



哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



自动控制实践(I)-3

- 直流电机基本方程



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



上节课复习

直流电机的主要部件

定子

主磁极：产生恒定气隙磁通，永磁或线圈激磁

电刷装置：与换向片配合,完成外直流与内交流互换

机座：构成闭合磁路，并支撑和固定。

气隙


转子

电枢铁心：主磁路的一部分，用于放置电枢绕组。

电枢绕组：由带绝缘的导线绕制而成，是电路部分。

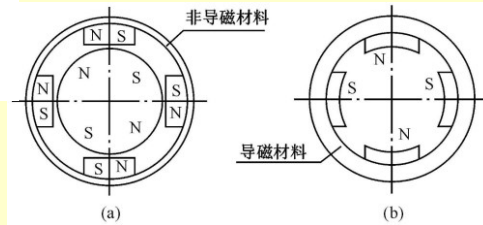
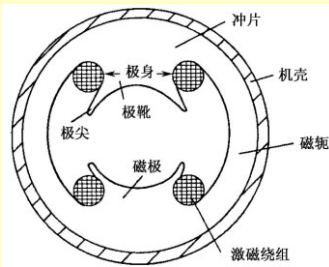
换向器：与电刷配合,完成外直流与内交流互换

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



上节课复习

定子

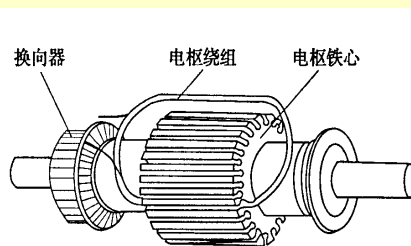


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



上节课复习

转子



1-4 电枢铁心和绕组

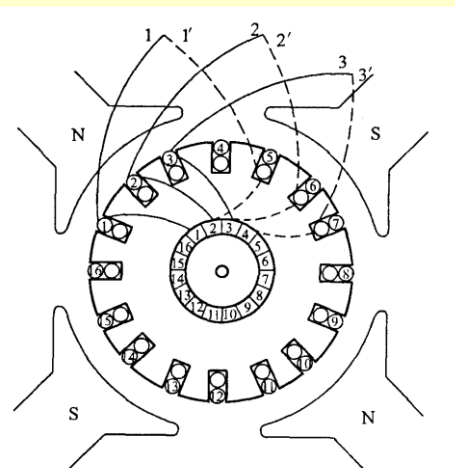
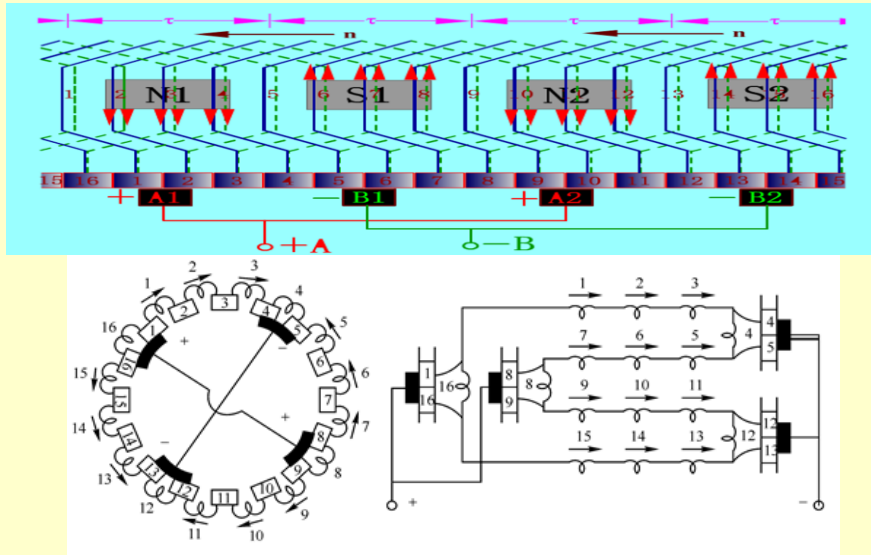


图 1-21 绕组元件在电枢上的排列方式

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



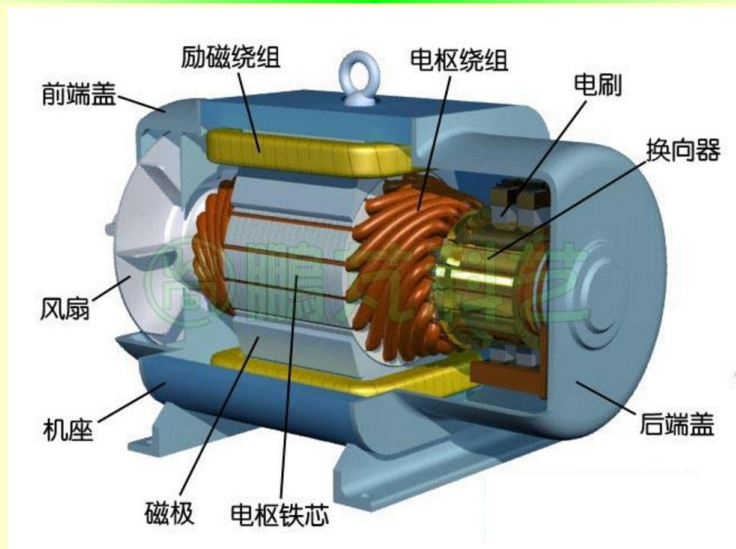
上节课复习



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



上节课复习



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



上节课复习

拆开的直流电机，如何组装？



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



上节课复习

1. 什么是极距？极距的两种表示方式？
2. 为什么直流电机电枢绕组的节距是一个极距？
3. 直流电机中电枢绕组中的电流是直流电还是交流电？
电枢电流是什么波形？

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

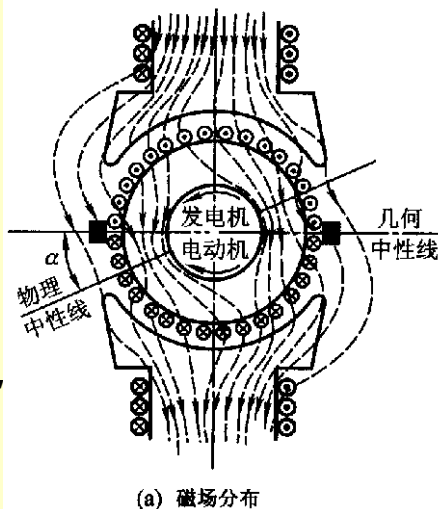


直流电机的磁场

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

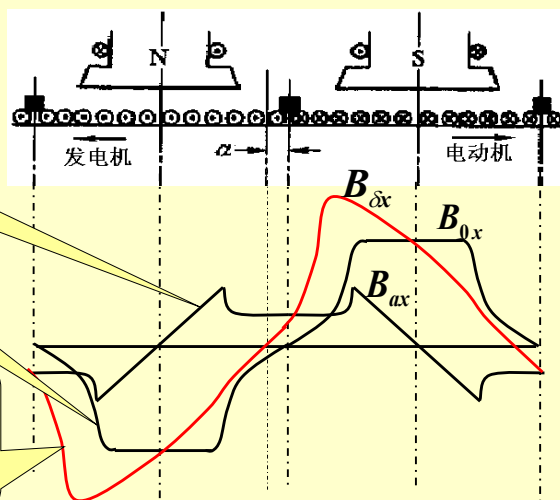


直流电机的磁场

电枢磁场磁通密度分布曲线

主磁场的磁通密度分布曲线

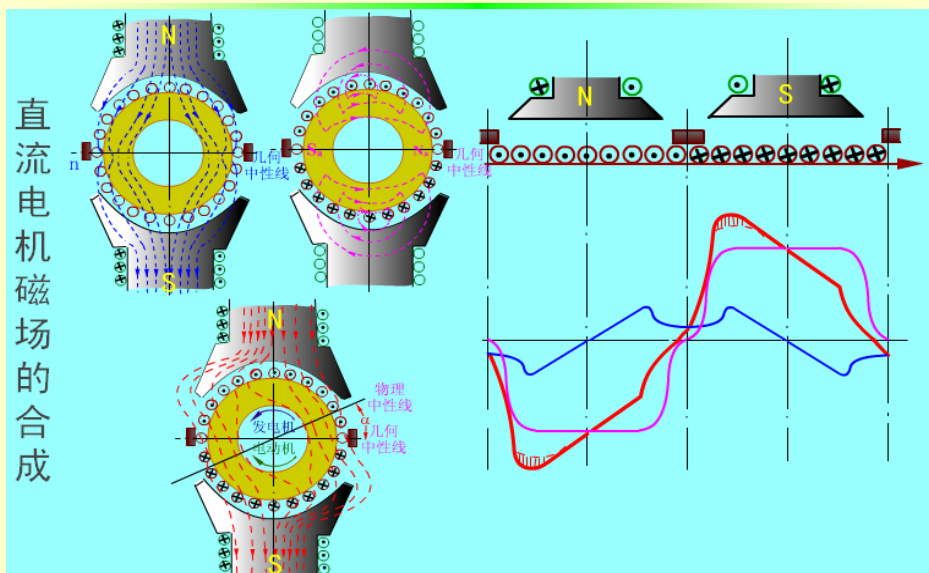
两条曲线逐点叠加后得到负载时气隙磁场的磁通密度分布曲线



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



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



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。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



直流电机的换向

换向概述

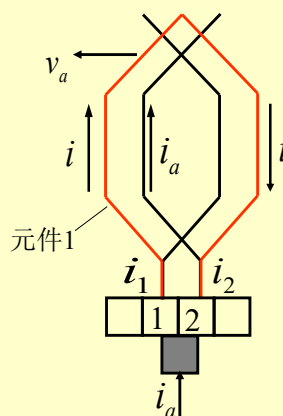
直流电机某一个元件被电刷短路，从一条支路换到另一条支路，元件的电流方向因此改变，即换向。

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



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。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



原理与结构部分小结

直流电机原理与结构部分学习要求:

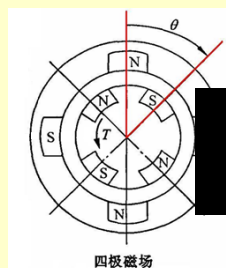
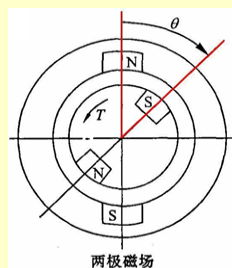
1. **掌握**直流电机工作原理。
2. **熟悉**直流电机的结构组成。
3. **了解**直流电机中的铁磁/永磁材料基本特点, **了解**直流电机运行中磁场和换向的基本特点。



电机概述

电机通用原理

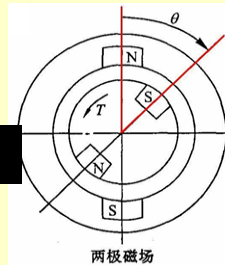
所有类型电机的驱动, 都可以把定子和转子看成是两个相同极数的永磁体/磁钢相互作用。



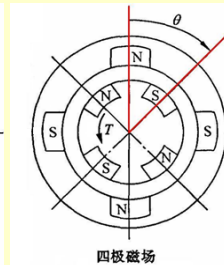
电机概述

电机通用原理

考虑使用永磁体产生磁场的优点，目前驱动电机最为优化高效的方式是：定子与转子中一个采用磁钢激磁，一个采用线圈/绕组产生可控磁场，并保持定子转子磁场电角度夹角为 90° 。



两极磁场



四极磁场



目 录

直流电机基本关系式



1. 直流电机基本关系式

直流电机的基本关系式

a. 电动势

b. 电磁力矩

c. 电压平衡式

d. 力矩平衡式

e. 功率平衡式

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 直流电机基本关系式

感应电动势:

$$e = \sum B_{\delta} l v = \frac{N}{2a} B_{\delta} l v$$

$$= \frac{N}{2a} B_{\delta} l r \Omega = \frac{N}{2a} B_{\delta} \frac{2\pi r l}{2p} \Omega \frac{2p}{2\pi}$$

$$= \frac{N}{2a} \phi \Omega \frac{2p}{2\pi} = \frac{pN}{2\pi a} \phi \Omega$$

$$= K_e \Omega$$

$$\text{电枢切割线速度: } v = \Omega r = n \frac{2\pi}{60} r$$

Ω - rad/s; n - rpm (每分钟转数)

$$\text{每磁极下平均磁通: } B_{\delta} \frac{2\pi r l}{2p} = \phi$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.直流电机基本关系式

电磁力矩:

$$\begin{aligned} T_e &= \sum B_\delta i_1 l r = \frac{N}{2a} B_\delta i_a l r & \text{电枢总电流: } i_a = 2a i_1 \\ &= \frac{N}{2a} B_\delta \frac{2\pi r l}{2p} i_a \frac{2p}{2\pi} & \text{每磁极下平均磁通: } B_\delta \frac{2\pi r l}{2p} = \phi \\ &= \frac{N}{2a} \phi i_a \frac{2p}{2\pi} = \frac{pN}{2\pi a} \phi i_a \\ &= K_t i_a \end{aligned}$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 直流电机基本关系式

提问:

1) 直流电动机如何改变转速方向?

/他励 /永磁 /并励 /串励

2) 如何改变直流发电机输出电压的极性?

/他励 /永磁

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 直流电机基本关系式

c. 电压平衡式

电动机： ...

发电机： ...

动态方程： ...

静态方程： ...



提问： 直流电动机和发电机中，电动势和电流的方向关系？



1. 直流电机基本关系式

d. 力矩平衡式

动态方程： ...

静态方程： ...

电动机： ...

发电机： ...



提问： 直流电动机和发电机运行的因果关系？



1. 直流电机基本关系式

e. 功率平衡式 (静态)

电动机: ...

发电机: ...

电磁功率: ...

电机效率: ...



提问: 直流电动机和发电机的额定功率、输入功率、输出功率的含义是什么?



1. 直流电机基本关系式

小结: 直流电机的基本关系式:

反电势:
$$e = K_e \Omega$$

电磁力矩:
$$T_{em} = K_T I$$

电压平衡:
$$u = e + L \frac{di}{dt} + R i$$

力矩平衡:
$$T_{em} - T_L = J \frac{d\Omega}{dt}$$



1. 直流电机的基本公式

提问:

对恒定负载下的直流电动机施加电压，达到平稳转速后，电机的电流由什么决定？电机的转速由什么决定？

对电路负荷一定的发电机，稳速运行时，其原动机拖动力矩、发电机输出电压由什么决定？



1. 直流电机基本关系式

对于电动机应用，工程中常说：

力矩由电流决定//电流由负载决定；

转速由电压(和负载)决定

电机最主要的参数：

电势系数： K_e ，(力矩系数等同于 K_e)

K_e 是电机应用中耦合电路、机械两方面平衡的关键，是电机选型的根本参数，也是电机设计最重要的参数。

$$\text{反电势: } e = K_e \Omega$$

$$\text{电磁力矩: } T_{em} = K_e I$$



1. 直流电机基本关系式

运动控制/电机驱动控制的内涵

电：

施加电压 u

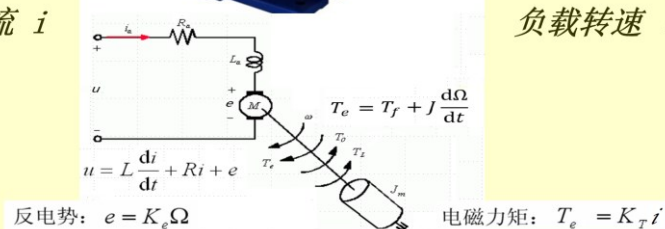
驱动电流 i



机：

输出力矩 T_e

负载转速 Ω



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 直流电机基本关系式

运动控制/电机驱动控制的内涵

无论速度还是位置控制，运动控制的根本是控制加速度。

运动控制就是调节施加给对象的力/力矩获得期望的加速度。

所有电机的输出力/力矩是其驱动电流的函数， $T_{em}=f(i)$ 。

电机的运动控制，就是调节施加给电机的电压，获得期望的驱动电流，获得期望的力矩，获得期望的加速度，获得期望的运动。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 直流电机基本关系式

电机的铭牌



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 直流电机基本关系式

直流电动机的铭牌

1. 额定功率 P_N : 电机轴上输出的机械功率 ($T_N \cdot n_N$) 。
2. 额定电压 U_N : 额定工作情况下的电枢上加的直流电压。
(例: 3V, 12V, 24V, 110V, 220V)
3. 额定电流 I_N : 额定电压下, 轴上输出额定功率时的电流
(并励应包括励磁电流和电枢电流) 三者关系:
 $P_N = U_N I_N \eta$ (η : 效率)
4. 额定转速 n_N : 在 P_N , U_N , I_N 时的转速。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.直流电机基本关系式

例: 有一并励电动机, 其额定数据如下:

$$P_2=22\text{KW}, U_N=110\text{V}, n_N=1000\text{r/min}, \eta=0.84, R_f=27.5\Omega, R_a=0.04\Omega.$$

试求: (1) 额定电枢电流 I_a 及额定励磁电流 I_f ;

(2) 额定转矩 T ;

(3) 额定条件下的反电动势 E 。

(4) 额定条件下的损耗功率 ΔP_{aCu} , 及 ΔP_O ;

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.直流电机基本关系式

解: (1) P_2 是输出功率, 额定输入功率为

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{22}{0.84} = 26.19\text{KW}$$

额定电流

$$I = \frac{P_1}{U} = \frac{26.19 \times 10^3}{110} = 238\text{ A}$$

额定励磁电流

$$I_f = \frac{U}{R_f} = \frac{110}{27.5} = 4\text{ A}$$

额定电枢电流

$$I_a = I - I_f = 238 - 4 = 234\text{ A}$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.直流电机基本关系式

(2) 额定转矩

$$T = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{22000}{1000 \times \frac{2\pi}{60}} = 210 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(3) 额定条件下反电动势

$$E = U - R_a I_a = 110 - 0.04 \times 234 = 100.6 \text{ V}$$



1.直流电机基本关系式

(4) 额定条件下电枢电路铜损

$$\Delta P_{aCu} = R_a I_a^2 = 0.04 \times 234^2 = 2190 \text{ W}$$

励磁电路铜损

$$\Delta P_{fCu} = R_f I_f^2 = 27.5 \times 4^2 = 440 \text{ W}$$

总损失功率

$$\Sigma \Delta P = P_1 - P_2 = 26190 - 22000 = 4190 \text{ W}$$

空载损耗功率

$$\Sigma \Delta P_0 = \Sigma \Delta P_1 - \Delta P_{aCu} = 4190 - 2190 = 2000 \text{ W}$$



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。

