



# 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。

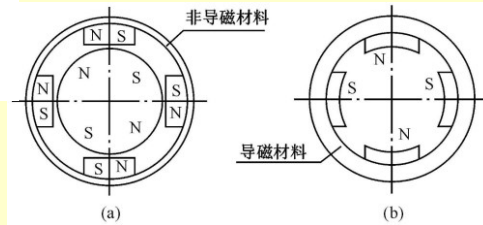
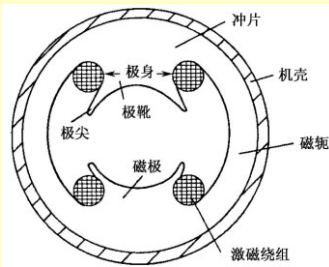
**换向器**：与电刷配合,完成外直流与内交流互换

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

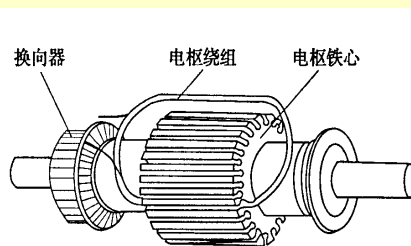


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



## 上节课复习

### 转子



1-4 电枢铁心和绕组

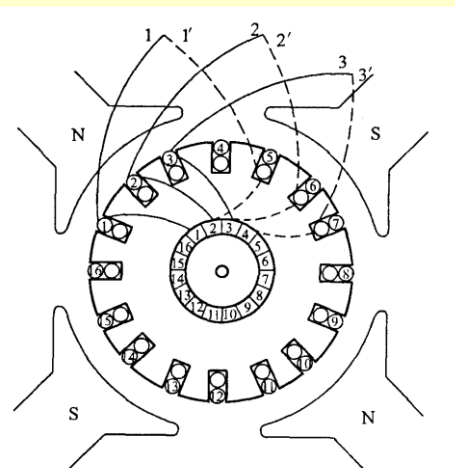
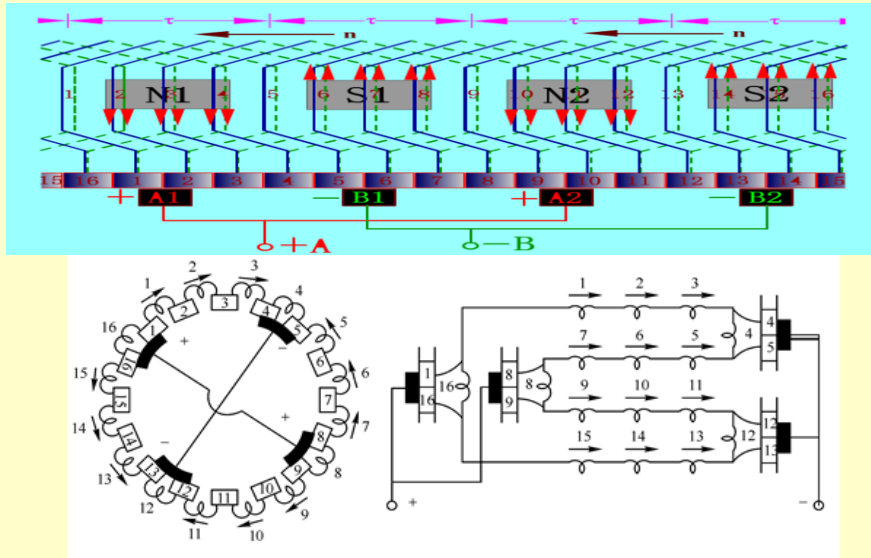


图 1-21 绕组元件在电枢上的排列方式

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



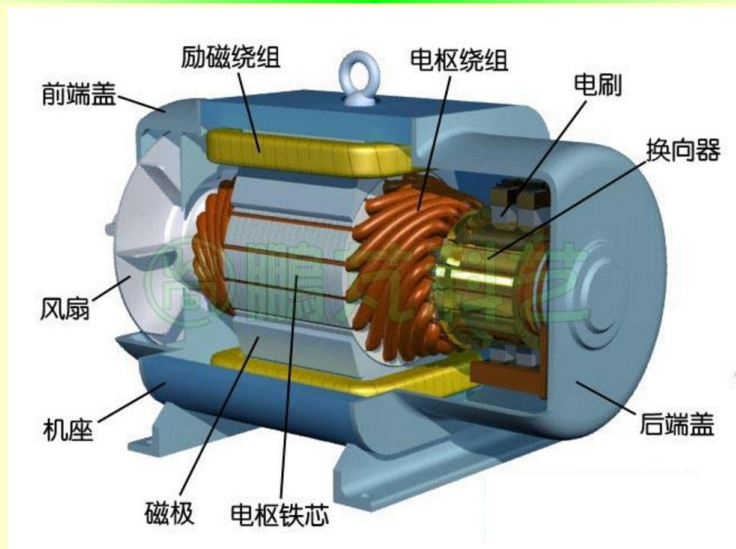
## 上节课复习



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



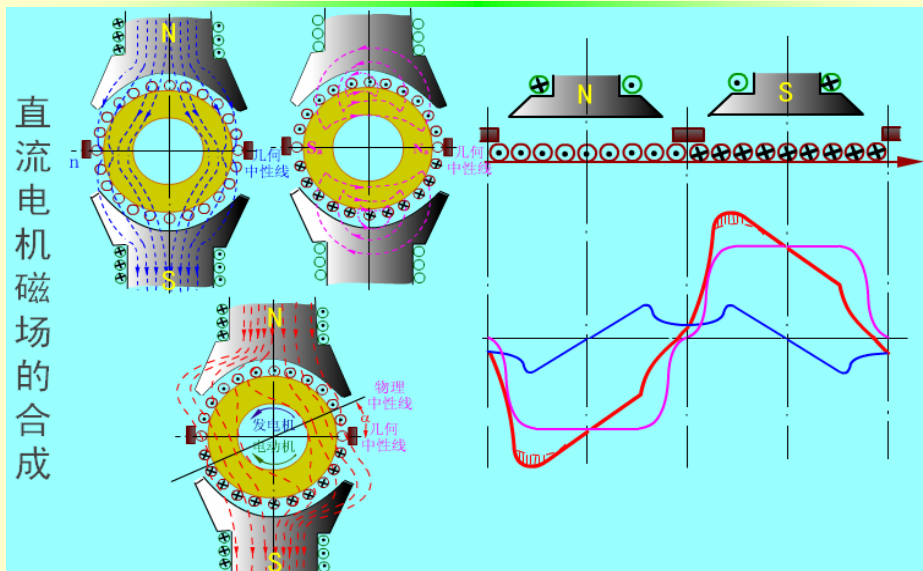
## 上节课复习

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



## 上节课复习



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

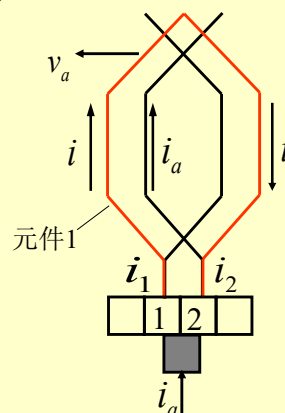
直流电机某一个元件被电刷短路，从一条支路换到另一条支路，元件的电流方向因此改变，即换向。

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。



## 原理与结构部分小结

直流电机原理与结构部分学习要求：

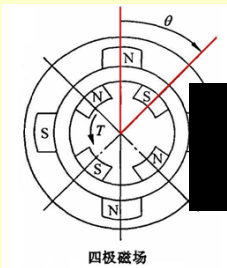
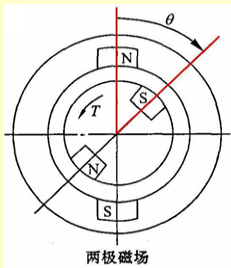
1. **掌握**直流电机工作原理。
2. **熟悉**直流电机的结构组成。
3. **了解**直流电机中的铁磁/永磁材料基本特点，**了解**直流电机运行中磁场和换向的基本特点。



# 电机概述

## 电机通用原理

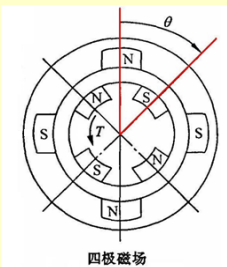
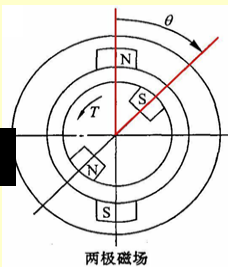
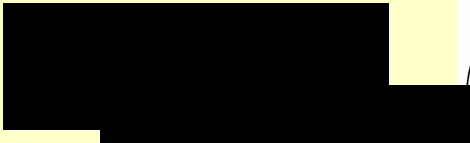
所有类型电机的驱动，都可以把定子和转子看成是两个相同极数的永磁体/磁钢相互作用。



# 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°。



# 目 录

## 直流电机基本关系式

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

### 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:

$$\begin{aligned}
 e &= \sum B_{\delta} l v = \frac{N}{2a} B_{\delta} l v \\
 &= \frac{N}{2a} B_{\delta} l r \Omega = \frac{N}{2a} B_{\delta} \frac{2\pi r l}{2p} \Omega \frac{2p}{2\pi} \\
 &= \frac{N}{2a} \phi \Omega \frac{2p}{2\pi} = \frac{pN}{2\pi a} \phi \Omega \\
 &= K_e \Omega
 \end{aligned}$$

电枢切割线速度:  $v = \Omega r = n \frac{2\pi}{60} r$   
 $\Omega$ -rad/s;  $n$ -rpm(每分钟转数)  
 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:

$$\begin{aligned}
 T_e &= \sum B_{\delta} i_a l r = \frac{N}{2a} B_{\delta} i_a l r \\
 &= \frac{N}{2a} B_{\delta} \frac{2\pi r l}{2p} i_a \frac{2p}{2\pi} \\
 &= \frac{N}{2a} \phi i_a \frac{2p}{2\pi} = \frac{pN}{2\pi a} \phi i_a \\
 &= K_t i_a
 \end{aligned}$$

电枢总电流:  $i_a = 2a i_1$   
 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

**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



## 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。

$$\text{反电势： } e = K_e \Omega$$

$$\text{电磁力矩： } T_{em} = K_e I$$

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

电：

施加电压  $u$

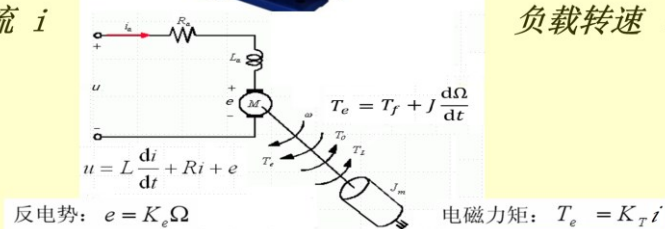
驱动电流  $i$



机：

输出力矩  $T_e$

负载转速  $\Omega$



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:  
 $P_N = U_N I_N \eta$  ( $\eta$ : 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 $\Delta P_{aCu}$ , 及 $\Delta P_O$ ;

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



## 1.直流电机基本关系式

(2) 额定转矩

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

(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

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

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

