



哈爾濱工業大學
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



自动控制实践A-3

- 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 $\sum E=\sum u$	



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



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

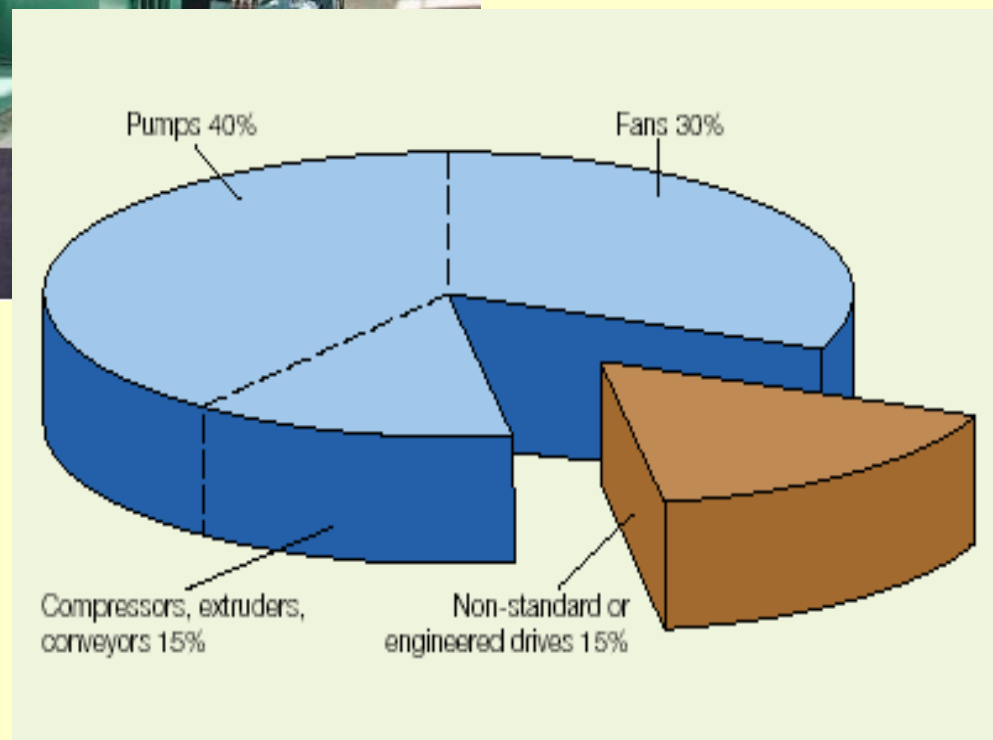
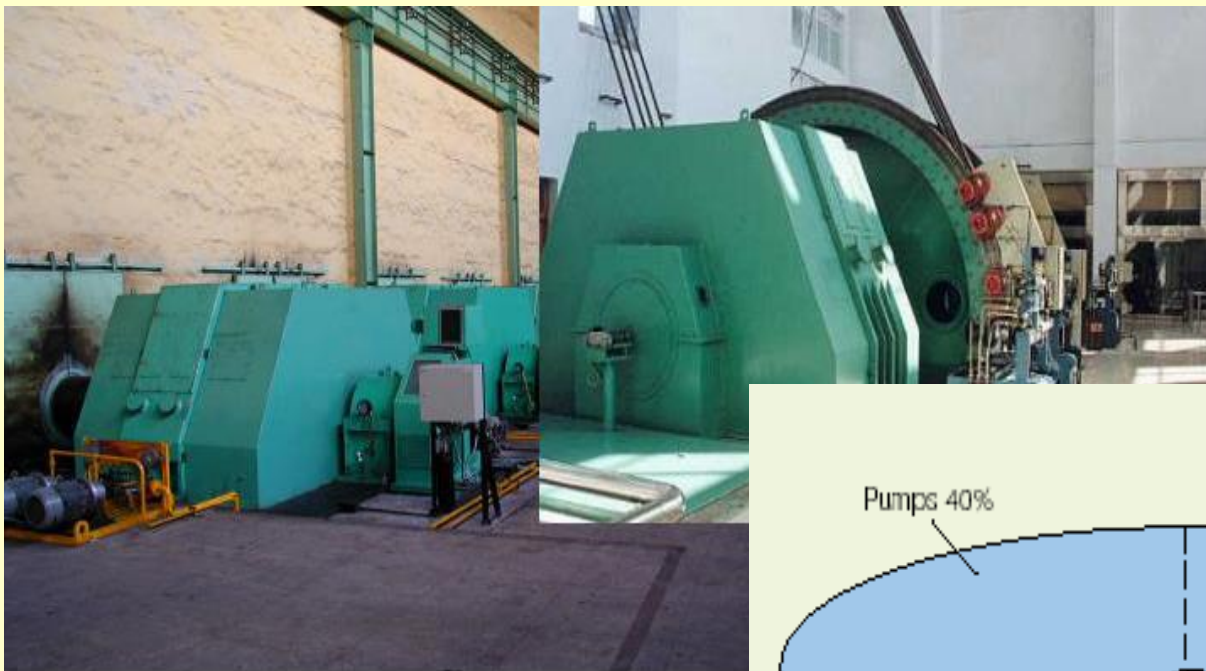
交通运输等其它领域

军事国防领域

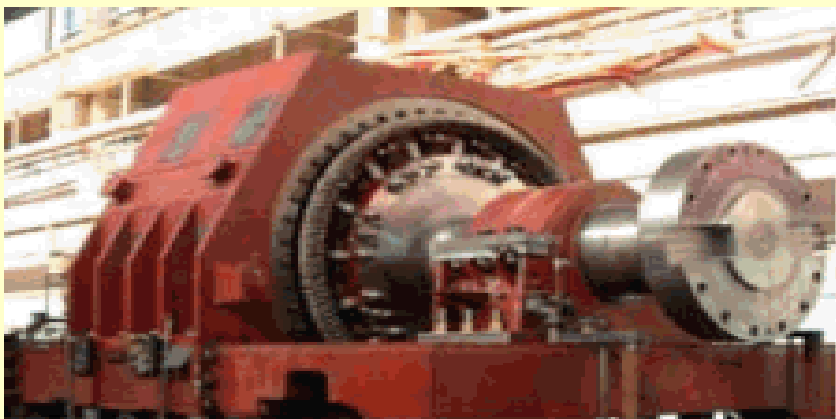
日常生活及家用电器



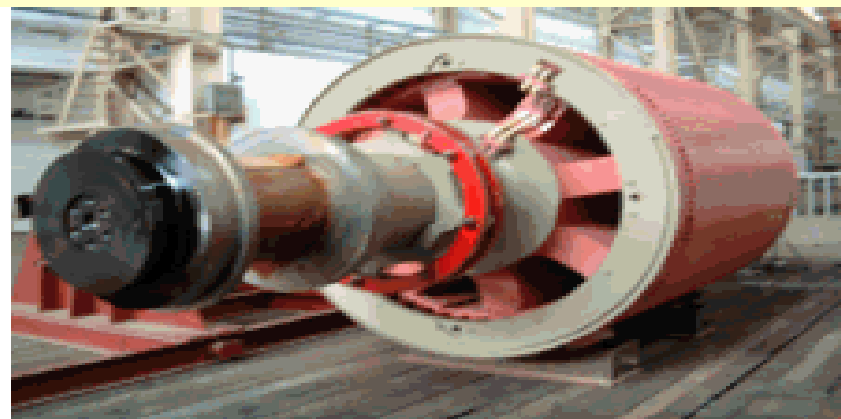
一、电机概述



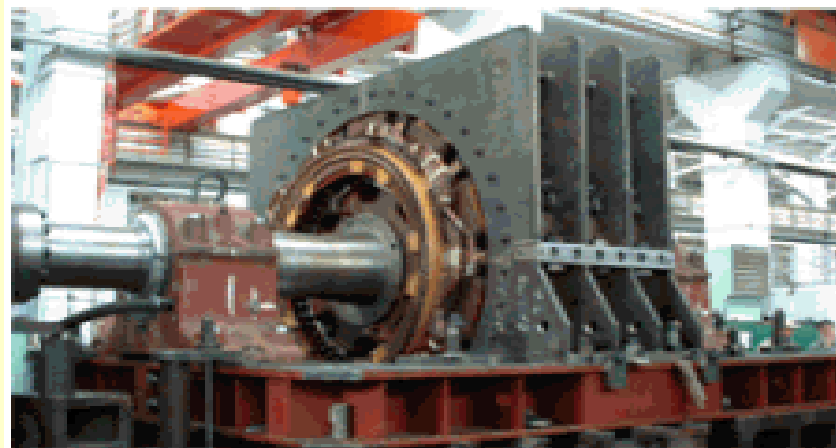
一、电机概述



大型同步轧钢电机



隐极同步电机



直流电动机



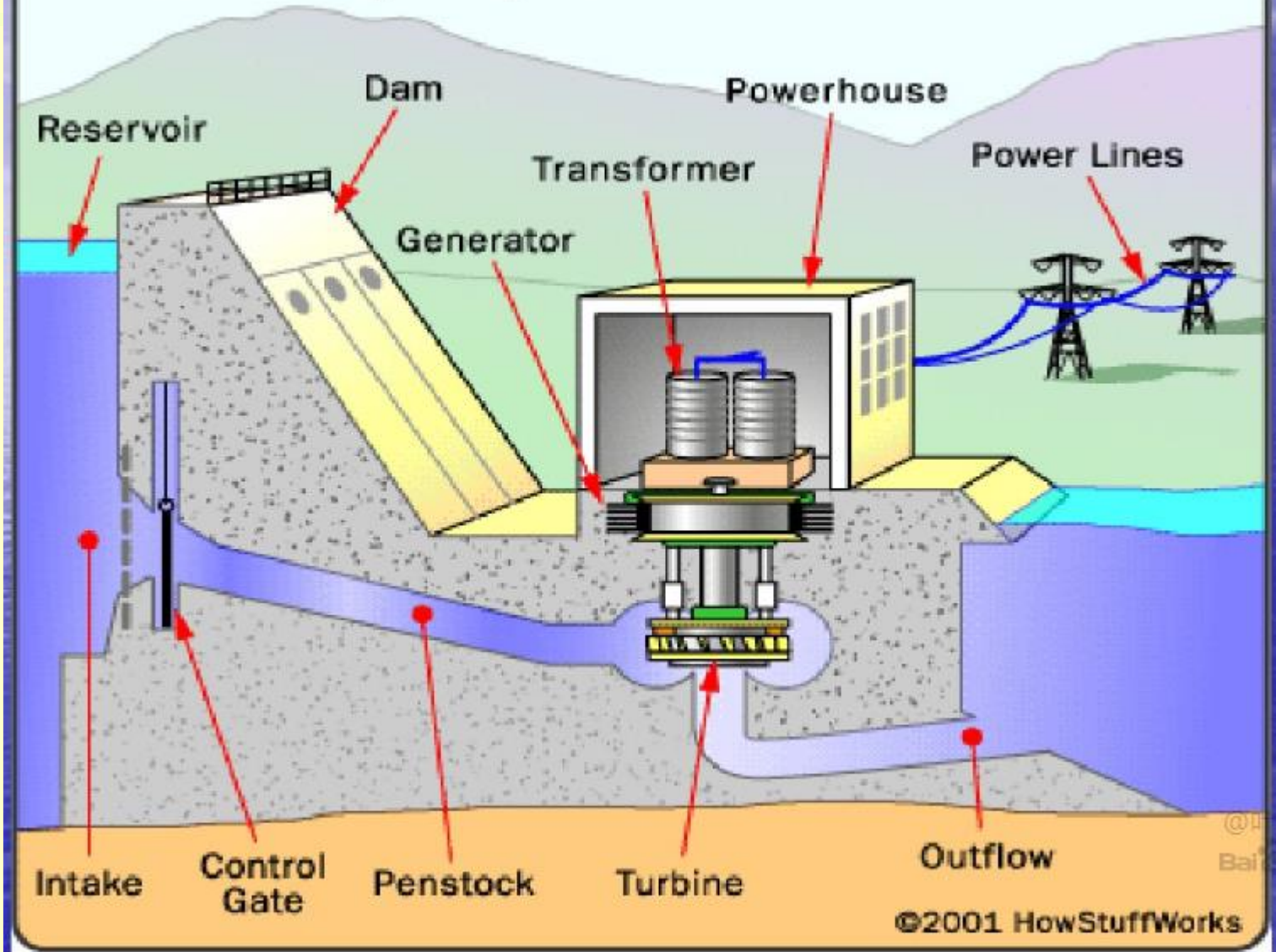
异步电动机



一、电机概述



Inside a Hydropower Plant



一、电机概述



- 三峡水电站年均发电量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



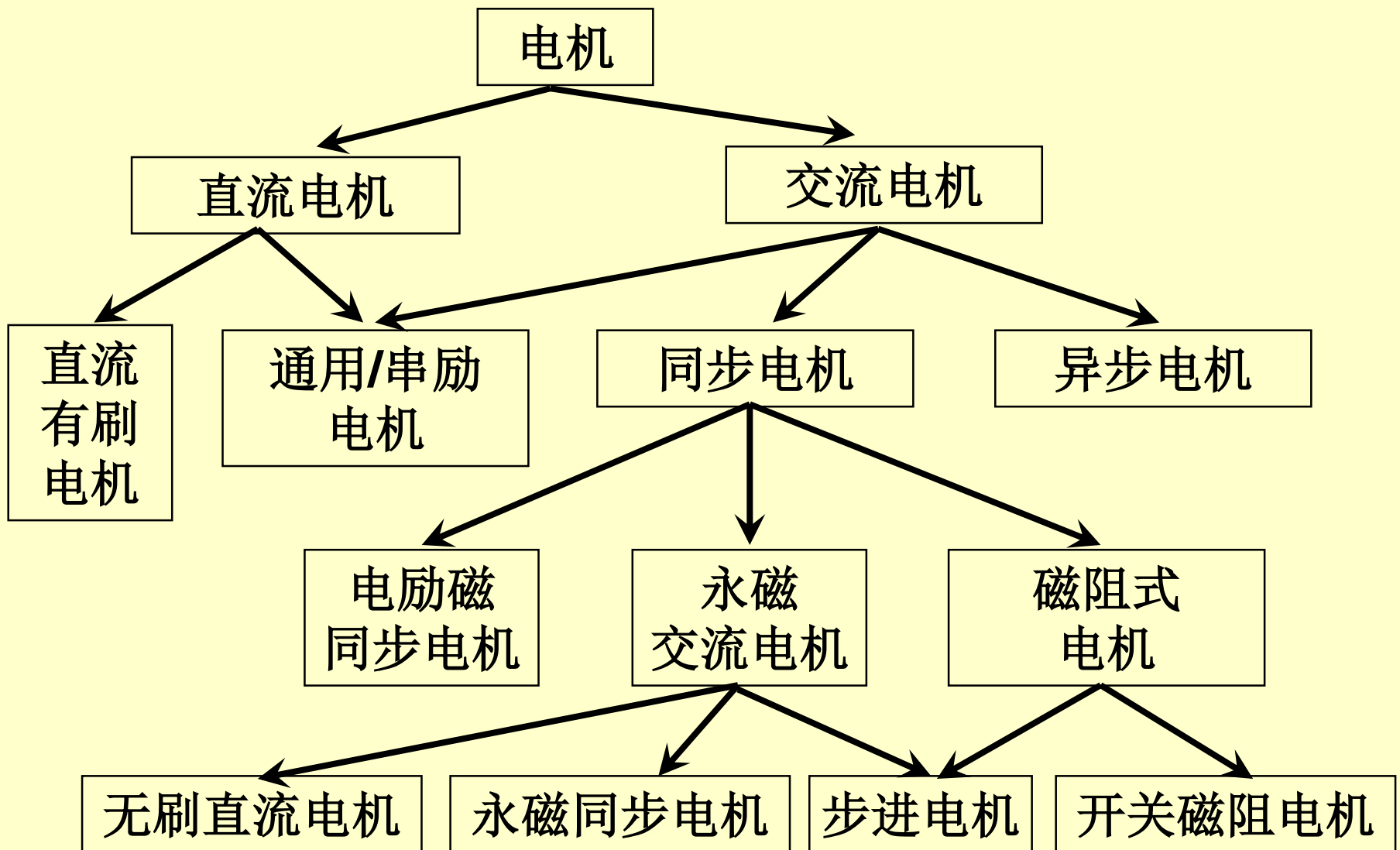
一、电机概述

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（执行元件或测量元件）。
- * 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



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有化
- 新型电机紧跟世界先进水平
- 稀土永磁电机异军突起



直流电机特点

- 优点
 - 转矩大；
 - 调整范围宽；
 - 容易控制。
- 缺点
 - 寿命有限；
 - 结构复杂。

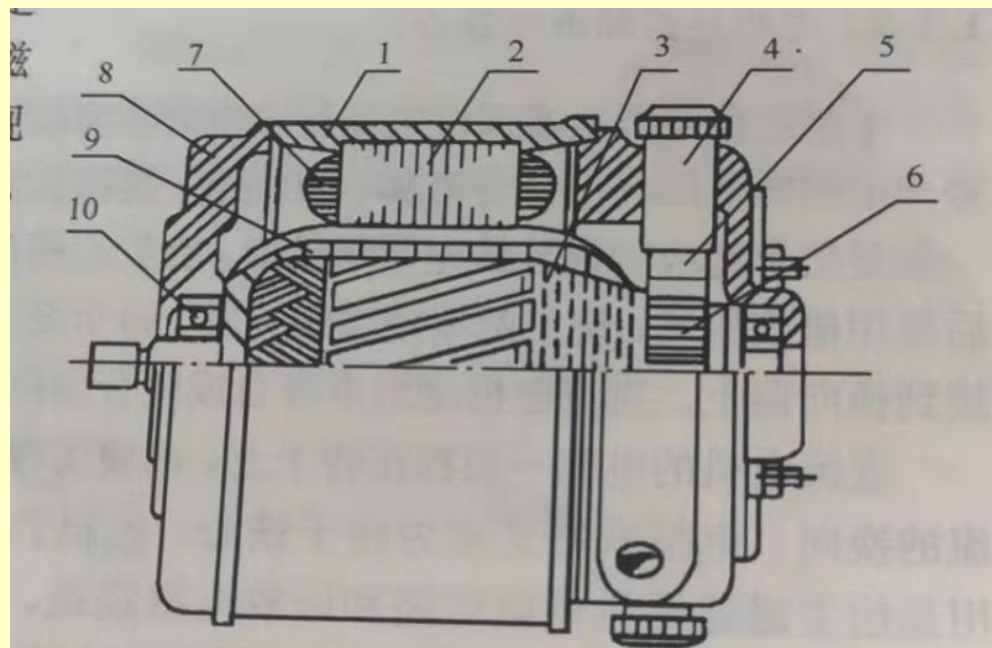
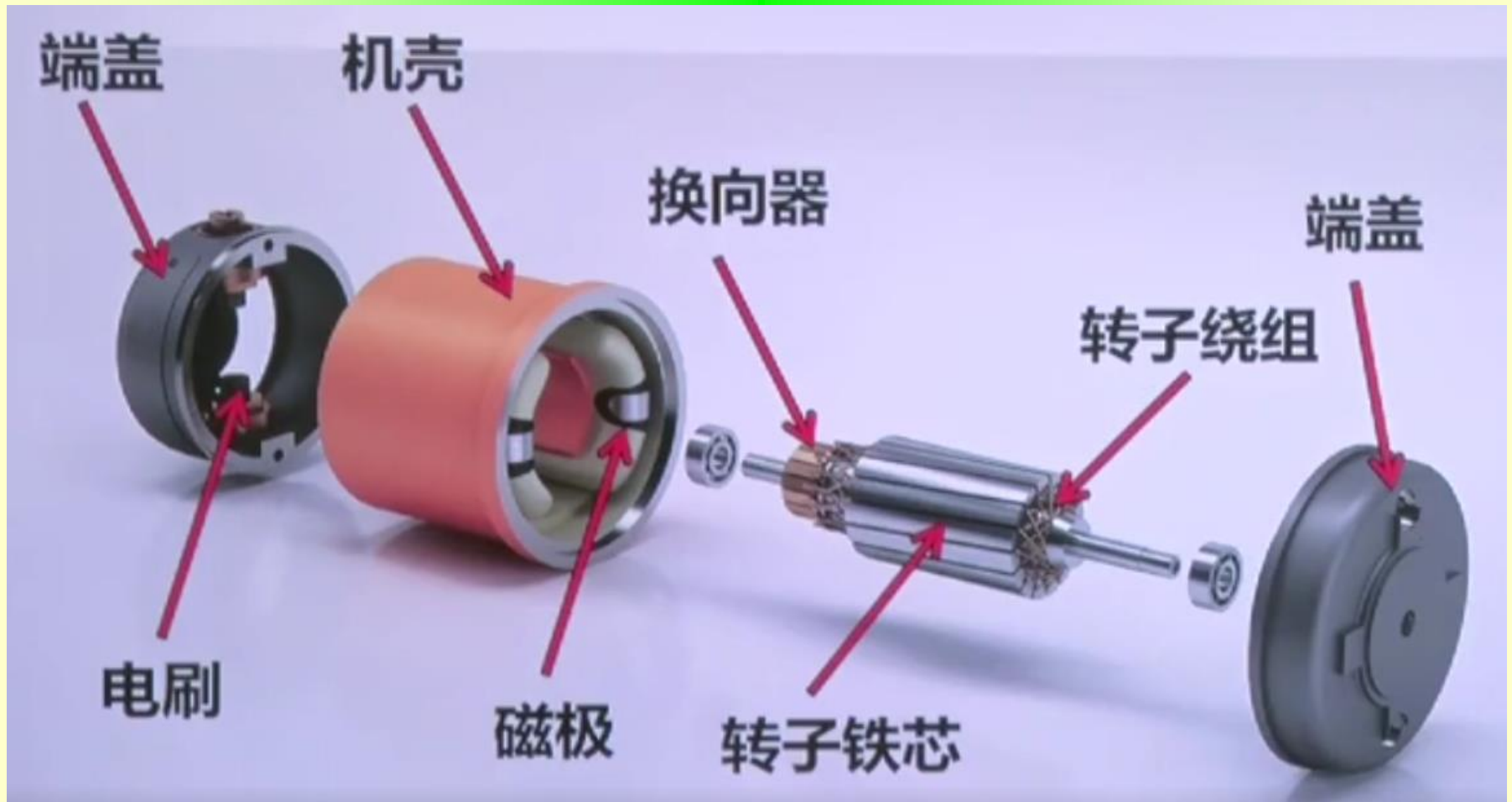


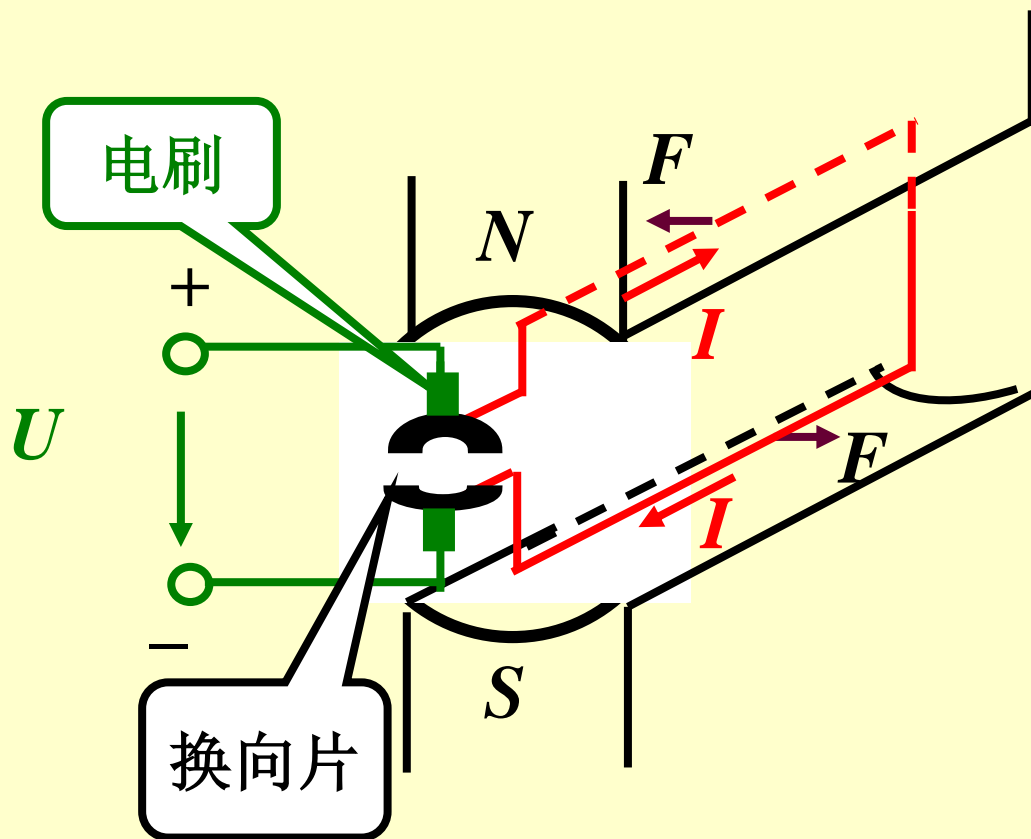
图 1-1 直流电机结构简图

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





二、直流电机的工作原理

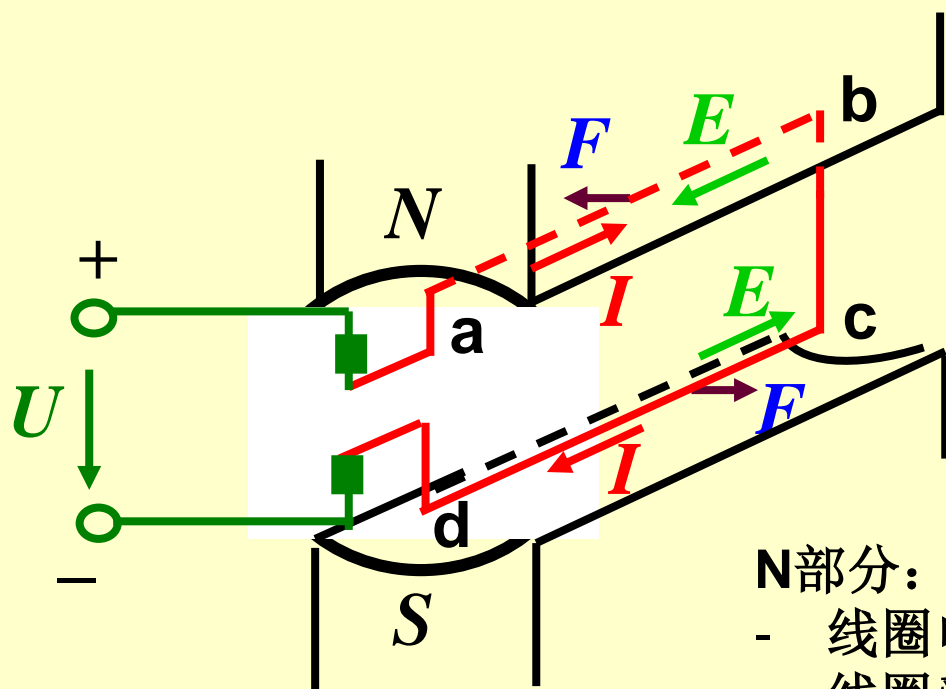


系统组成：定子，转子，电刷，换向片。

二、直流电机的工作原理

假设，没有电刷，没有换向片.....

$t=0$, 初始状态,



N部分:

- 线圈电流: **a-b**
- 线圈受力: 向左

S部分:

- 线圈电流: **c-d**
- 线圈受力: 向右

线圈逆时针转动!

$t=T/2$, 线圈转过180度之后,

N部分:

- 线圈电流: **c-d**
- 线圈受力: 向右

S部分:

- 线圈电流: **a-b**
- 线圈受力: 向左

线圈只能左右摇动，无法继续向前转动!

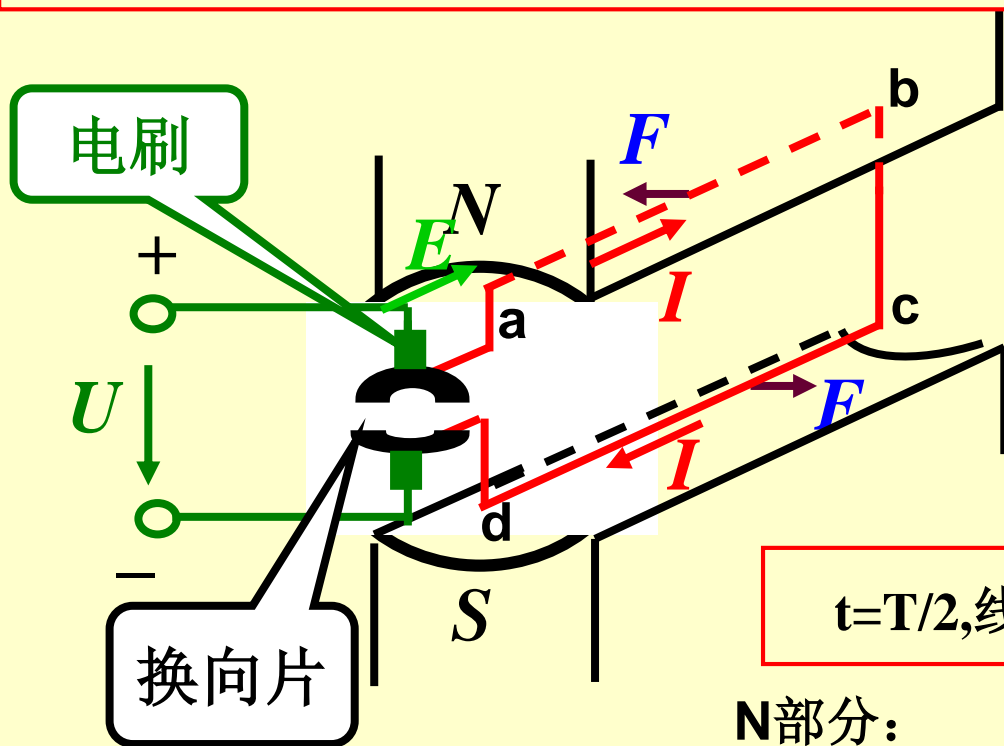
线圈顺时针转动!



二、直流电机的工作原理

电刷/换向片在直流电机是必需的。

$t=0$, 初始状态,



N部分:

- 线圈电流: **a-b**
- 线圈受力: 向左

S部分:

- 线圈电流: **c-d**
- 线圈受力: 向右

线圈可以逆时针转动!

$t=T/2$, 线圈转过180度之后, 由于电刷作用

N部分:

- 线圈电流: **d-c**
- 线圈受力: 向左

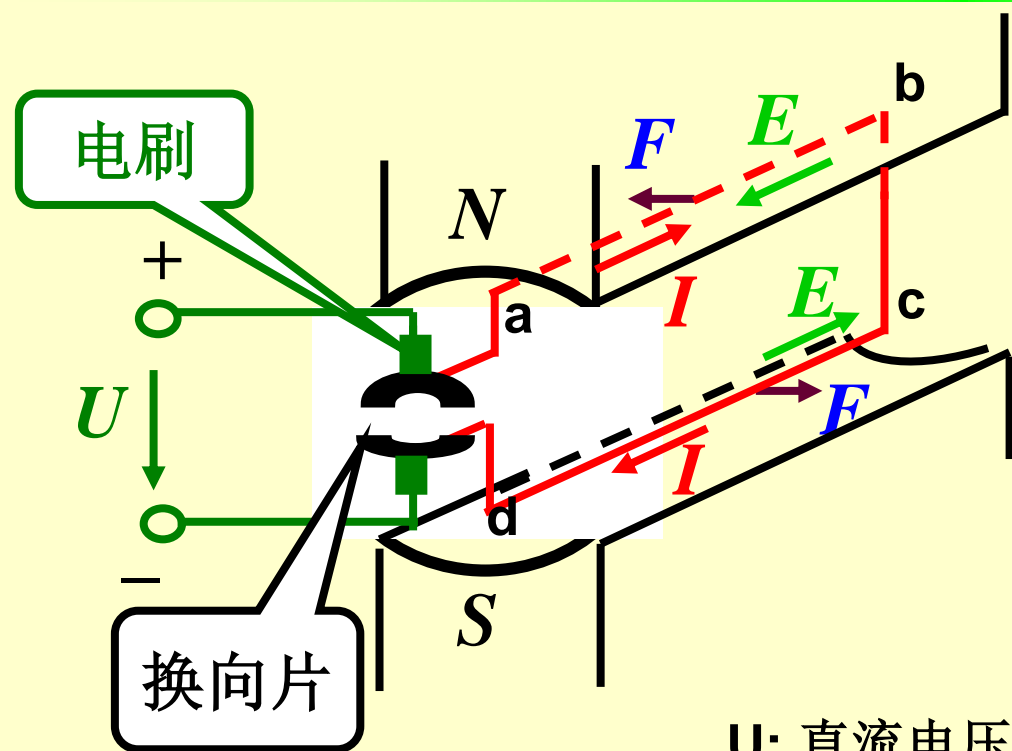
S部分:

- 线圈电流: **b-a**
- 线圈受力: 向右

线圈可以逆时针转动!



二、直流电机的工作原理



电刷: 固定

换向片: 与线圈转动

N极线圈:

电流: 流入, 电磁力一定向左;

S极线圈:

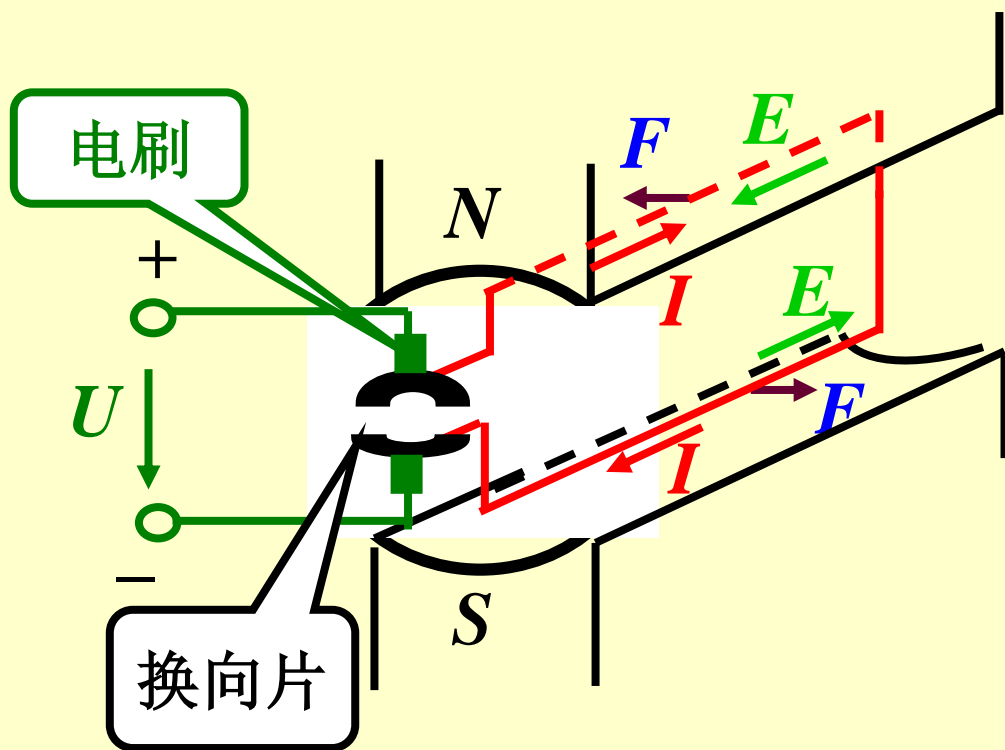
电流: 流出, 电磁力一定向右.

U : 直流电压, 方向/大小均不变, 如+24V;
对于某一固定线圈, 其电流为交流, 进/出交替

电刷/换向片的作用: 将直流电信号变为线圈的交流电信号,
让线圈得到方向一致的电磁力, 使得线圈有效地旋转起来。



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(E)，感应电动势的方向与电流的方向相反。

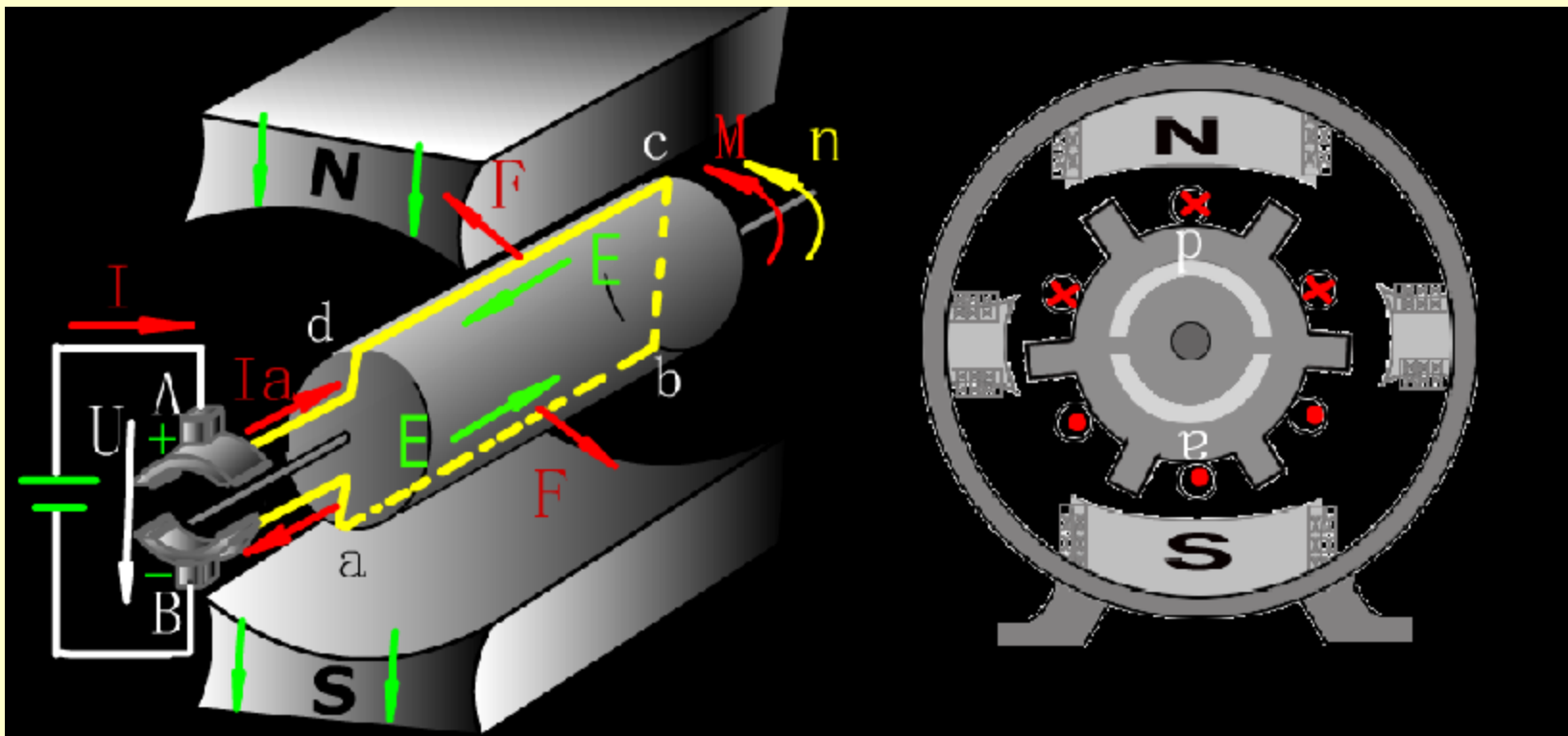


谢宝金也没有让毛泽民失望，不等一番革命道理讲完，谢宝金毅然说：“我知道红军是替穷人说话的队伍，我跟你走。”

就这样，谢宝金在自己33岁那年，成为了一名光荣的红军战士。



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>

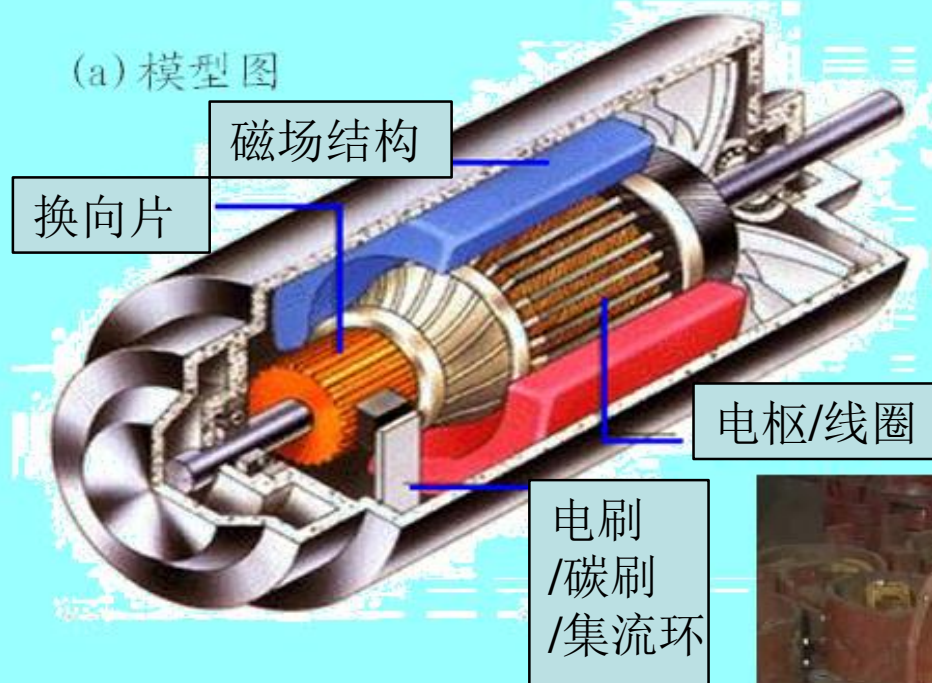


三、直流电机的结构



三、直流电机的结构

(a) 模型图



(b) 实体图



直流电机的基本结构图



三、直流电机的结构

1. 定子

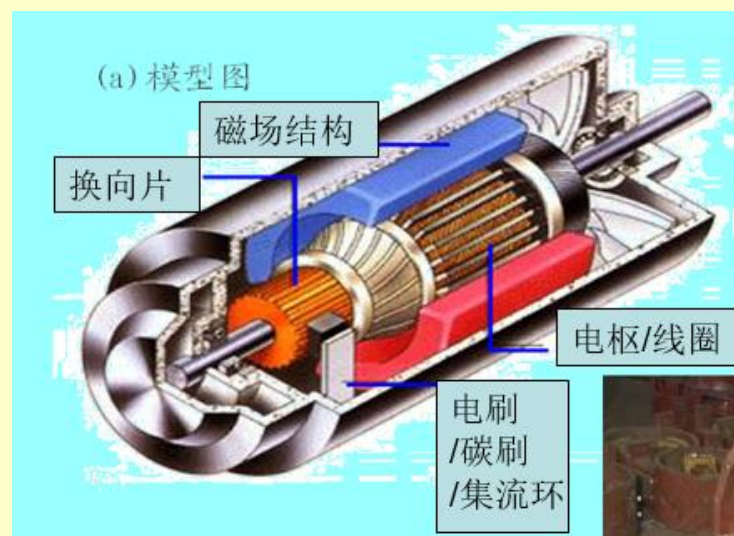
按定子磁场产生方式分类：

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**，形成电磁场。

励磁：磁极上的线圈通以直流电产生磁通，称为励磁。



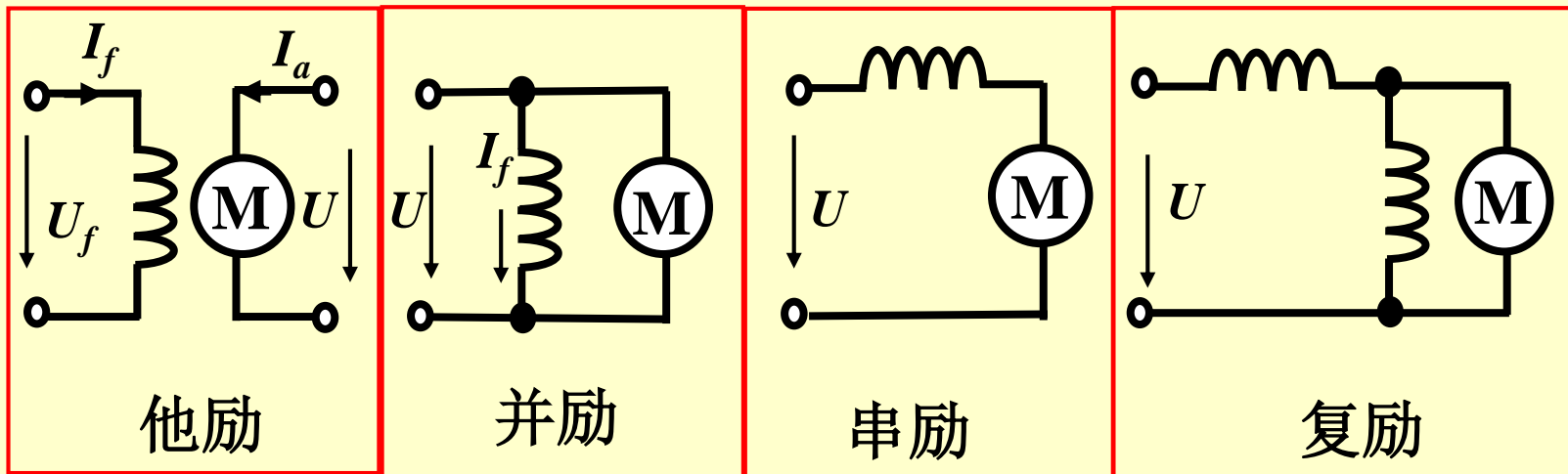
三、直流电机的结构

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连接有串有并，接在同一电源上。



三、直流电机的结构

1. 定子

1.1、主磁极

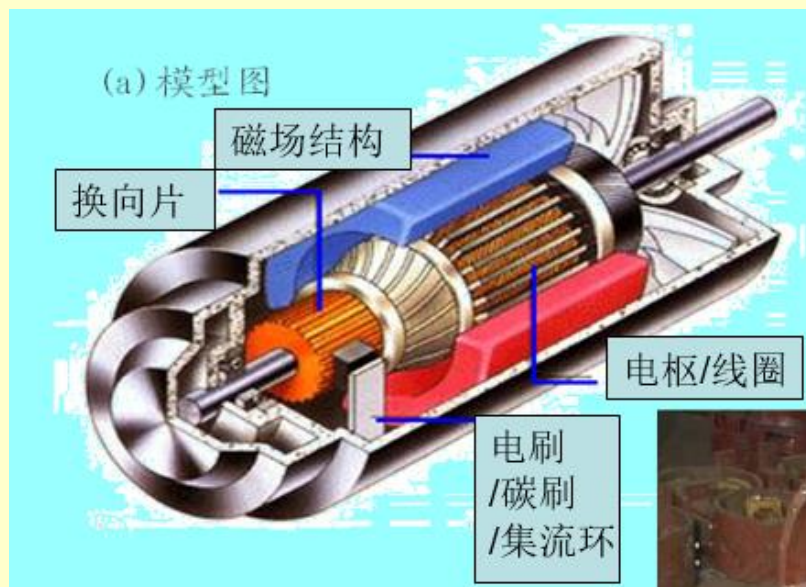
作用：建立主磁场。

构成：**a.** 主极铁心和套装在铁心上的励磁绕组，大功率场合。
b. 永久磁铁：小功率场合。

1.2、机座

作用：1、主磁路的一部分； 2、电机的结构框架。

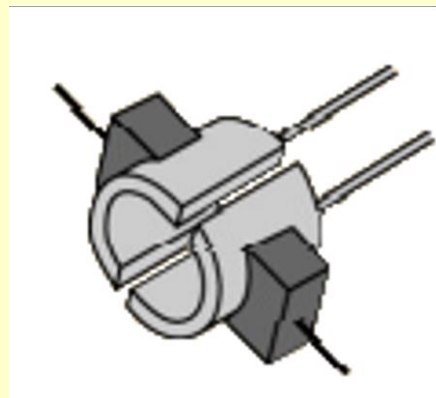
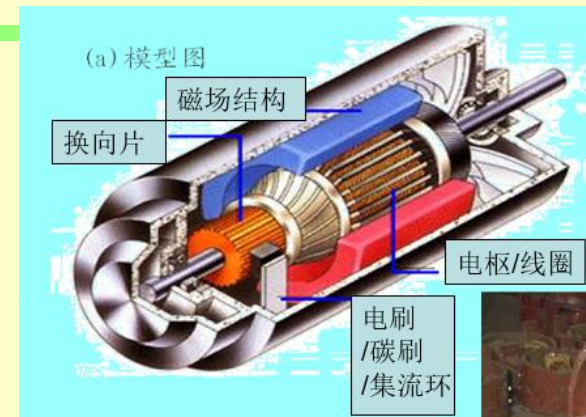
构成：用厚钢板弯成筒形焊成或铸钢件制成。



1.3、电刷装置

作用：对电枢电路（转子）电信号的引出（或引入）装置。

构成：电刷、弹簧、刷杆和连线等。

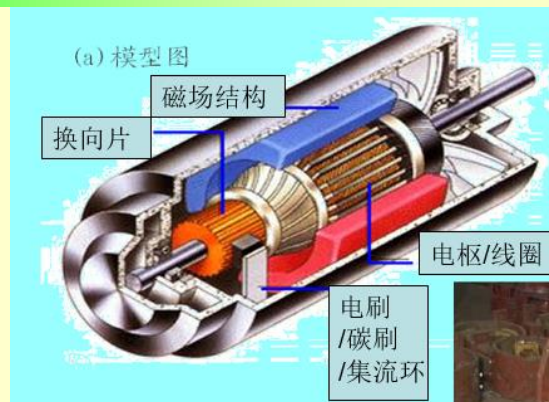


- 接触时会有电火花
- 寿命有限
- 可用无线电磁耦合方式来替代

三、直流电机的结构

2. 转子（又称电枢）

主要由换向器、电枢铁心、绕组组成。

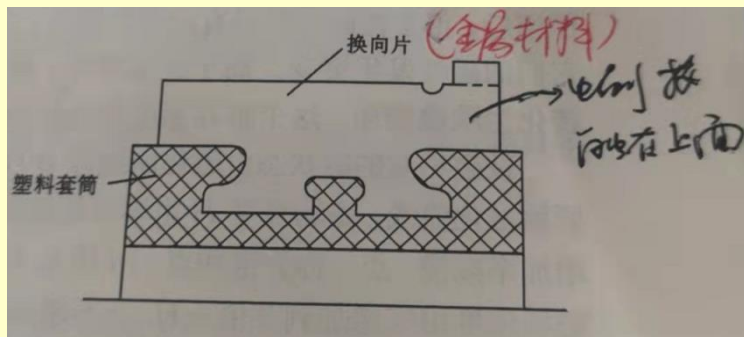


2.1、换向器

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

云母（塑料）绝缘，两端用两个卡扣夹紧而构成。



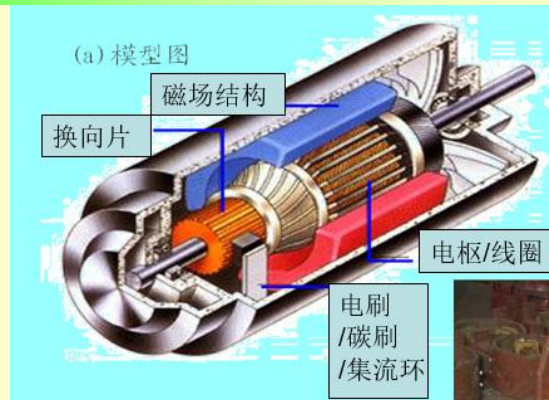
- 接触时会有电火花
- 寿命有限
- 可用无线电磁耦合方式来替代



三、直流电机的结构

2. 转子（又称电枢）

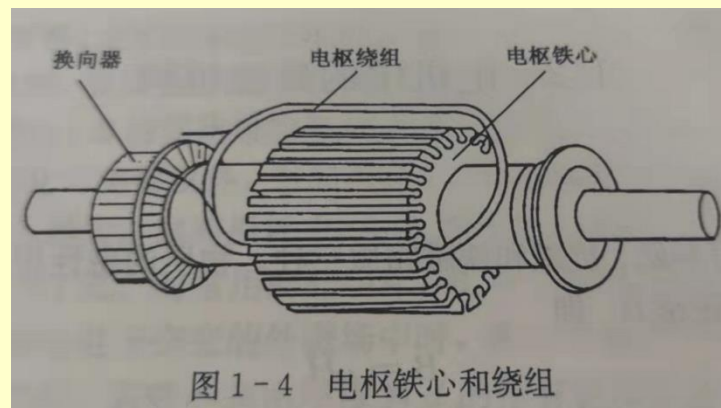
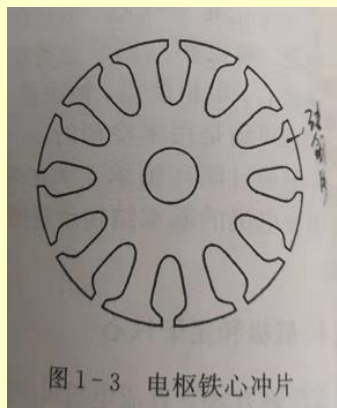
主要由换向器、铁心、绕组组成。



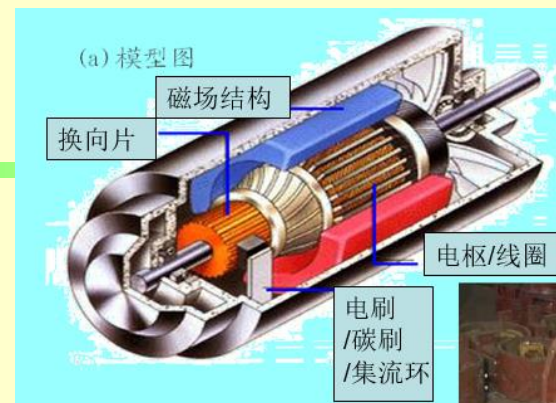
2.2、电枢铁心

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**叠压或加工而成。



三、直流电机的结构

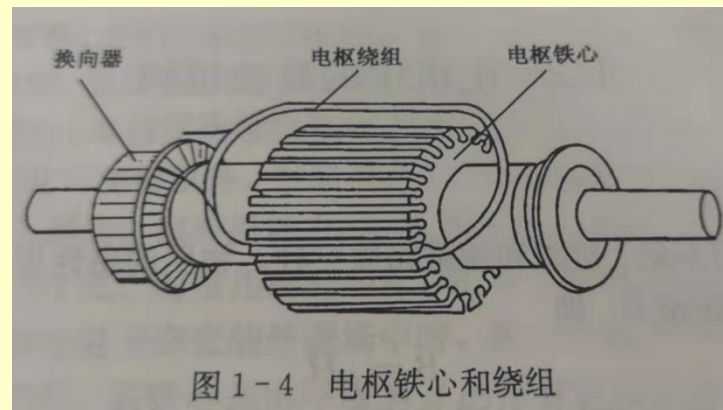


2.3、电枢绕组

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（铜）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。

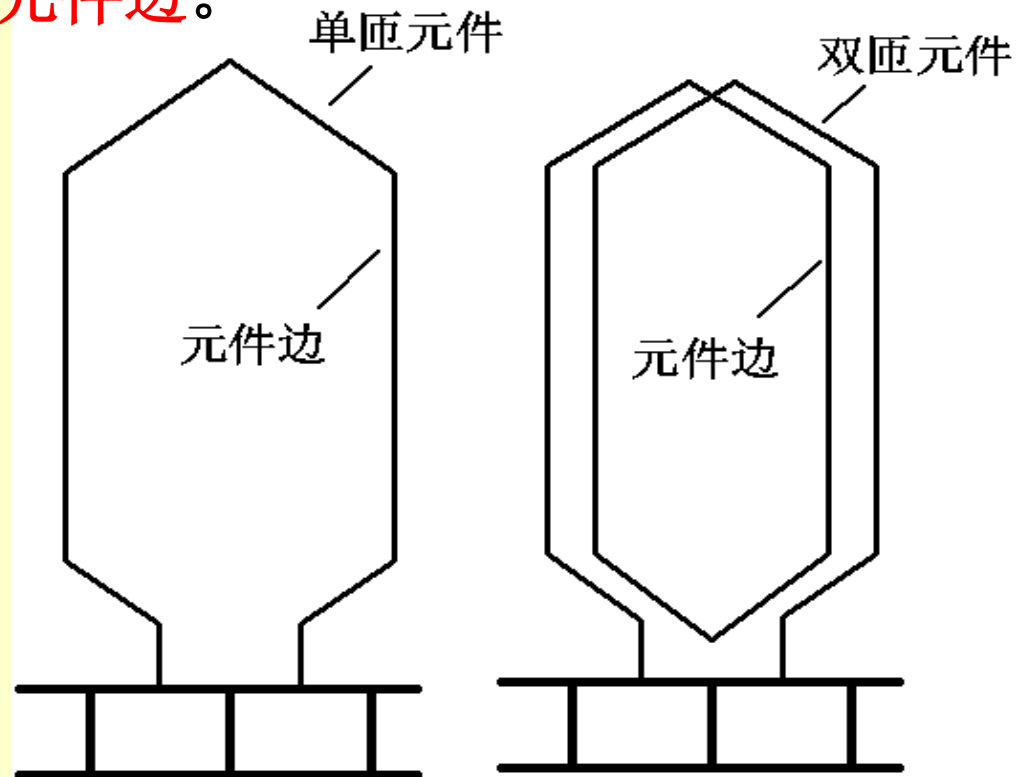
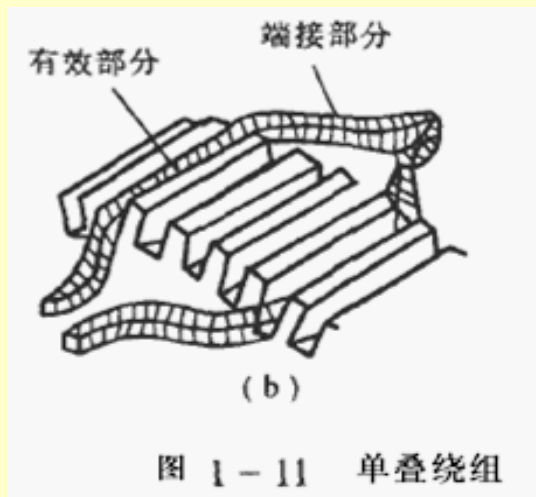
- 电枢绕组是直流电机电路部分，是机电能量转换枢纽。
- 电枢绕组构成原则：
 1. 产生最大的感应电势；
 2. 可以承载一定的电流；
 3. 结构简单；
 4. 节约有色金属。



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

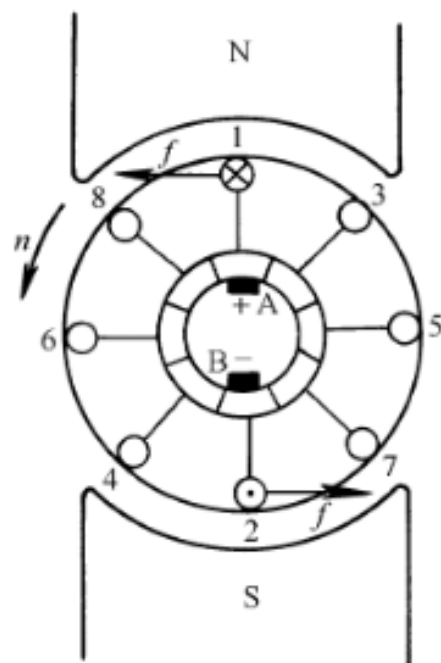


对绕组的要求：在能够通过规定的电流和产生足够的电动势的前提下，尽可能节省铜和绝缘材料，并且结构简单、运行可靠。

一、简单的绕组

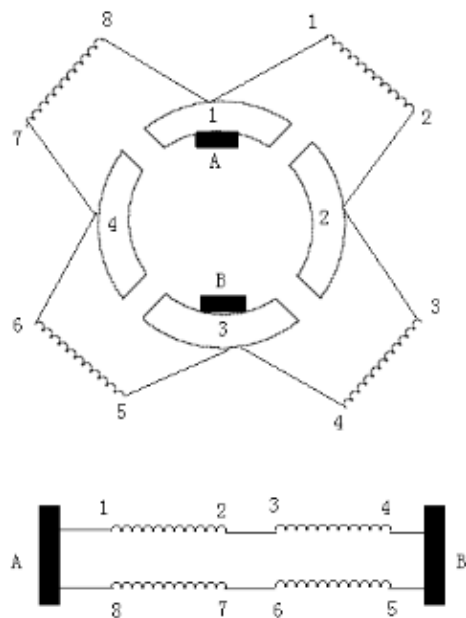
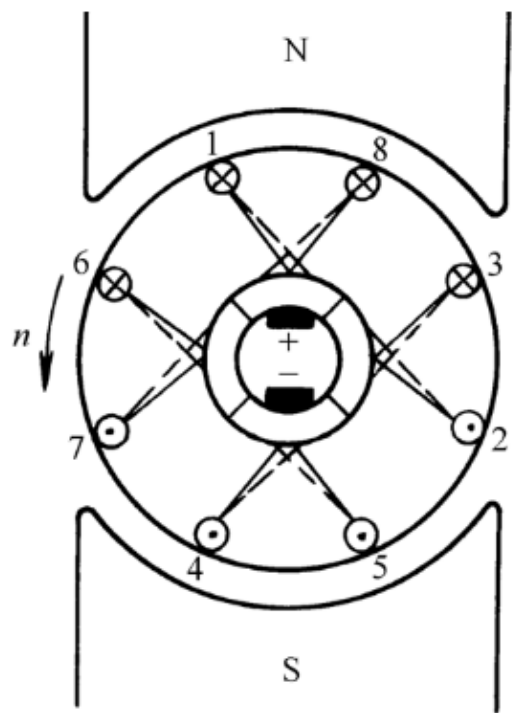
右图只是说明原理的示意图。它的缺点是：随着电枢的转动，始终只有一个线圈有电流。这样的话，材料没有充分利用，产生的总转矩或电势均很小。

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。

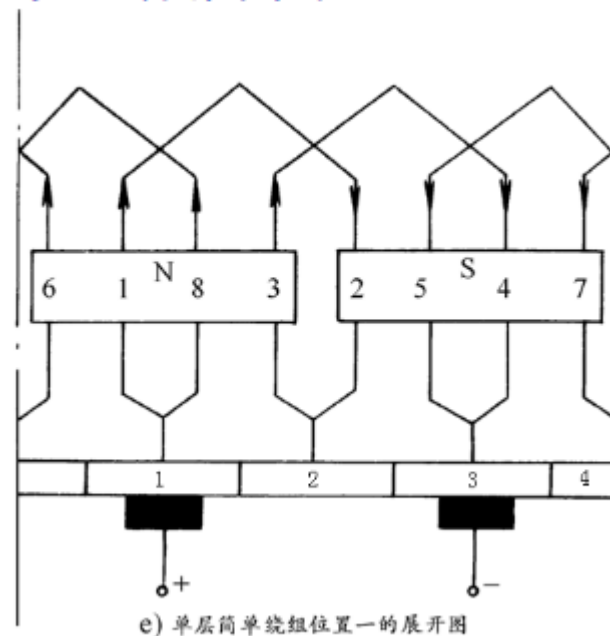


1-2、3-4、5-6、7-8
分别构成4个线圈

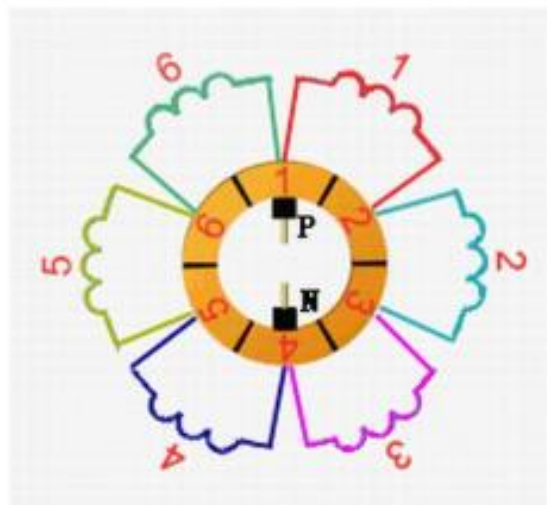
4个线圈单层结构示意图



4绕组展开图:



6个线圈的电枢绕组与电刷连接



No
Image

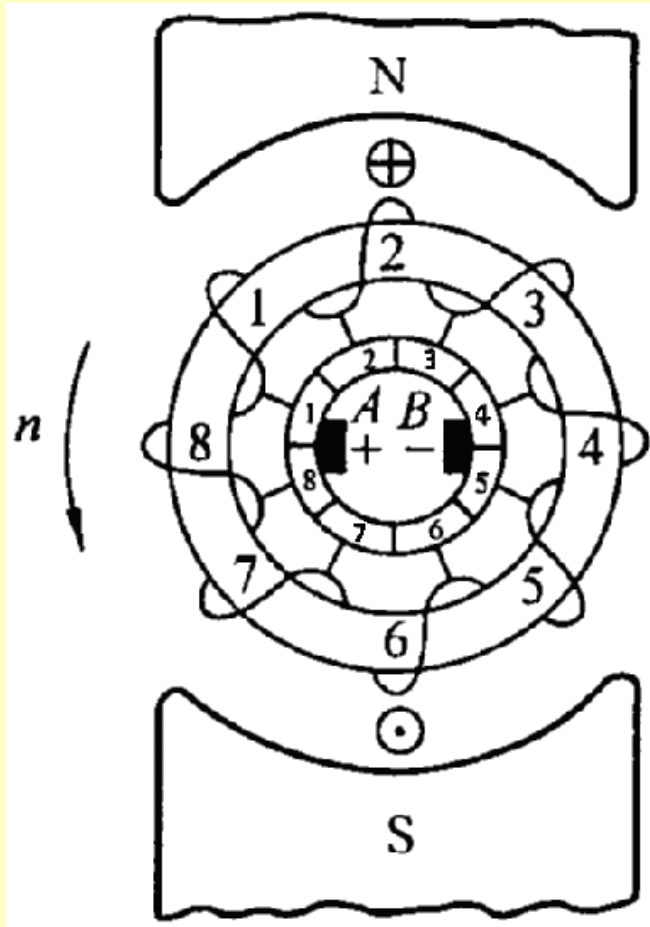
当电枢转到图示位置时：构成如图所示的等效并联支路。

电刷将环形闭合电枢绕组分成两条对称的并联支路。

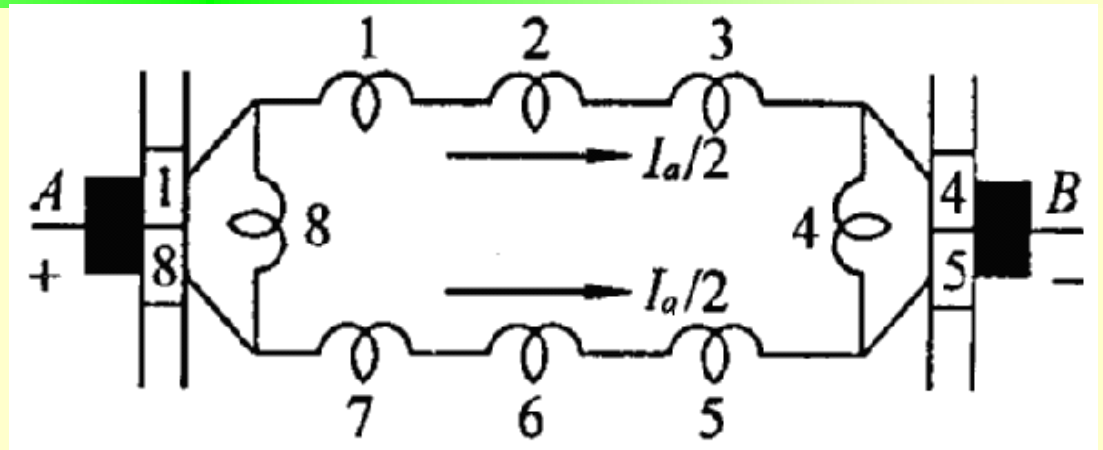
结论：整个电枢绕组通过换向片连成一个闭合回路。



• 环形绕组



N磁极侧



S磁极侧

■ 存在的问题:

- 1) 环形铁心内部无磁场, 内部导体不受电磁力, 仅起到连线作用, 绕组的利用率低。
- 2) 制造困难, 绕组不能预制成型, 工艺性和经济性不好。



鼓形绕组

- ▶ 预制成型绕组的一个有效边放在槽内的上层；另一个有效边放在另一个槽的下层
- ▶ 两个有效边放在异性磁极下，矩距离1个极距；
- ▶ 绕组元件数与槽数相同。

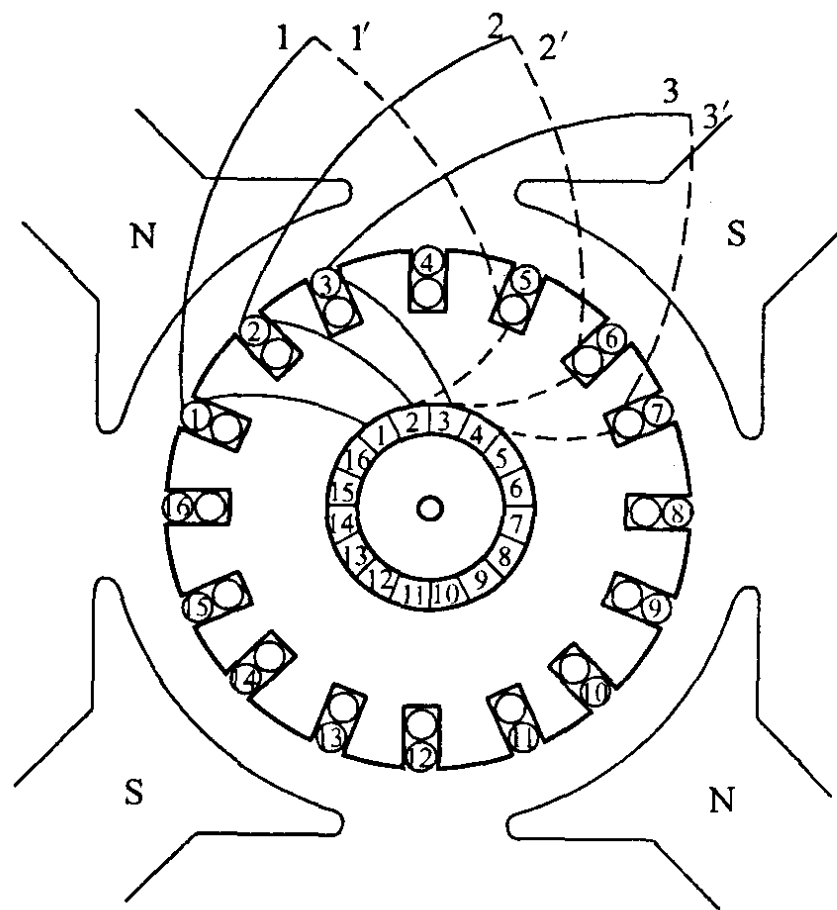
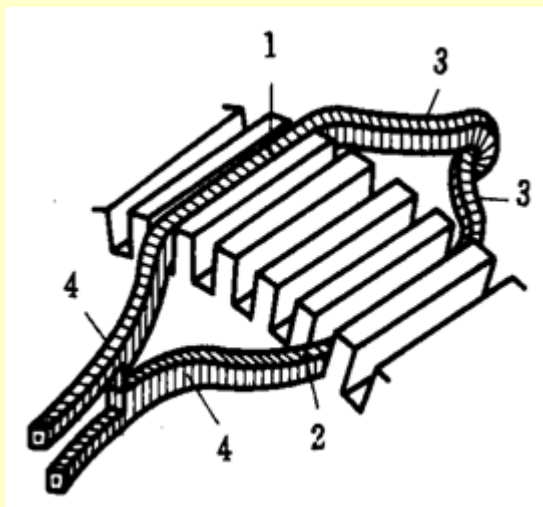
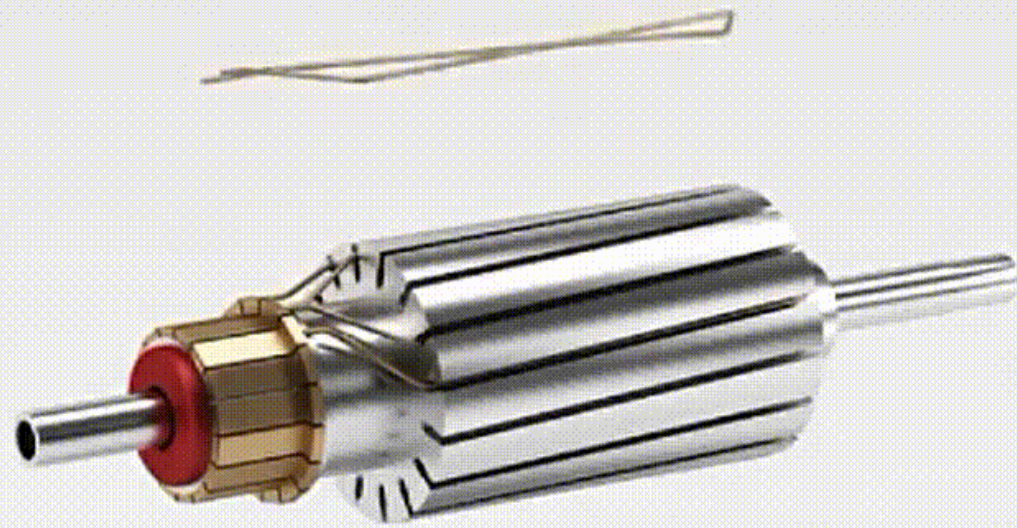


图 1-21 绕组元件在电枢上的排列方式

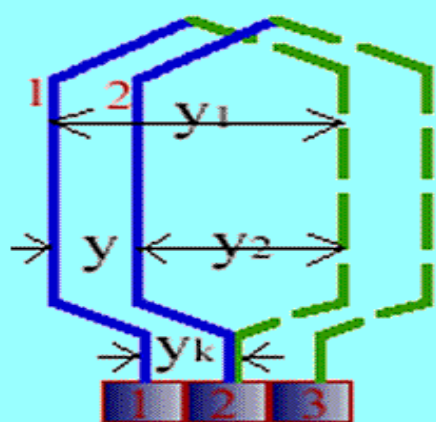




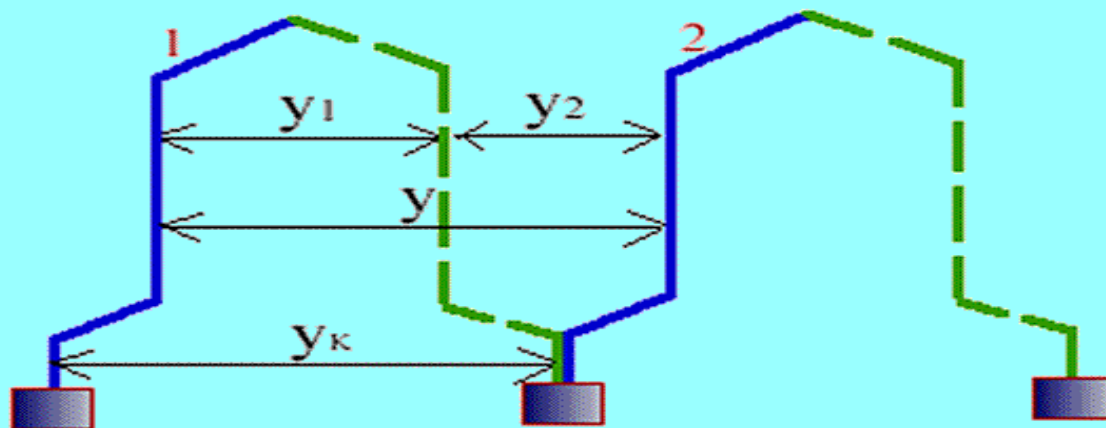
三、直流电机的结构

电枢绕组分类:

叠绕组, 波绕组



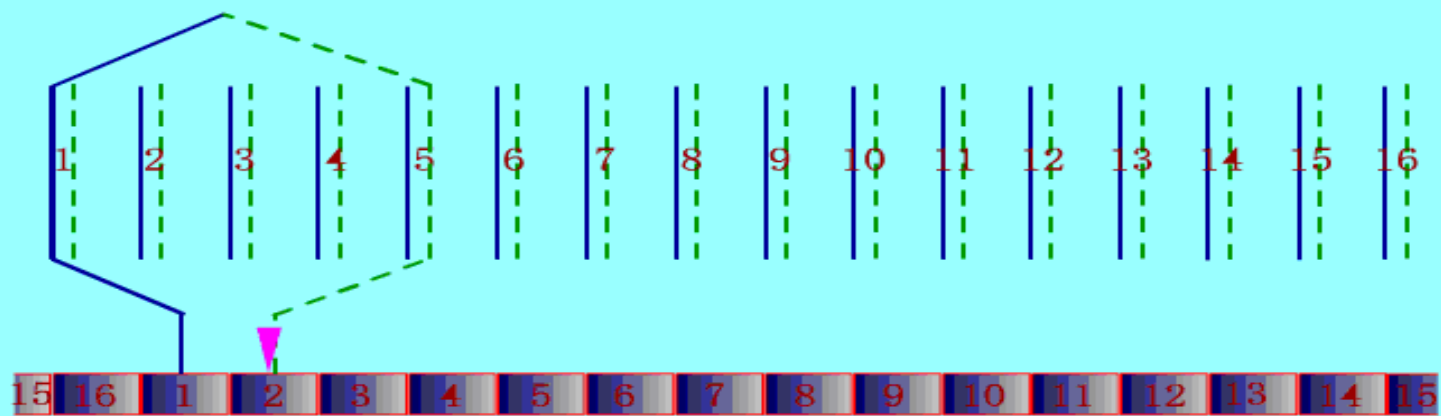
叠绕组的元件



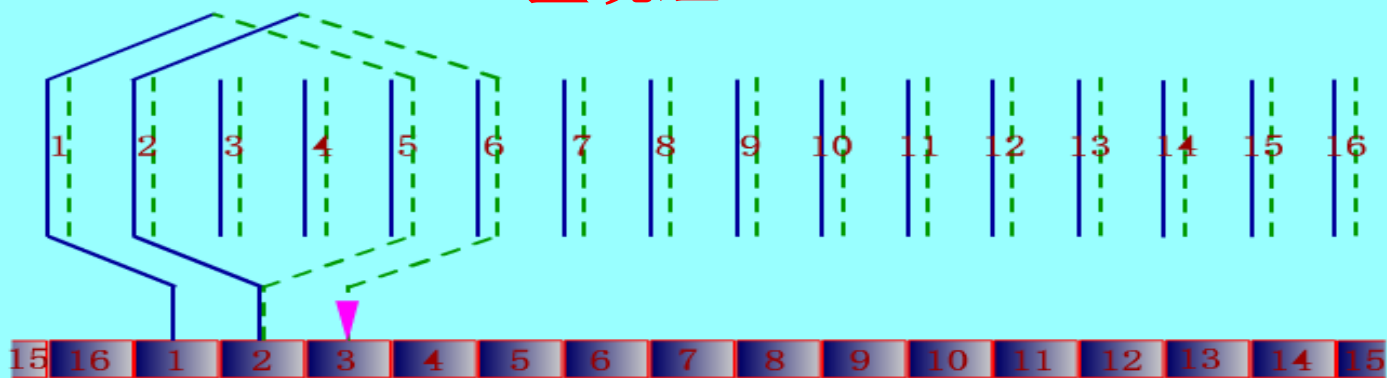
波绕组的元件



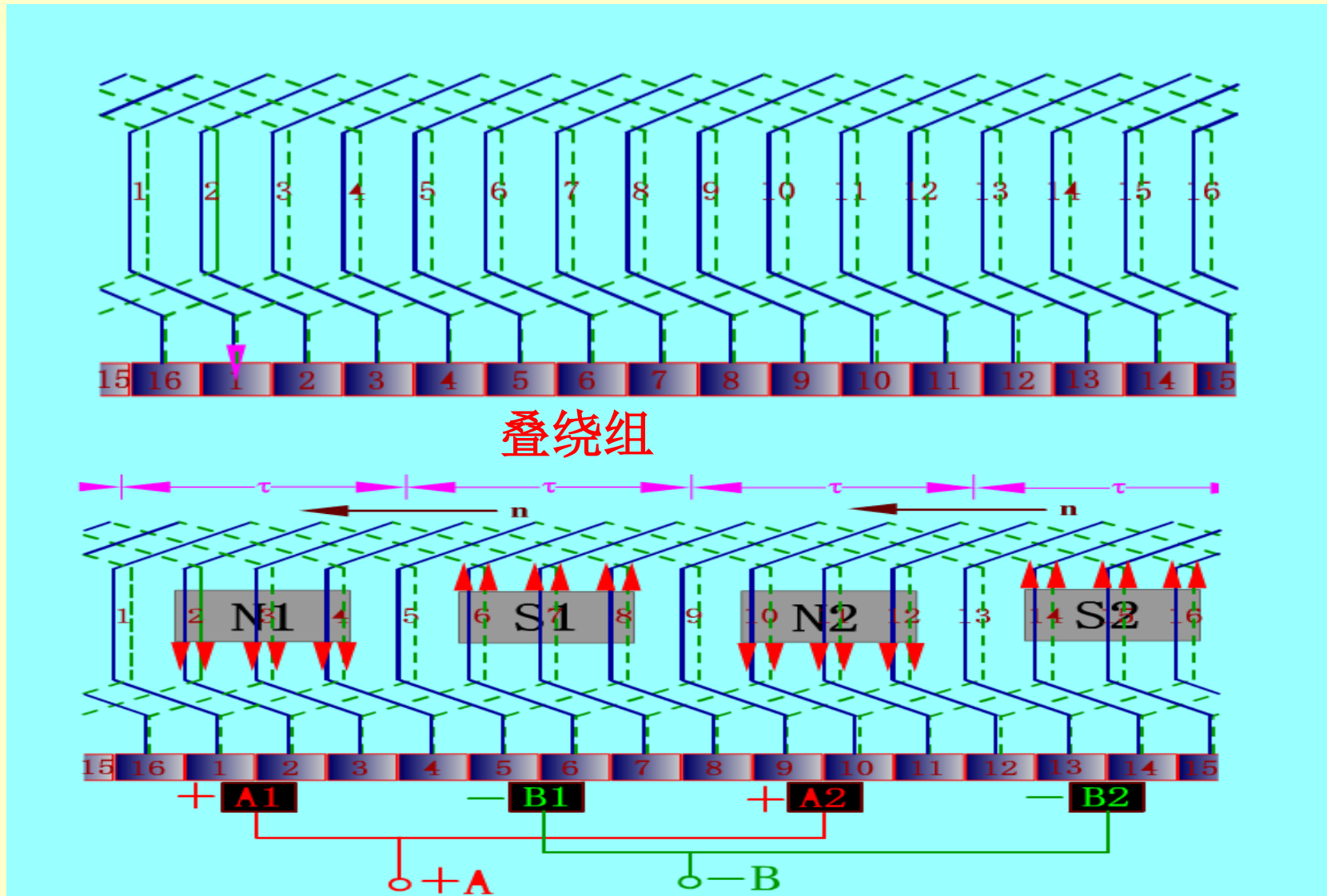
三、直流电机的结构



叠绕组

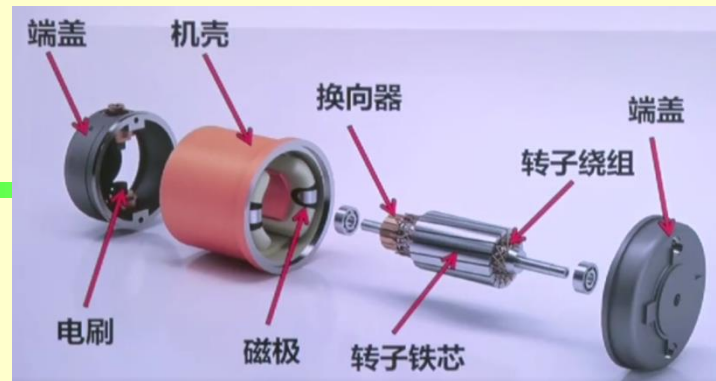


三、直流电机的结构



三、直流电机的结构

直流电机结构小结：



定子

主磁极：产生恒定磁通（磁场），由铁心和励磁绕组构成。

换向磁极（可省）：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



每日1题

2010年自动控制元件及线路试题

1.2 直流电动机运行中，每个元件所导通的电流也是交变的，改变线圈中电流方向是_____和_____完成的。

2019秋季试题模板稿

据该直流电机结构图，在下方空格处，将所列出的电机主要部件与图中的标号正确对应。

电刷与电刷架：

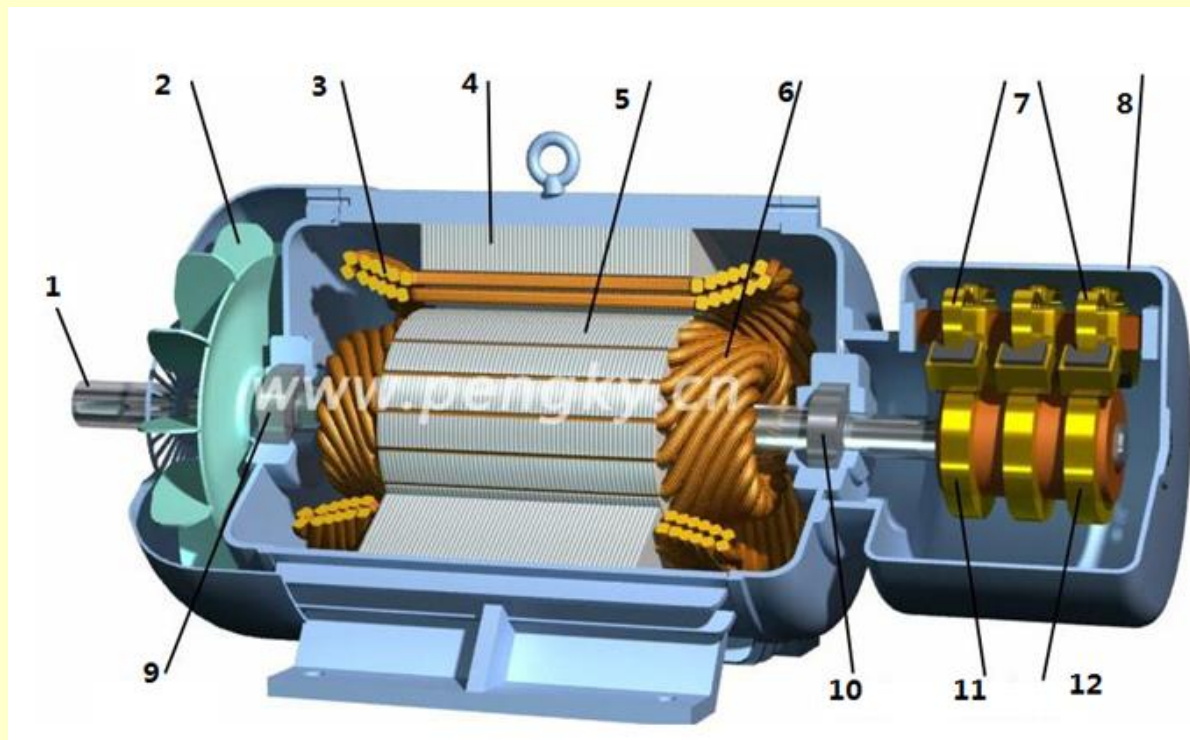
定子绕组：

转子绕组：

转子铁芯：

定子铁芯：

轴承：



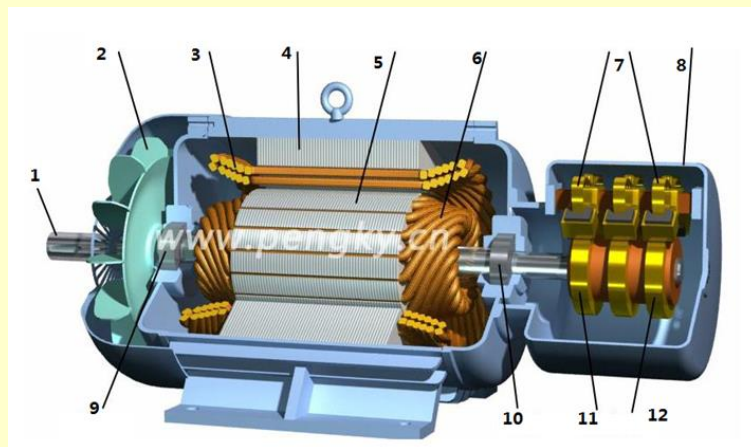
四、电机中的铁磁与永磁材料

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

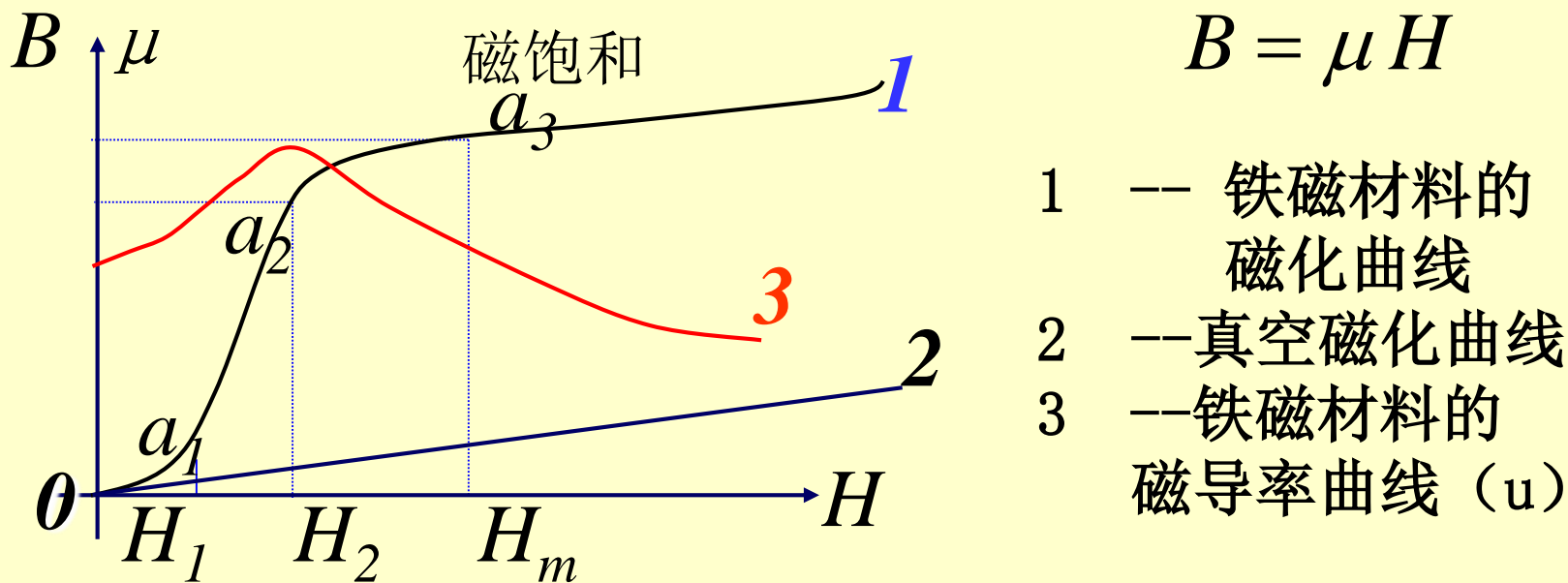
磁导率 μ 大，是真空磁导率 μ_0 的2000~8000倍。



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。



铁磁材料的磁导率不是常数, 而是随磁场强度 (H) 的变化而变化。
(由曲线3可得)

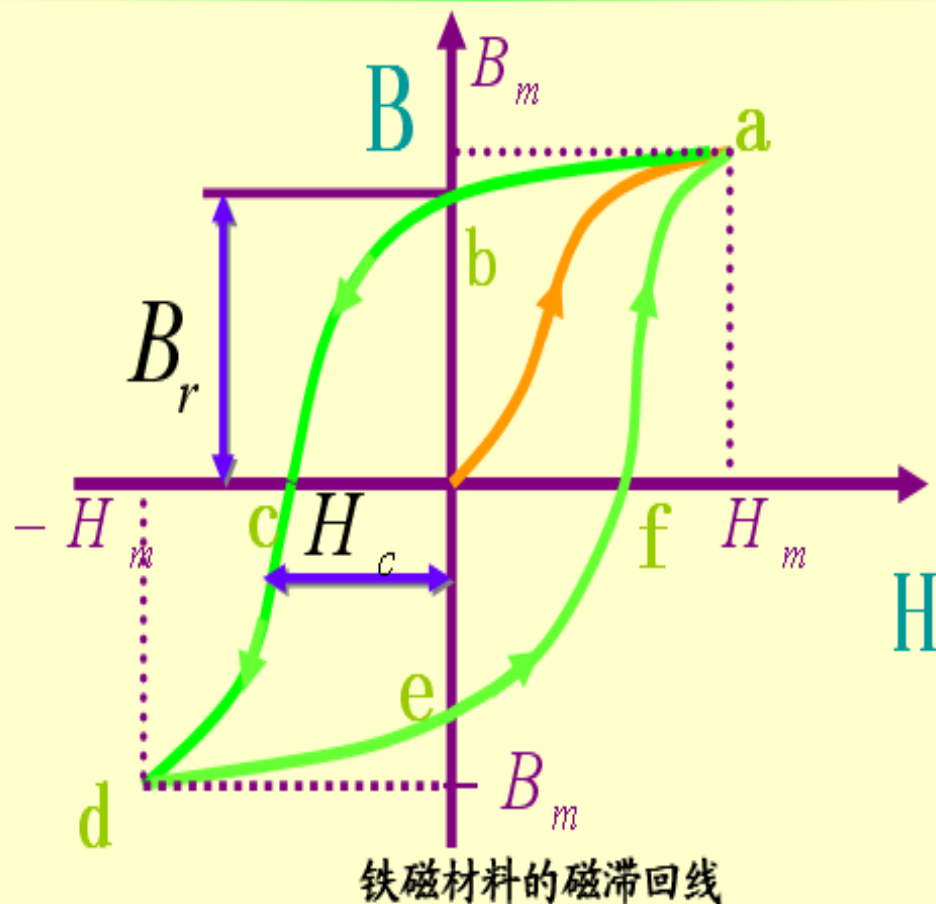


四、电机中的铁磁与永磁材料

磁滞现象与磁滞回线

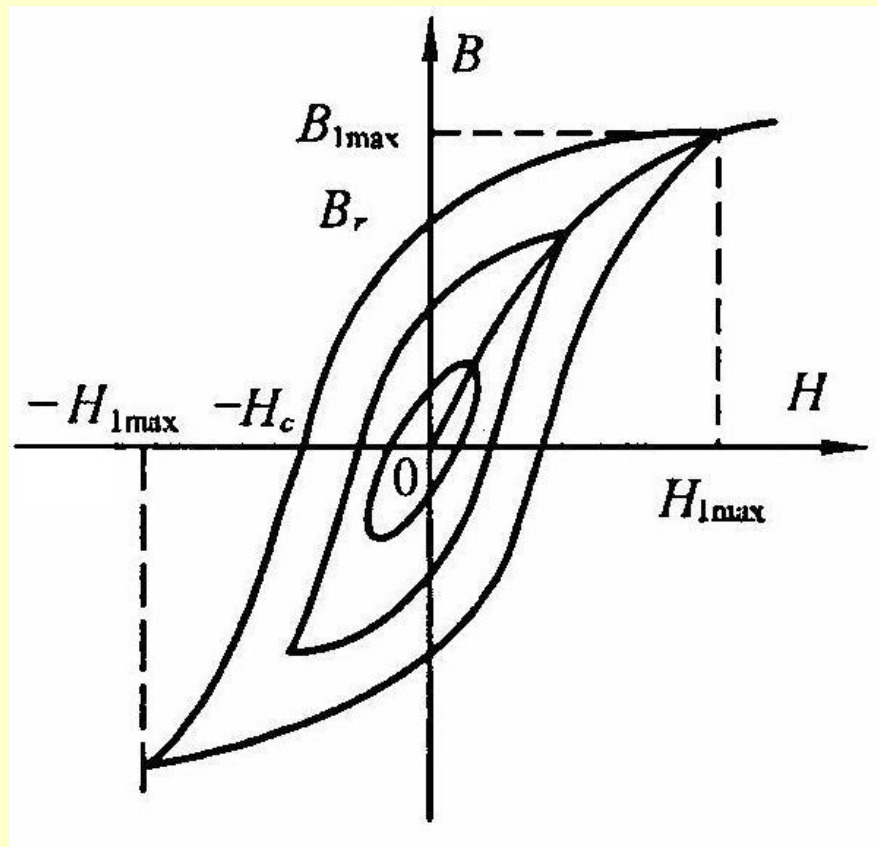
磁感应强度 B 的变化总是落后于外磁场 H 的变化，称**磁滞现象**。

- 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



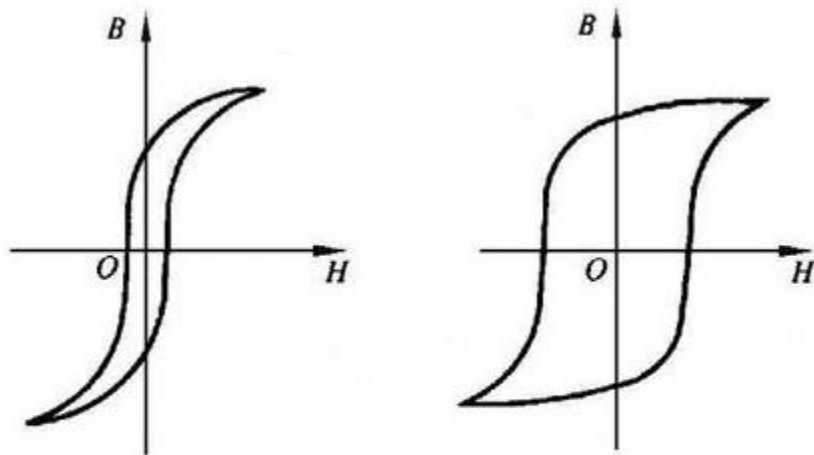
四、电机中的铁磁与永磁材料

软磁材料：Br, Hc 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：Br, Hc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、钕铁硼



(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。

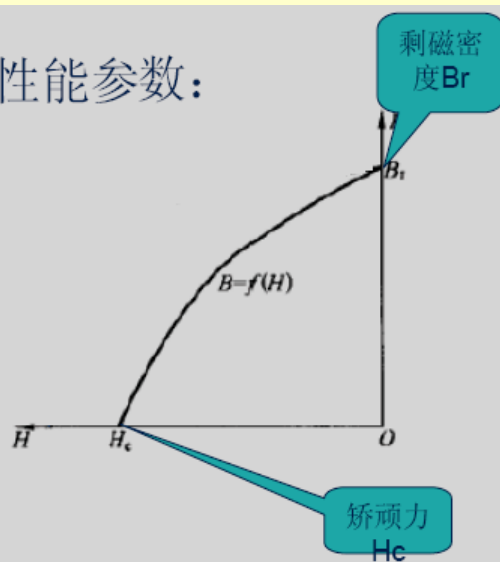


四、电机中的铁磁与永磁材料

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



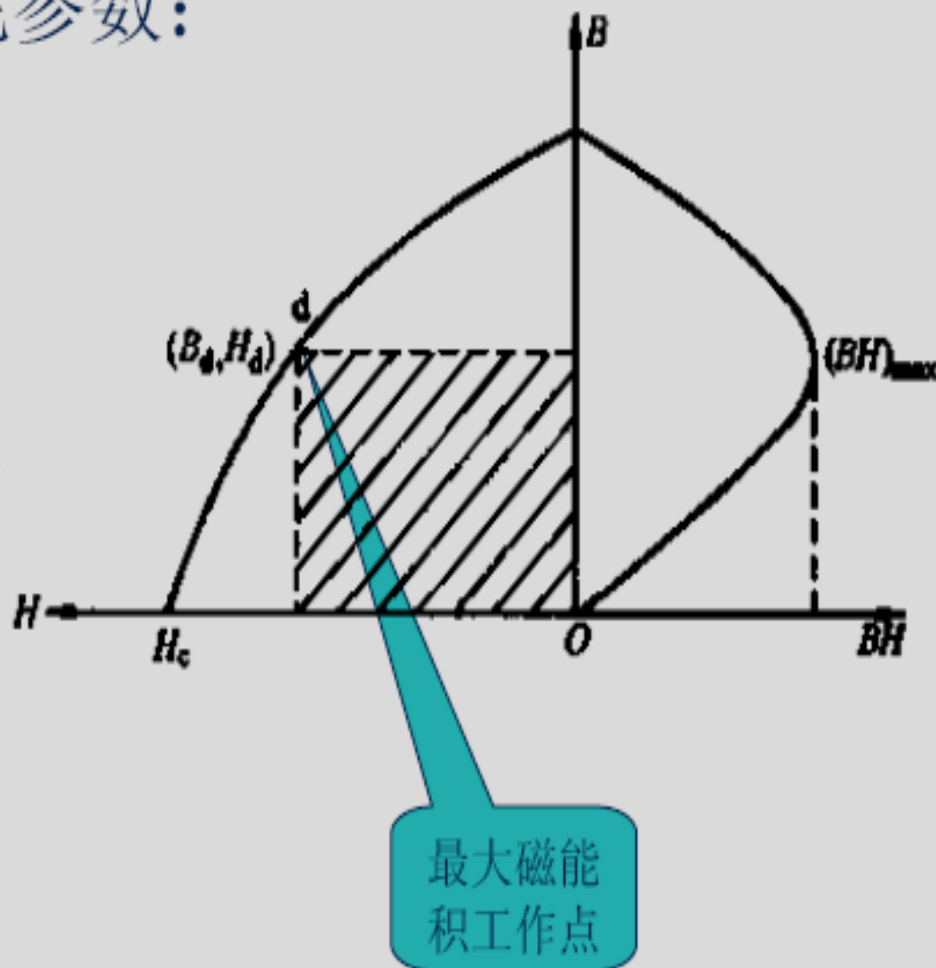
四、电机中的铁磁与永磁材料

- 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



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，是一个很不利的性能参数

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_{B_r} 和 α_{H_c} 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

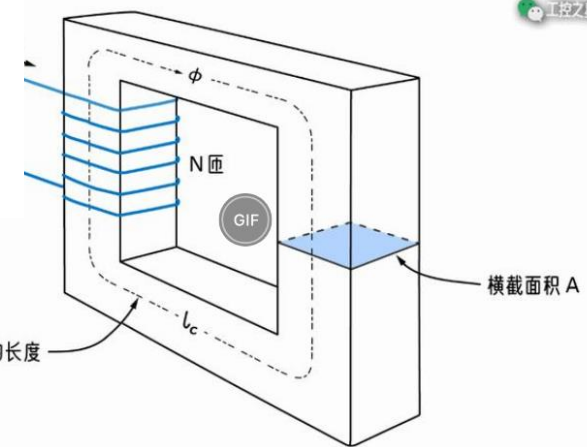
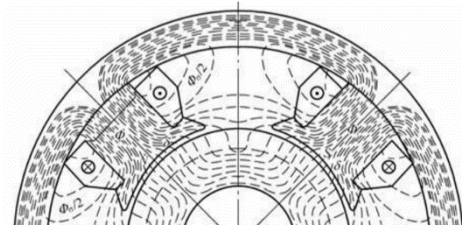
钕铁硼永磁的主要成分是 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ，是目前磁性能最强的永磁材料。它的最大磁能积可达 $398\text{kJ}/\text{m}^3$ ，为铁氧体永磁材料的 5~12 倍、铝镍钴永磁材料的 3~10 倍，理论值为 $527\text{kJ}/\text{m}^3$ ；剩磁最高可达 1.47T，矫顽力最高可超过 $1000\text{kA}/\text{m}$ ，能吸起相当于自身重量 640 倍的重物。由于不含钴且钕在稀土中的含量是钕的十几倍，钕铁硼的价格比稀土钴要低得多。

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。





推荐于2018-02-16 · TA获得超过5.5万个赞



非铁磁性物质的 μ 近似等于 μ_0 ，而铁磁性物质的磁导率很高， $\mu \gg \mu_0$ 。

铁磁性材料的相对磁导率 $\mu_r = \mu / \mu_0$ ，如：

铸铁为200 ~ 400；

硅钢片 μ 为7000 ~ 10000；

镍锌铁氧体为10 ~ 1000；

镍铁合金为2000；

锰锌铁氧体为300 ~ 5000；

坡莫合金 μ 为20000 ~ 200000。

空气的相对磁导率为1.00000004；

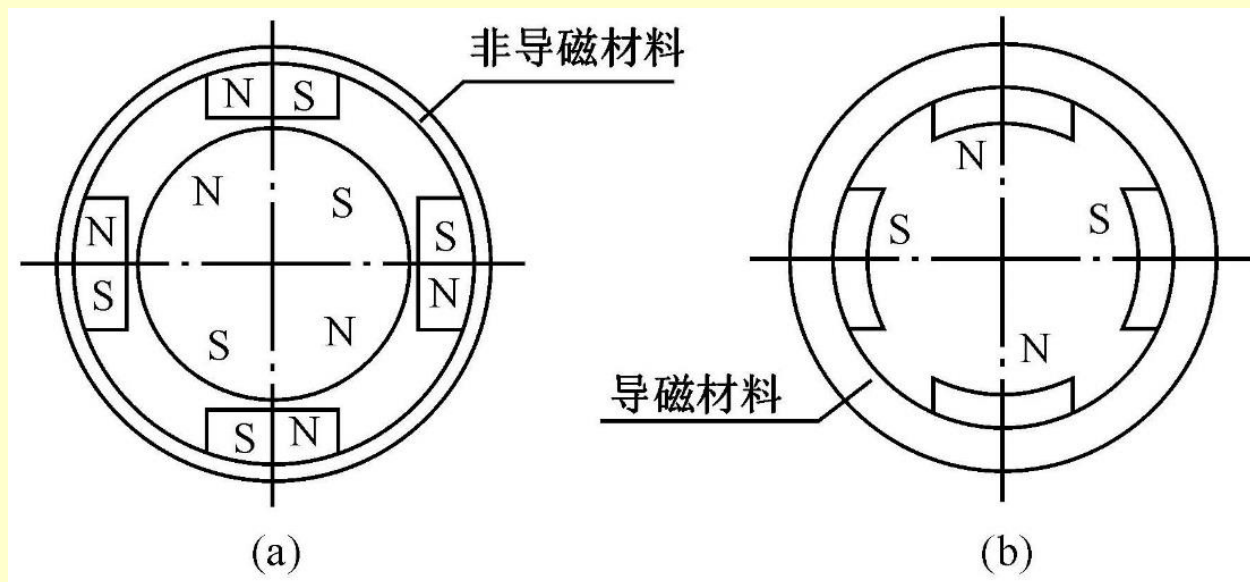
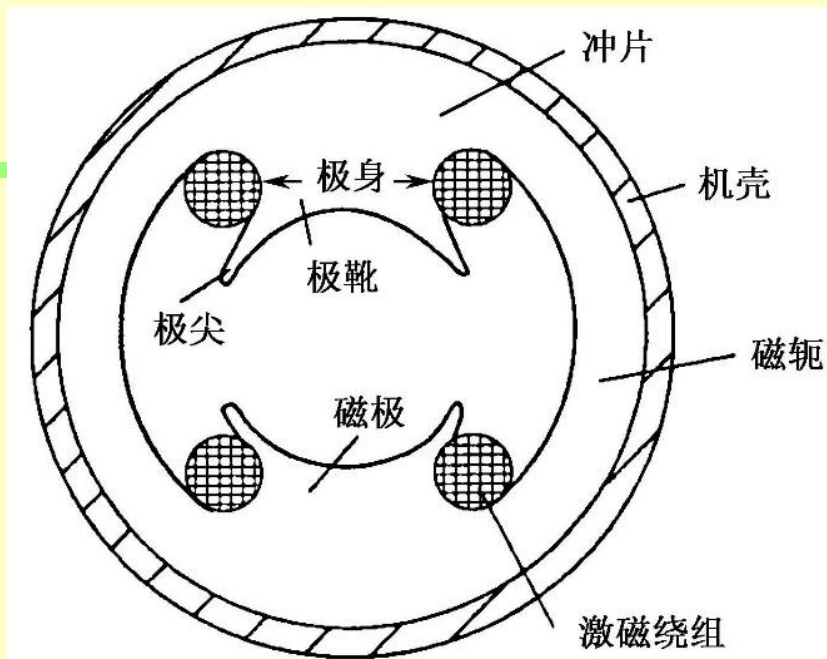
铂为1.00026；

汞、银、铜、碳(金刚石 μ)、铅等均为抗磁性物质,其相对磁导率都小于1,分别为0.999971、0.999994、0.999990、0.999979、0.999982。



磁王：钕铁硼
磁导率：10¹² H/m
磁能积：高





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

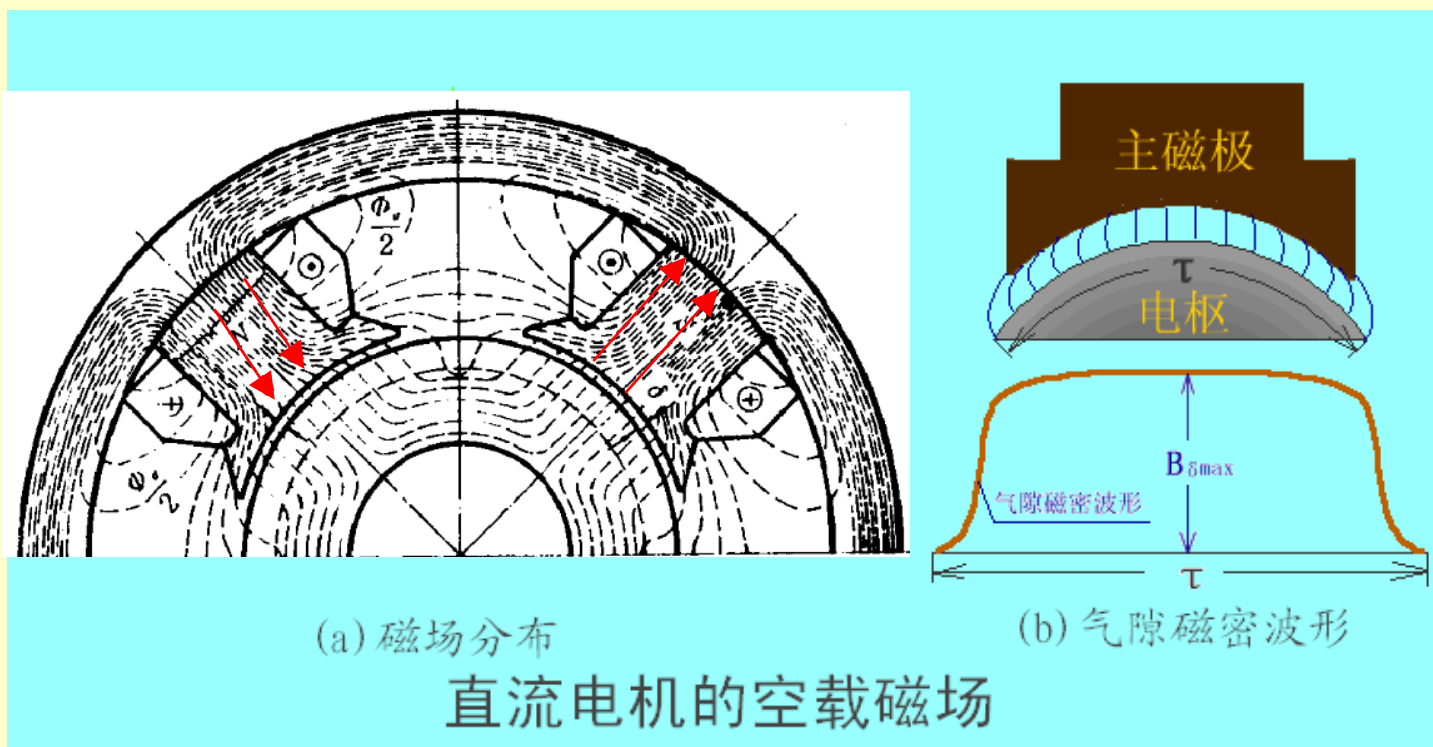
常用的铁氧体、钕铁硼等永磁材料的电阻率是纯铁的100-1000倍以上, (纯铁) 铁耗小。



五、直流电机的磁场

• 1、空载时直流电机的磁场

空载磁场为（转子）**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。

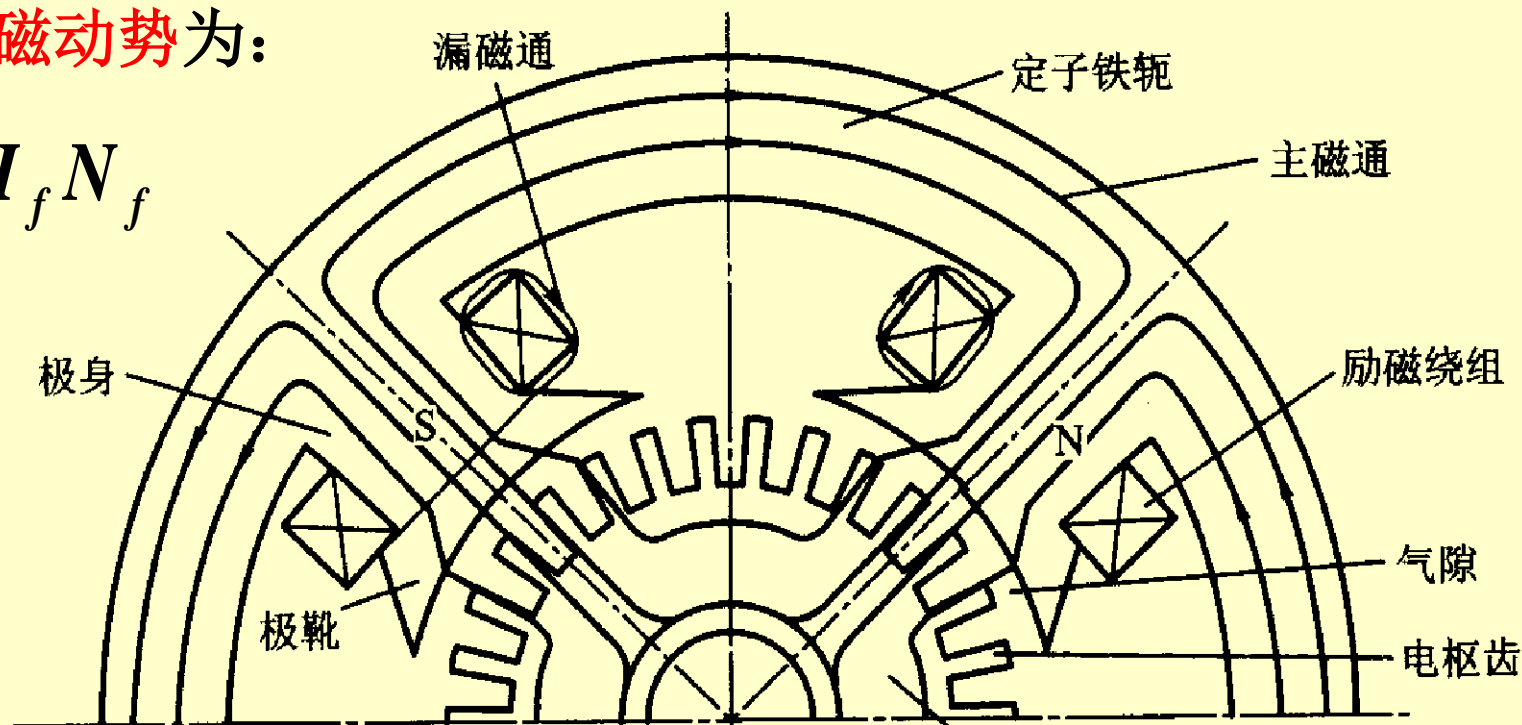


五、直流电机的磁场

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：

$$F_f = I_f N_f$$



五、直流电机的磁场

主磁通

磁力线由N极出来，经气隙、电枢齿部、电枢铁心的铁轭、电枢齿部、气隙进入S极，再经定子铁轭回到N极

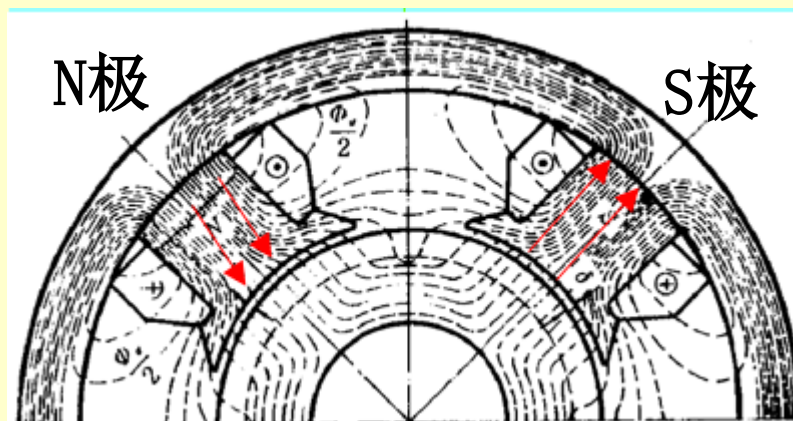
主磁路

漏磁通

磁力线不进入电枢铁心，直接经过气隙、相邻磁极或定子铁轭形成闭合回路

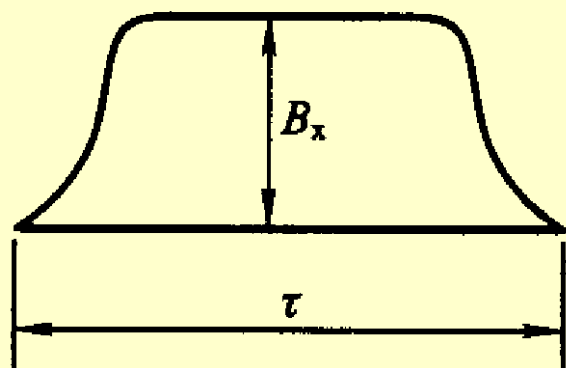
漏磁路

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程度。在数量上，漏磁通比主磁通小得多，大约是总磁通的20%。



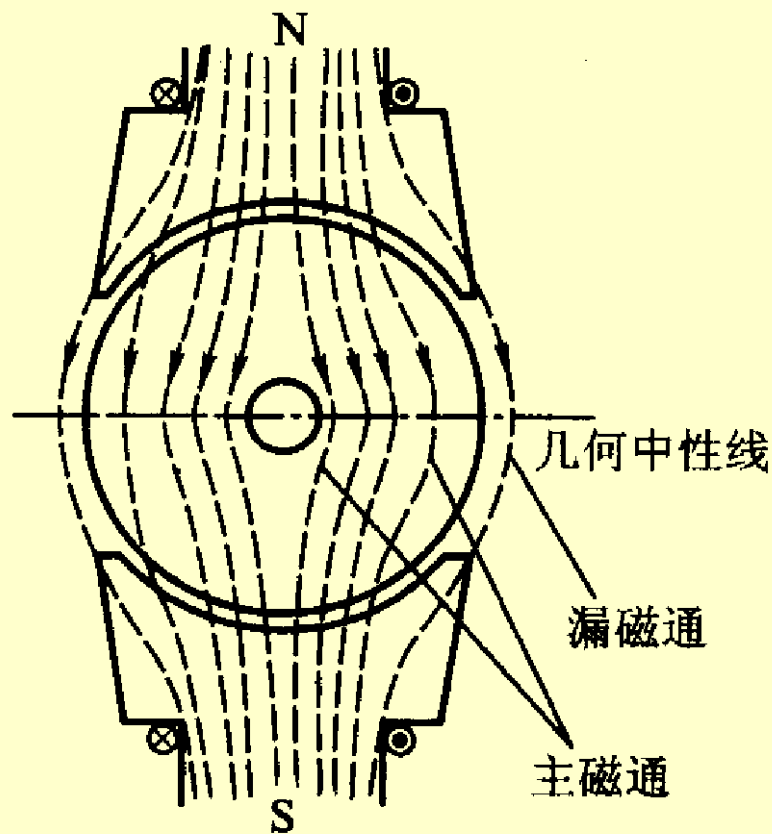
五、直流电机的磁场

空载时的气隙磁通密度为一平顶波，如下图(b)所示。



(b) 气隙磁密分布

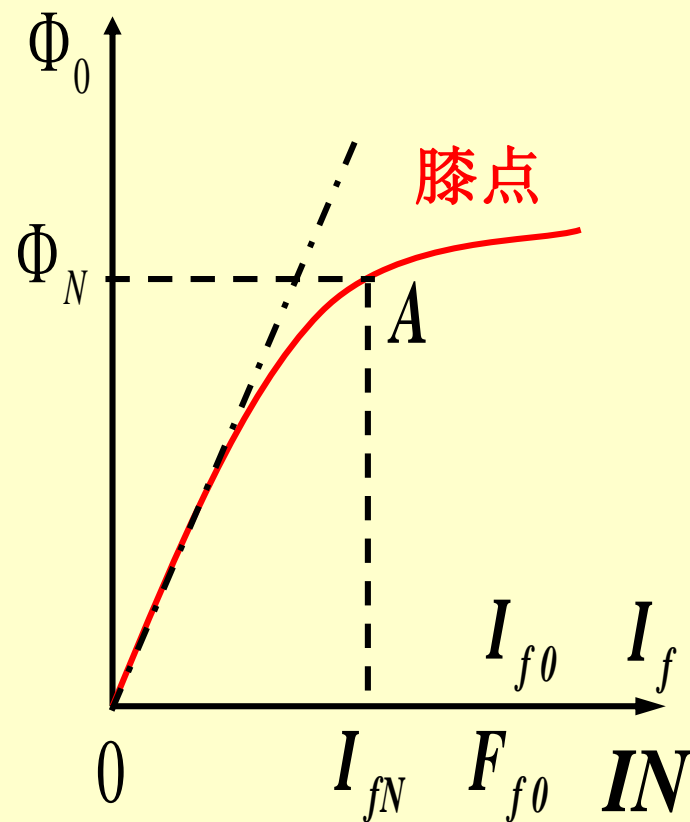
空载时主磁极磁通的分布情况，如右图(c)所示。



(c) 主磁通与漏磁通

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。

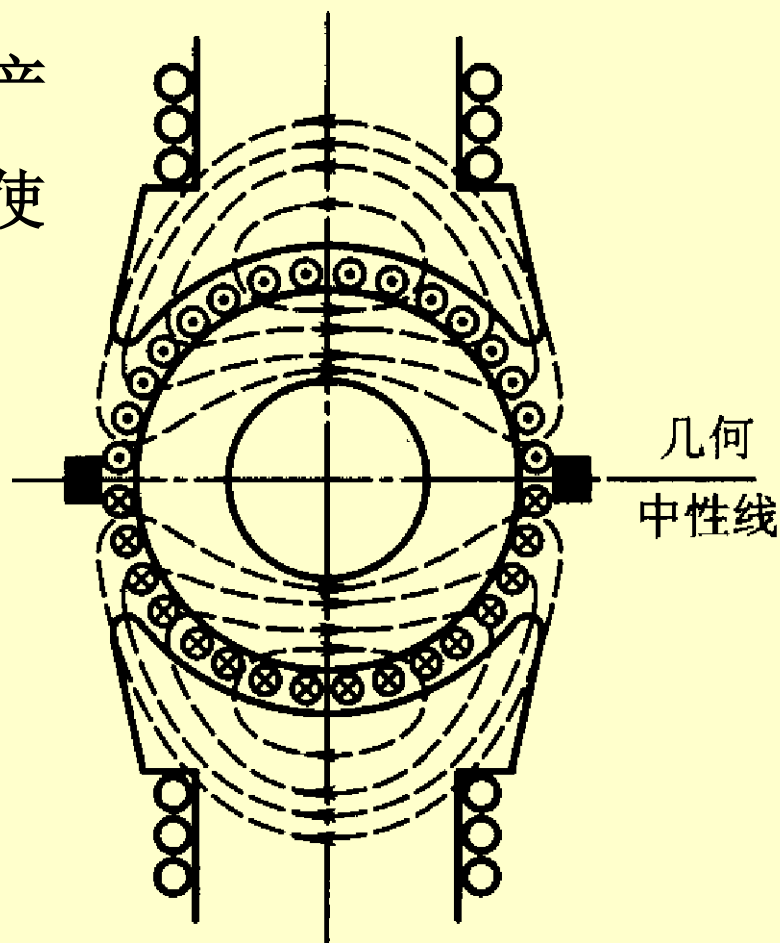


五、直流电机的磁场

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。

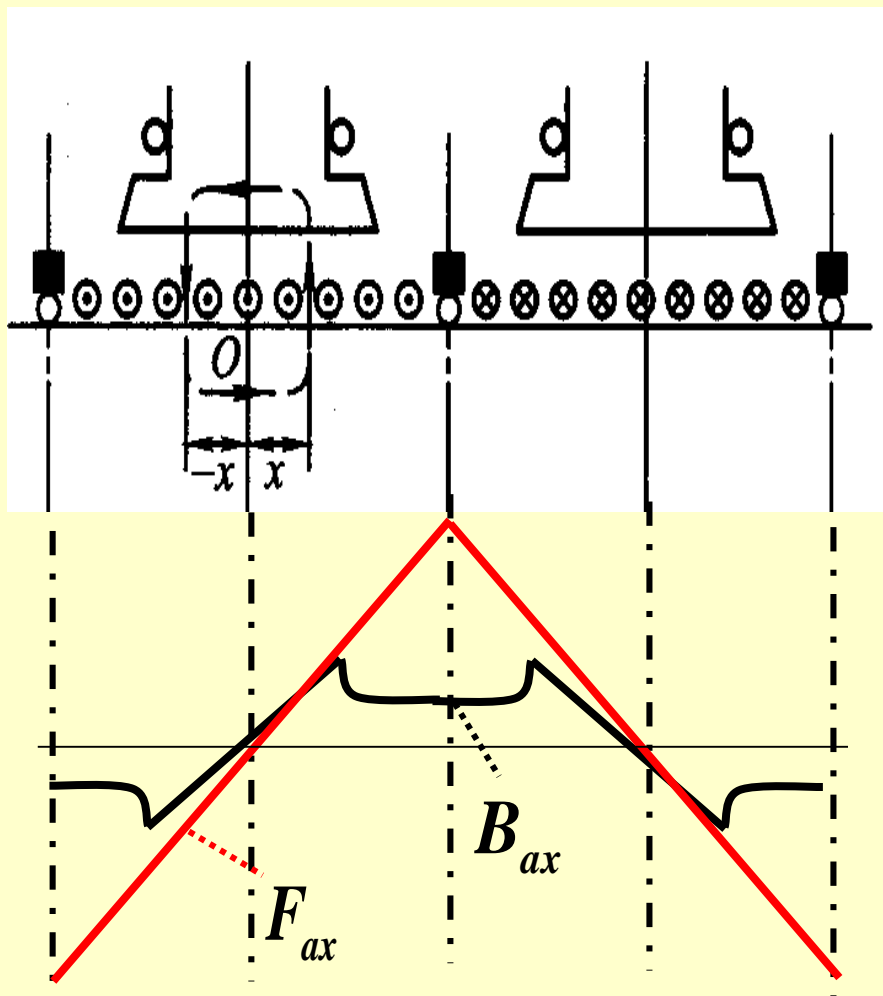
假设励磁电流为零，只有电枢电流。由图可见电枢磁动势产生的气隙磁场在空间的分布情况，电枢磁动势为交轴磁动势。



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。

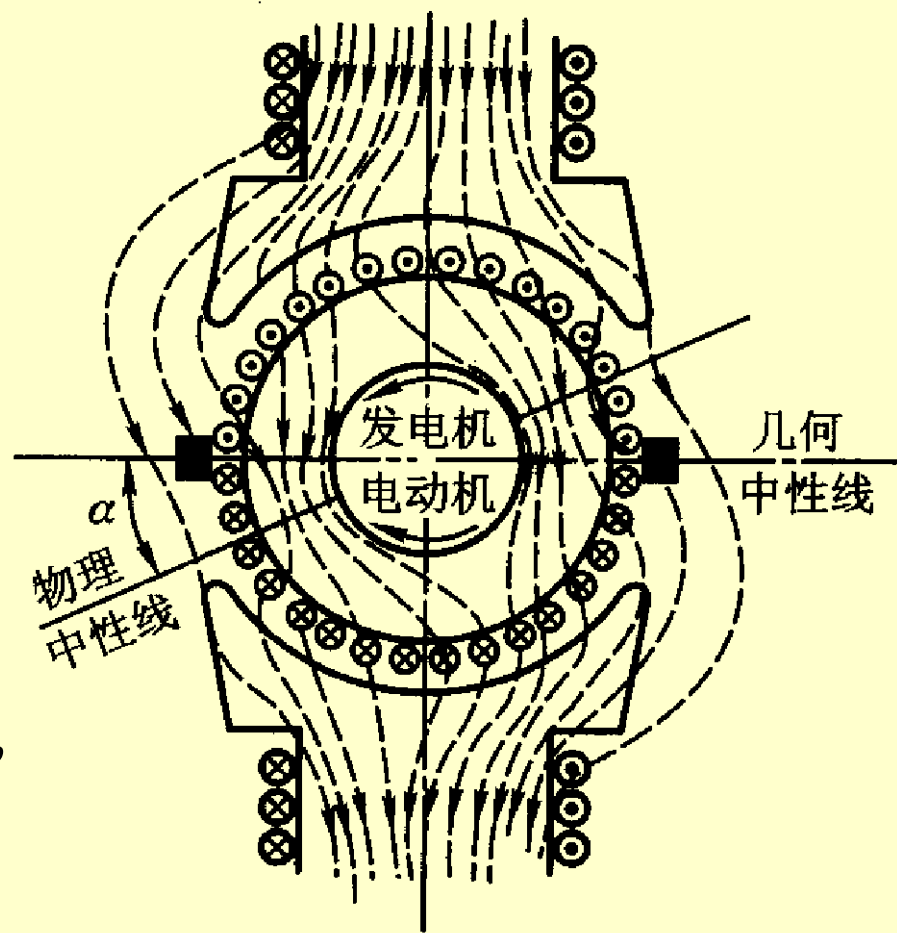


五、直流电机的磁场

3、直流电机的电枢反应

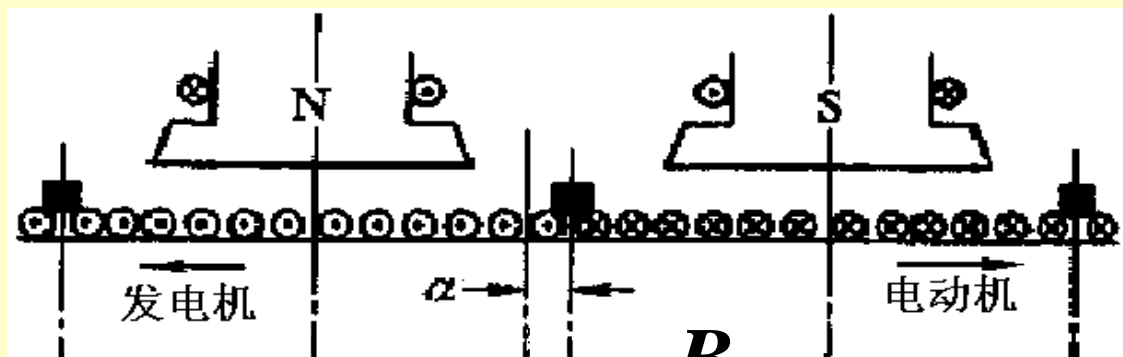
电机负载运行后，气隙中的磁场是励磁磁动势与电枢磁动势共同作用的结果。电枢磁场对气隙磁场的影响称为电枢反应。

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。



(a) 磁场分布

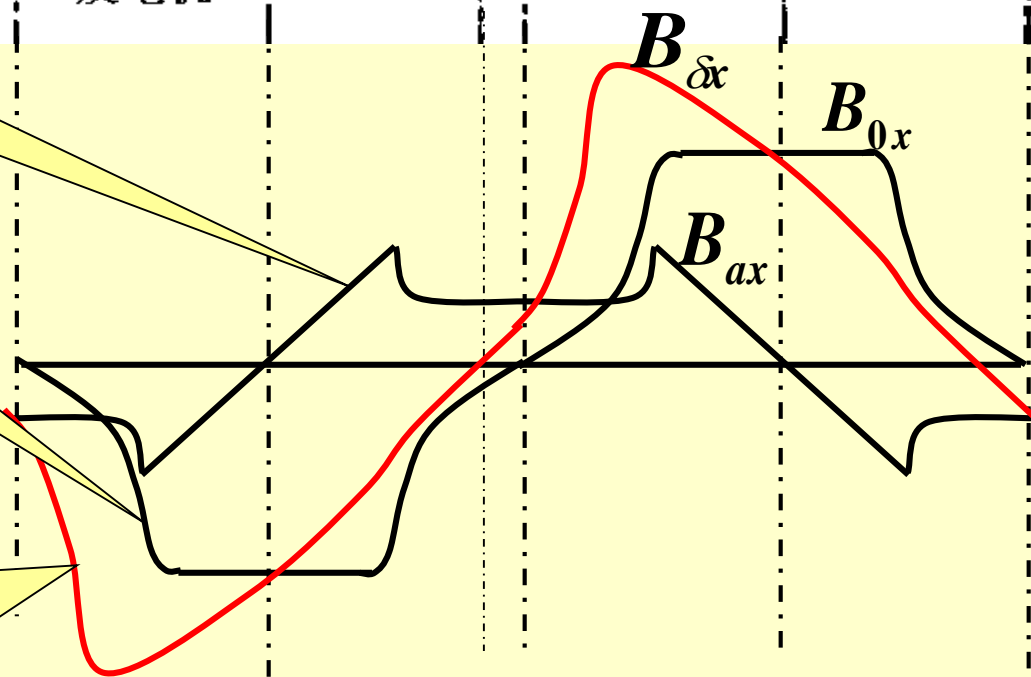
五、直流电机的磁场



电枢磁场磁通密度分布曲线

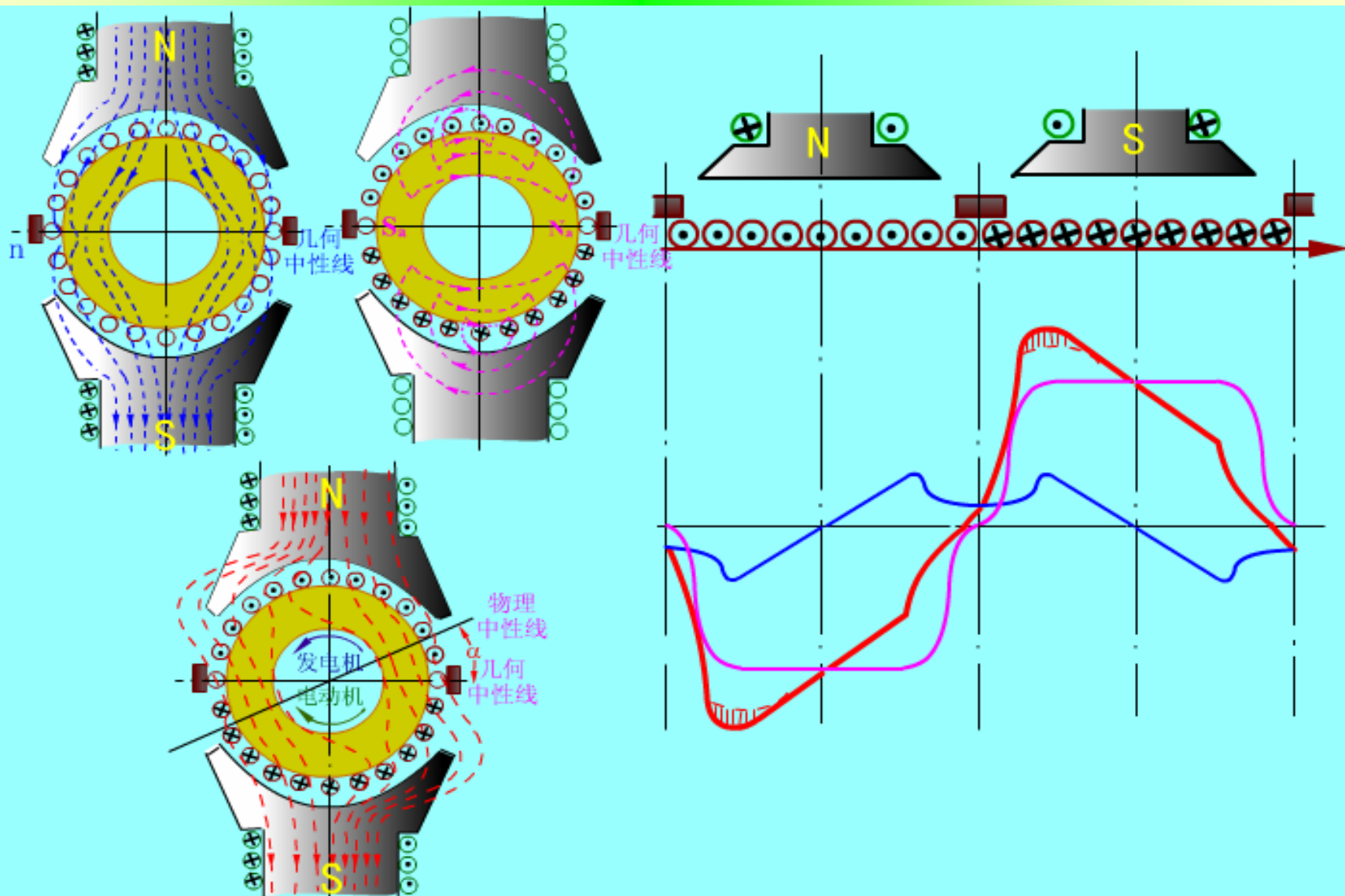
主磁场的磁通密度分布曲线

两条曲线逐点叠加后得到负载时气隙磁场的磁通密度分布曲线



五、直流电机的磁场

直流电机磁场的合成



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。

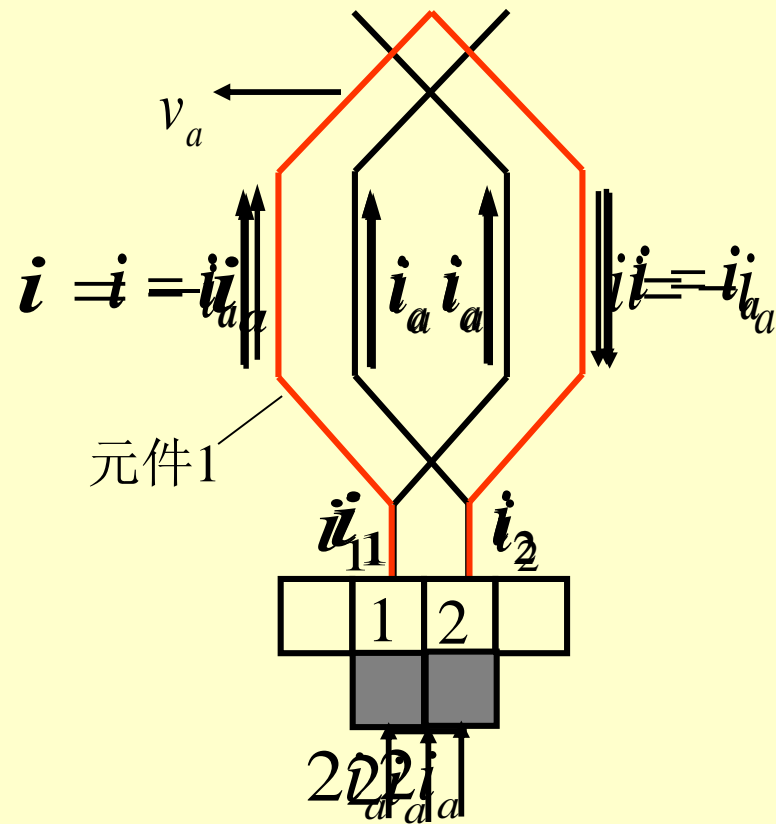
2) 对主磁场起去磁作用 电机正常运行于磁化曲线的膝部，主磁极增磁部分因磁密增加使饱和程度提高，铁心磁阻增大，增加的磁通少些，因此负载时每极磁通略为减少。即电刷在几何中性线时的电枢反应为交轴去磁性质。



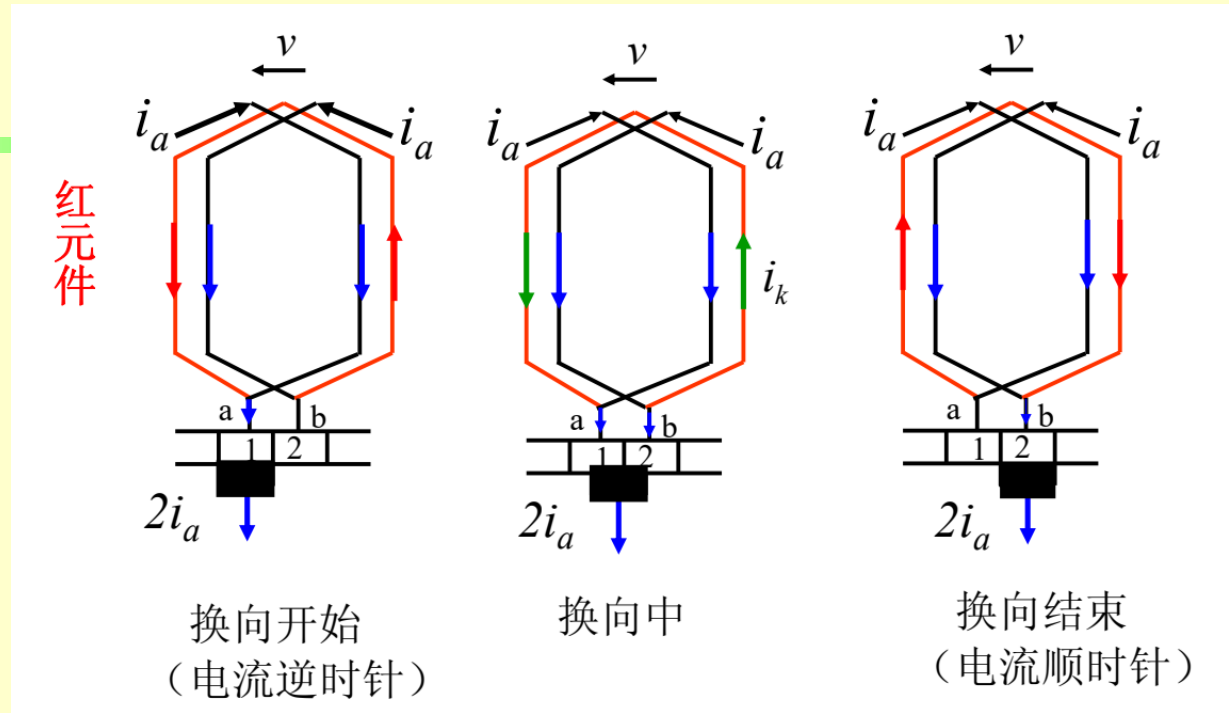
六、 直流电机的换向

换向概述

直流电机的某一个（线圈）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。



$$\mathbf{i} = \mathbf{i}_a$$

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

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

$$\mathbf{i} = -\mathbf{i}_a$$



六、直流电机的换向

元件从开始换向到换向終了所经历的时间，称为换向周期。**换向周期通常只有千分之几秒（ns级别）**。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。



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，由于电枢反应的存在，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：
$$\sum e = e_L + e_a$$



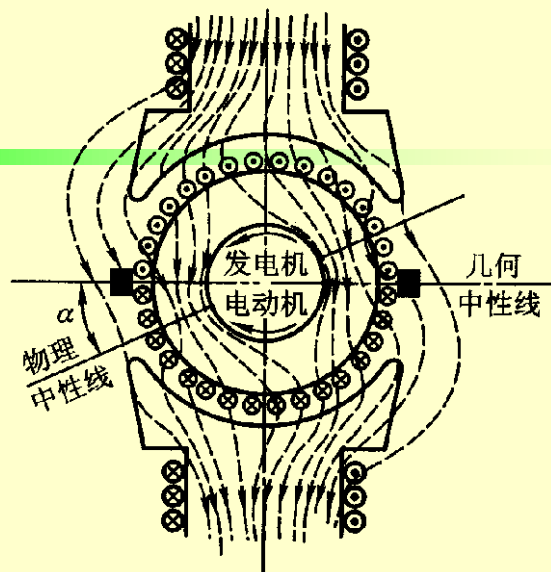
六、直流电机的换向

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。



(a) 磁场分布

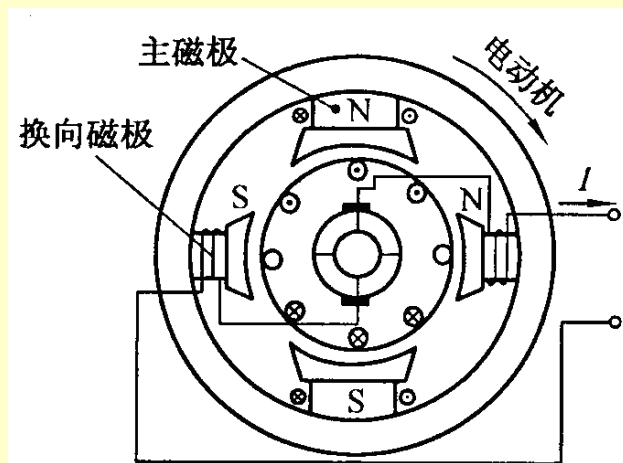


图 1-24 直流电动机中的换向磁极



每日1题

2013秋试题B-

2.6 永磁材料的重要指标包括_____。

- A. 磁滞损耗
- B. 剩磁磁密 B_r
- C. 矫顽力 H_c
- D. 最大磁能积 $(BH)_{max}$

直流电动机能自动改变线圈中电流方向的器件是 【 】

- A、电刷
- B、换向器
- C、定子
- D、转子

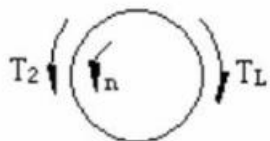
2022秋季试题

3.1 下列关于电枢反应说法正确的是_____。

- A. 电枢反应使电动机的物理中性面与几何中性面不再重合
- B. 电枢反应将使总气隙磁通有所减小
- C. 主极磁场是指励磁绕组磁场（定子）等于零时，由电枢绕组电流单独作用产生的磁场
- D. 他励式直流电机，电枢电流越大电枢反应明显



电动机运行状态如图所示，当 $T_2 > T_L$ 时，判断正确的是【 】。



- A. 匀速 B. 减速 C. 加速 D. 不确定

直流电动机工作在电动状态时的电磁转矩为【 】

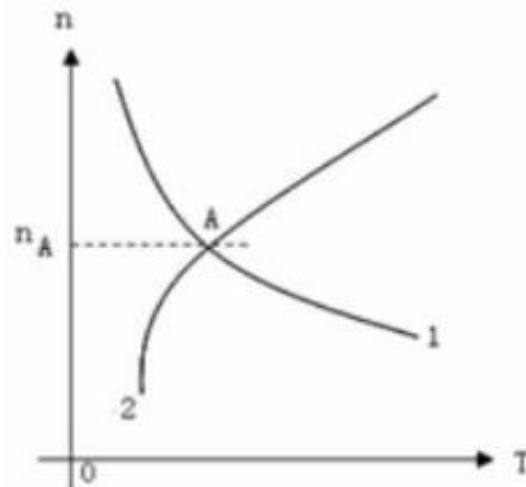
- A. 拖动转矩 B. 阻转矩 C. 制动转矩 D. 位能转

电动机稳定匀速运行时，其拖动转矩与负载转矩的关系为【 】

- A. 拖动转矩比负载转矩略大，方向相反
B. 拖动转矩比负载转矩小，方向相反
C. 拖动转矩与负载转矩相等，方向相反
D. 拖动转矩与负载转矩都为零



某电力拖动系统的电动机机械特性（曲线 1）和负载特性（曲线 2）如图，试分析说明该系统能否在 A 点稳定运行？



能，如图所以。因为曲线 1 与曲线 2 有交点，满足系统稳定的必要条件；当 $n > n_A$ 时有 $T < T_L$ ，当 $n < n_A$ 时有 $T > T_L$ ，满足系统稳定的充分条件，

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。

