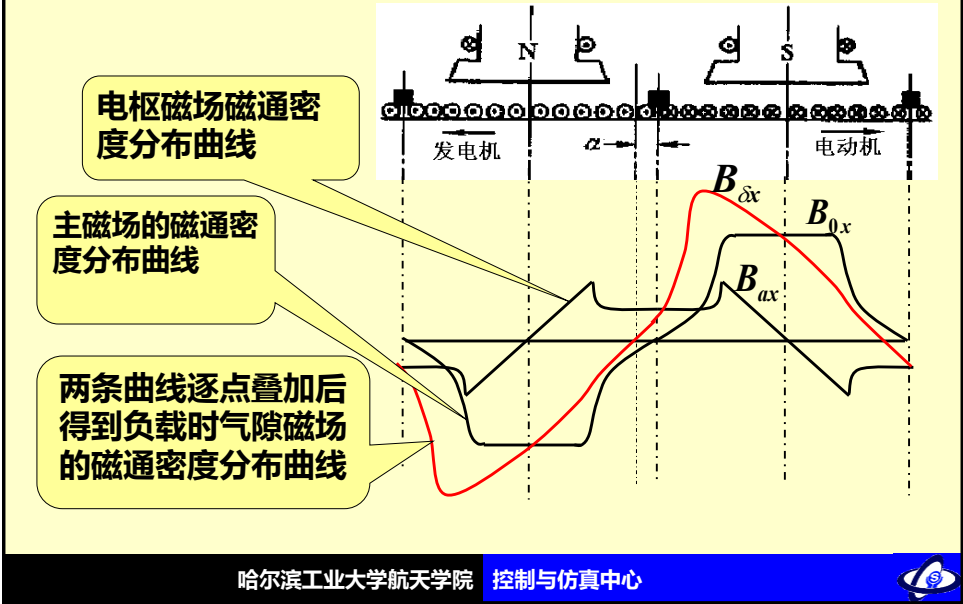
1、当电刷在几何中性线上时，将主磁场分布和电枢磁场分布叠加，可得到负载后电机的磁场分布情况，如图 (a) 所示。



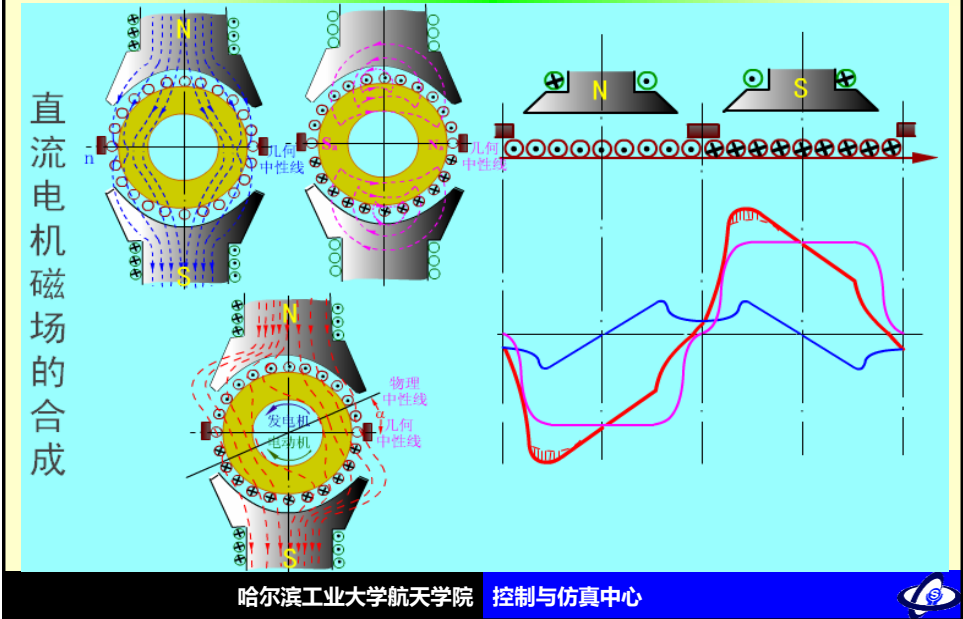
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



五、直流电机的磁场



五、直流电机的磁场



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

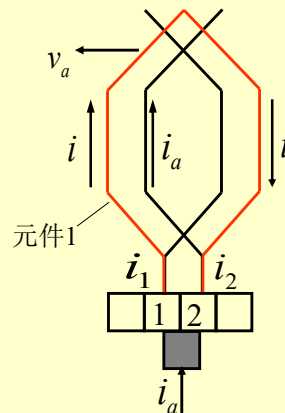
直流电机的某一个元件经过电刷，从一条支路换到另一条支路时，元件里的电流方向改变，即换向。

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:

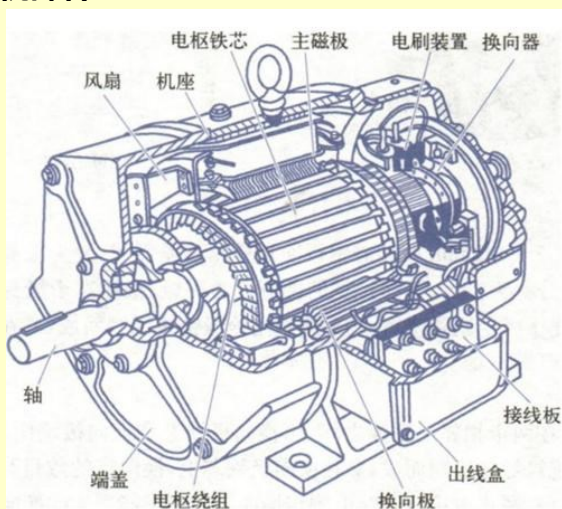
顾绳谷.《电机及拖动基础(第n版)》.机械工业出版社

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

