

# 电机与拖动基础

南开大学

人工智能学院

自动化与智能科学系

段 峰

教授 博导



回顾

---

# 电 磁 力

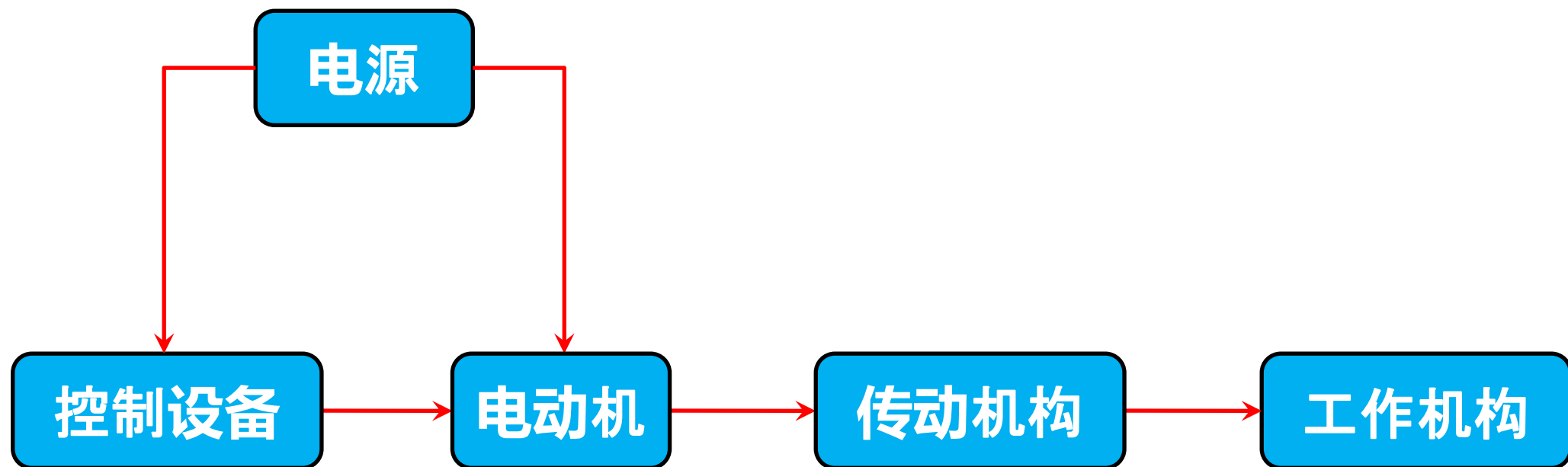


## 第二章 电力拖动系统动力学

- **电机：** 能量转化的装置
  - 发电机： 机械能转化为电能
  - 电动机： 电能转化为机械能
- **变压器：** 电能传递的装置（广义下的电机）
  - 作用是变电压、变电流、变相位等
- **拖动：** 电机与生产机械结合的运动特性

# 电力拖动系统动力学

## ■ 电力拖动系统的组成与结构

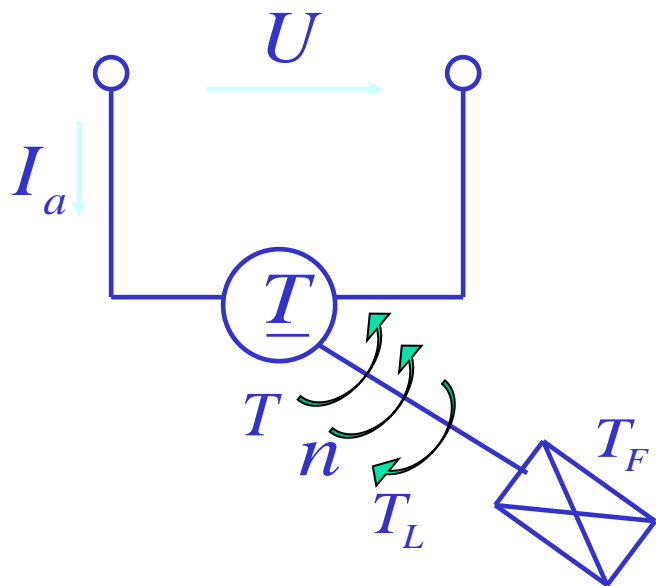
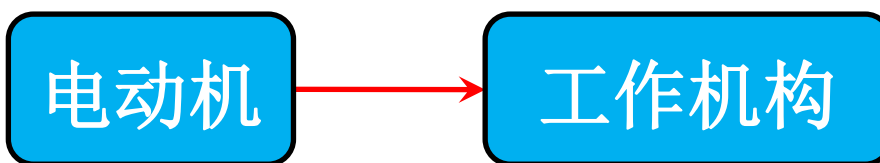


# 电力拖动系统动力学



# 第一节 单轴旋转系统的运动方程

## ■ 单轴电力拖动系统的组成



$$T_L = T_0 + T_F$$

- |       |           |
|-------|-----------|
| $T$   | ——电磁转矩    |
| $T_L$ | ——负载转矩    |
| $T_0$ | ——空载转矩    |
| $T_F$ | ——负载本身的转矩 |

# 第一节 单轴旋转系统的运动方程

## ■ 单轴电力拖动系统转动方程式

$$T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt}$$

$J$  ——转动惯量

$\Omega$  ——角速度

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60}$$

$$J = mr^2 = m \frac{D^2}{4} = \frac{G}{g} \frac{D^2}{4}$$

$m$  ——转动部分质量

$r$  ——转动惯量半径

$$\boxed{T - T_L} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

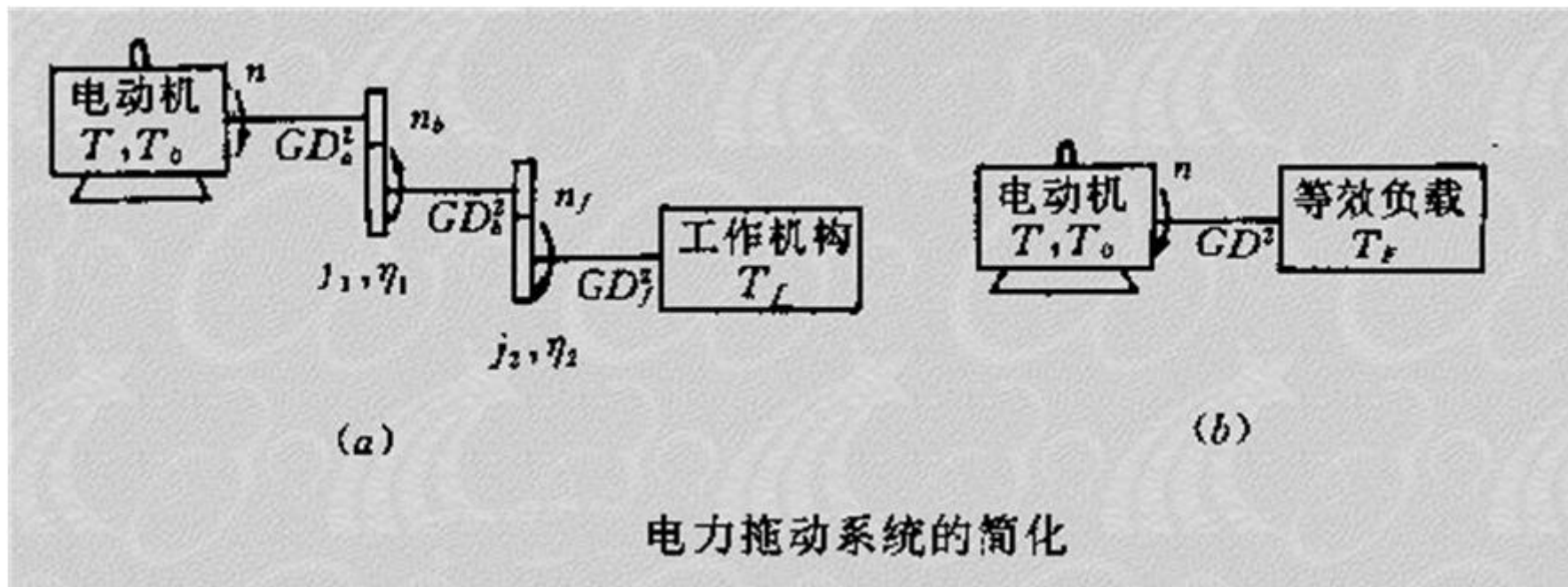
动转矩

$G$  ——转动部件的重量

$D$  ——转动惯性直径

$n$  ——转速

## 第二节 多轴系统的运动方程



速比  $j = \frac{n}{n_f}$





## 第二节 多轴系统的运动方程

# 电 磁 力

- (1) 转矩按速比的反比折算  
(折算前后**功率**不变)
- (2) 飞轮矩按速比平方的反比折算  
(折算前后**动能**不变)

## 第二节 多轴系统的运动方程

- 转矩按速比的反比折算（折算前后功率不变）

无机械损耗

$$T_F \Omega = T_f \Omega_f$$

$$T_F = \frac{T_f \Omega_f}{\Omega} = \frac{T_f n_f}{n} = \frac{T_f}{j}$$

有机械损耗

$$T_F \Omega \eta = T_f \Omega_f$$

$$T_F = \frac{T_f}{j \eta}$$

## 第二节 多轴系统的运动方程

- 飞轮矩按速比平方的反比折算（折算前后动能不变）

$$\frac{1}{2} J \Omega^2 = \frac{1}{2} \frac{GD_F^2}{4g} \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{GD_f^2}{4g} \left( \frac{2\pi n_f}{60} \right)^2$$

工作轴的飞轮矩

$$GD_F^2 = \frac{GD_f^2}{j^2}$$

系统总的飞轮矩

$$GD^2 = GD_a^2 + \frac{GD_b^2}{j_1^2} + \frac{GD_c^2}{(j_1 j_2)^2} + \cdots + \frac{GD_f^2}{j^2}$$

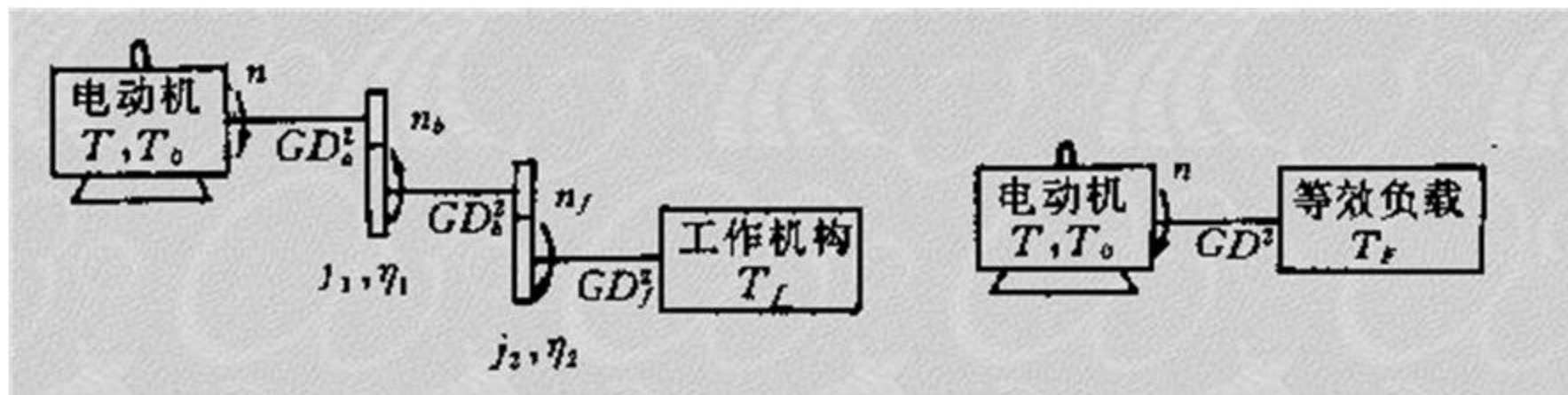
可以用  $\delta$  来简化

$$GD^2 = (1 + \sigma) GD_D^2 \quad GD_D^2 \text{ 是电动机转子的飞轮矩}$$

## 第二节 多轴系统的运动方程

如图所示的电力拖动系统中，已知飞轮矩  $GD_a^2=14.5 \text{ N}\cdot\text{m}^2$ ， $GD_b^2=18.8 \text{ N}\cdot\text{m}^2$ ， $GD_f^2=120 \text{ N}\cdot\text{m}^2$ ，传动效率  $\eta_1=0.91$ ， $\eta_2=0.93$ ，转矩  $T_f=85 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，转速  $n=2450/\text{min}$ ， $n_b=810 \text{ r/min}$ ， $n_f=150 \text{ r/min}$ ，忽略电动机空载转矩，求：

- (1) 折算到电动机轴上的系统总飞轮矩  $GD^2$ ；
- (2) 折算到电动机轴上的负载转矩  $T_F$ 。



## 第二节 多轴系统的运动方程

(1) 系统总飞轮矩

$$\begin{aligned}GD^2 &= GD_a^2 + \frac{GD_b^2}{\left(\frac{n}{n_b}\right)^2} + \frac{GD_f^2}{\left(\frac{n}{n_f}\right)^2} \\&= 14.5 + \frac{18.8}{\left(\frac{2450}{810}\right)^2} + \frac{120}{\left(\frac{2450}{150}\right)^2} \\&= 14.5 + 2.05 + 0.45 = 17[\text{N} \cdot \text{m}^2]\end{aligned}$$

(2) 折算到电动机轴上的负载转矩

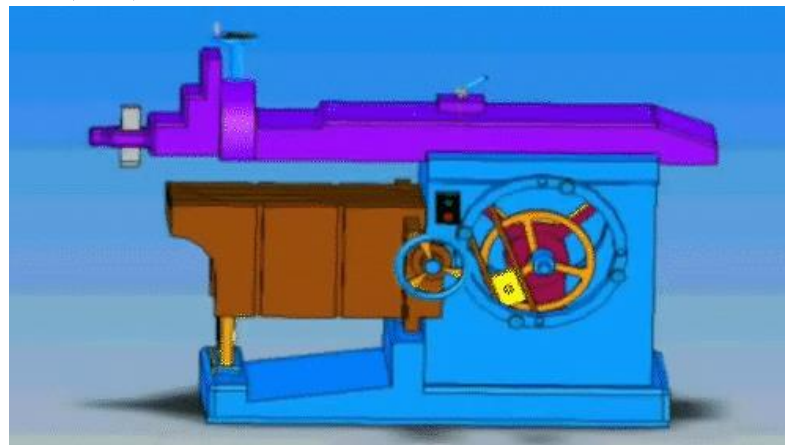
$$T_F = \frac{T_f}{\frac{n}{n_f} \eta_1 \eta_2} = \frac{85}{\frac{2450}{150} \times 0.91 \times 0.93} = 6.15[\text{N} \cdot \text{m}]$$

## 第二节 多轴系统的运动方程

### ■ 平移系统的折算（转矩、飞轮矩）



牛头刨



牛头刨原理

### ■ 垂直系统的折算（转矩、飞轮矩）



卷扬机

## 第二节 多轴系统的运动方程

### ■ 平移系统的转矩折算

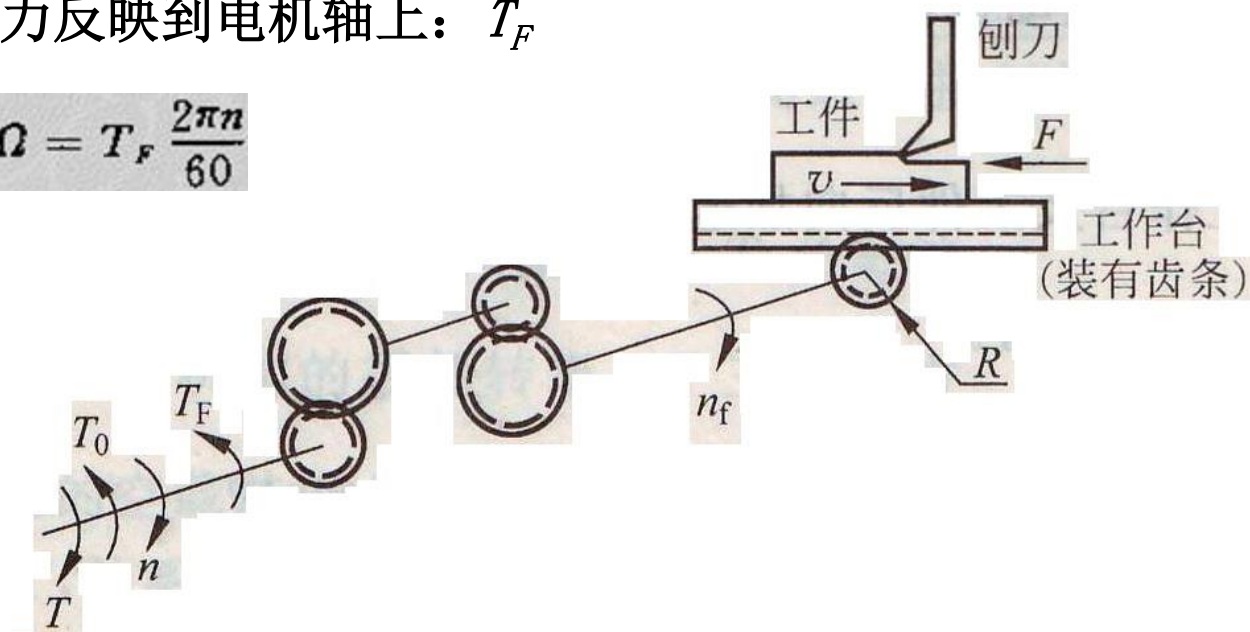
切削功率：  $P=Fv$       切削力反映到电机轴上：  $T_F$

切削功率反映到电机轴上：  $T_F \Omega = T_F \frac{2\pi n}{60}$

若不考虑传动系统的传动损耗，  
根据功率不变的原则，有

$$Fv = T_F \frac{2\pi n}{60}$$

$$T_F = \frac{Fv}{\frac{2\pi n}{60}} = 9.55 \frac{Fv}{n}$$



牛头刨示意图

若考虑传动系统的传动损耗，则

$$T_F = 9.55 \frac{Fv}{n\eta}$$

## 第二节 多轴系统的运动方程

### ■ 平移系统的飞轮矩折算

做平移运动部分的物体总重为 $G_f=m_fg$ ，其动能为

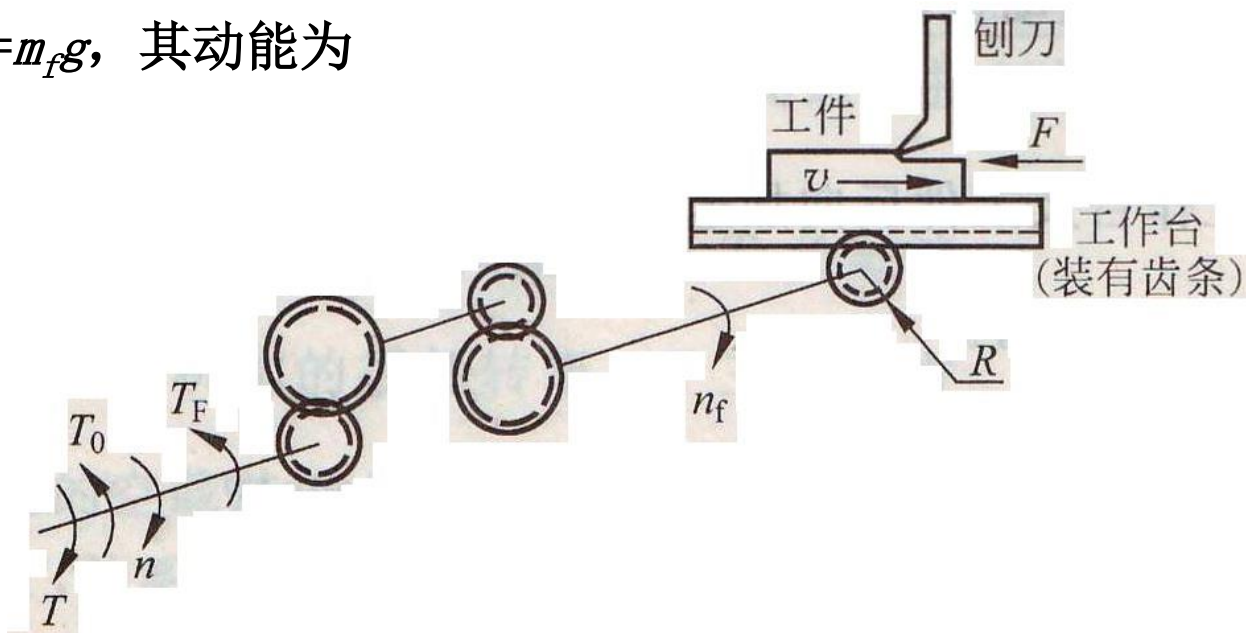
$$\frac{1}{2}m_f v^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{G_f}{g} v^2$$

折算到电动机轴上后的动能为

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{GD_F^2}{4g} \cdot \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

折算前后的动能不变，因此

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot \frac{G_f}{g} v^2 &= \frac{1}{2} \cdot \frac{GD_F^2}{4g} \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2 \\ GD_F^2 &= 4 \frac{G_f v^2}{\left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2} = 365 \frac{G_f v^2}{n^2} \end{aligned}$$

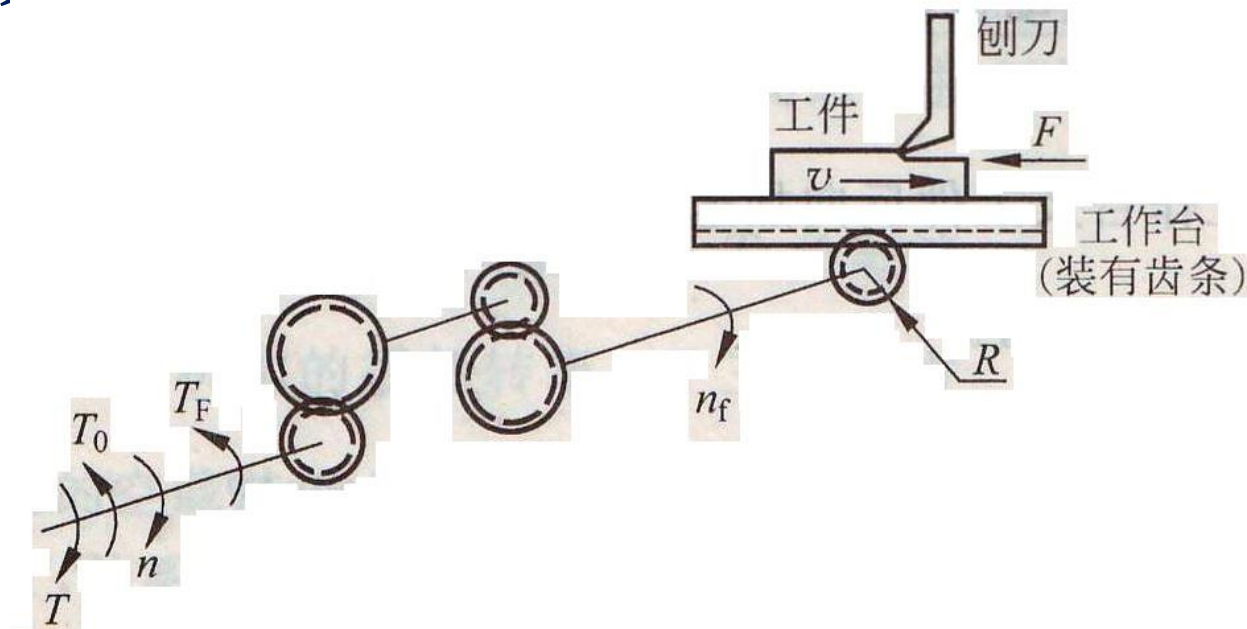


牛头刨示意图



## 第二节 多轴系统的运动方程

### ■ 平移系统的折算-例题2-2



如图所示刨床电力拖动系统，已知切削力  $F=10000\text{N}$ ，工作台与工件运动速度  $v=0.7\text{m/s}$ ，传动机构总效率  $\eta=0.81$ ，电动机转速  $n=1450\text{r/min}$ ，电动机的飞轮矩  $GD_D^2=100\text{N}\cdot\text{m}^2$ 。求：

- (1) 切削时折算到电动机转轴上的负载转矩；
- (2) 估算系统的总飞轮矩；
- (3) 不切削时，工作台及工件反向加速，电动机以  $dn/dt=500\text{r}/(\text{min}\cdot\text{s})$  恒加速度运行，计算此时系统的动转矩绝对值。

## 第二节 多轴系统的运动方程

### ■ 平移系统的折算-例题2-2

解:

(1) 切削功率为

$$P = Fv = 10000 \times 0.7 = 7000[\text{W}]$$

折算后的负载转矩

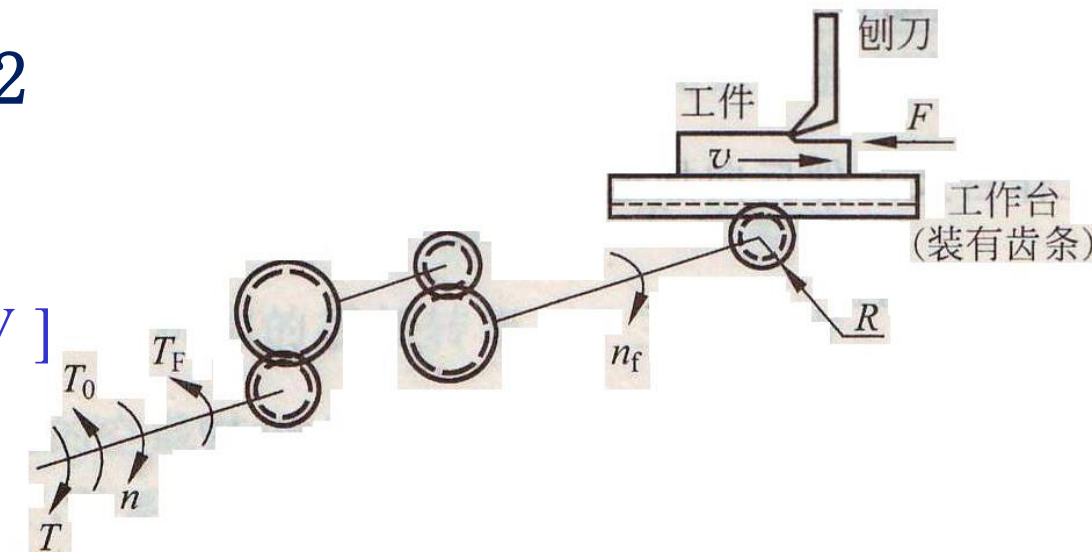
$$T_F = 9.55 \frac{Fv}{n\eta} = 9.55 \times \frac{7000}{1450 \times 0.81} = 56.92[\text{N} \cdot \text{m}]$$

(2) 估算系统总的飞轮矩

$$GD^2 \approx 1.2GD_D^2 = 1.2 \times 100 = 120[\text{N} \cdot \text{m}^2]$$

(3) 不切削时, 工作台与工件反向加速时, 系统动转矩绝对值

$$T' = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{120}{375} \times 500 = 160[\text{N} \cdot \text{m}]$$



## 第二节 多轴系统的运动方程

### ■ 垂直系统的折算-负载转矩折算

提升重物

无机械损耗

$$T_F = \frac{GR}{j}$$

有机械损耗

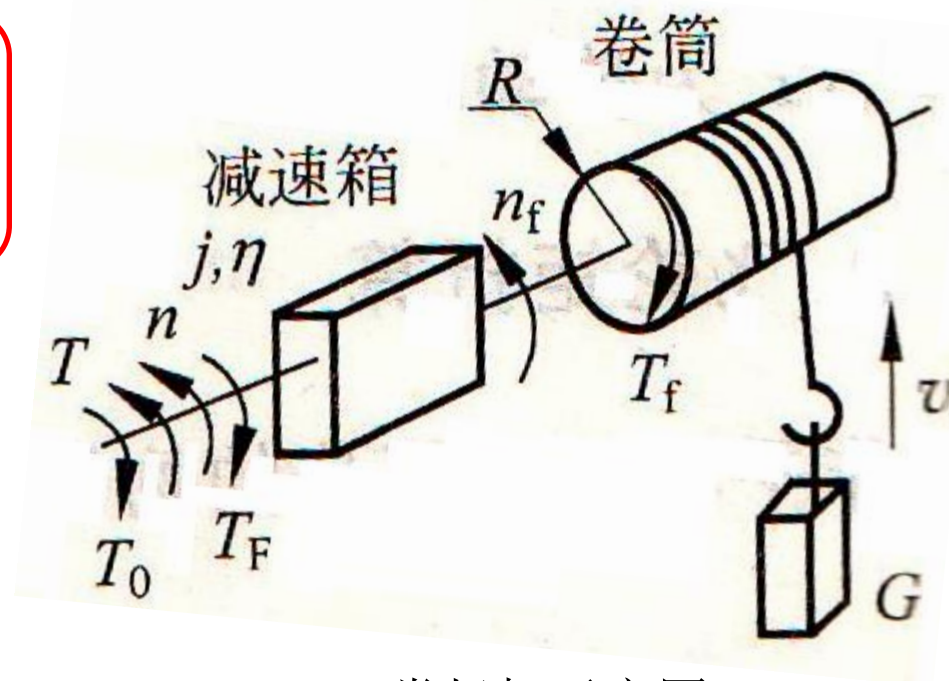
$$T_F = \frac{GR}{j\eta}$$

传动机构损耗转矩

$$\Delta T = \frac{GR}{j\eta} - \frac{GR}{j}$$

下放重物

$$T_F = \frac{GR}{j} - \Delta T$$



卷扬机示意图

若考虑传动系统的传动损耗，折算到电动机轴上的负载转矩为

$$T_F = \frac{GR}{j} - \Delta T = \frac{GR}{j} - \left( \frac{GR}{j\eta} - \frac{GR}{j} \right) = \frac{GR}{j} \left( 2 - \frac{1}{\eta} \right) = \frac{GR}{j} \eta$$

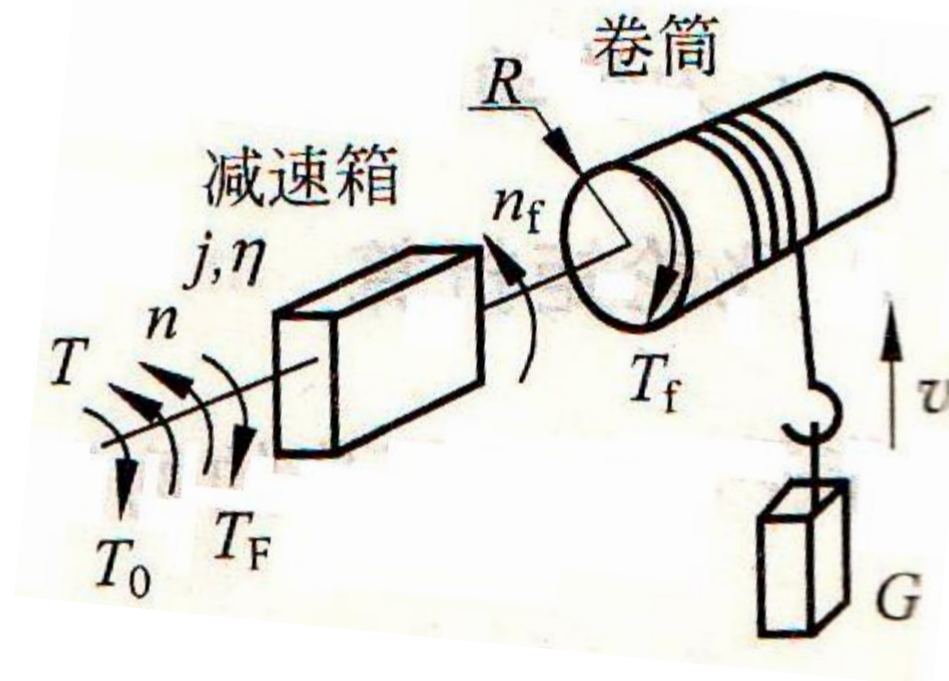
## 第二节 多轴系统的运动方程

### ■ 垂直系统的折算-负载飞轮矩折算

与平移运动时相同

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{G_f}{g} v^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{GD_F^2}{4g} \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2$$
$$GD_F^2 = 4 \frac{G_f v^2}{\left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2} = 365 \frac{G_f v^2}{n^2}$$

注意是**定滑轮**还是**动滑轮**



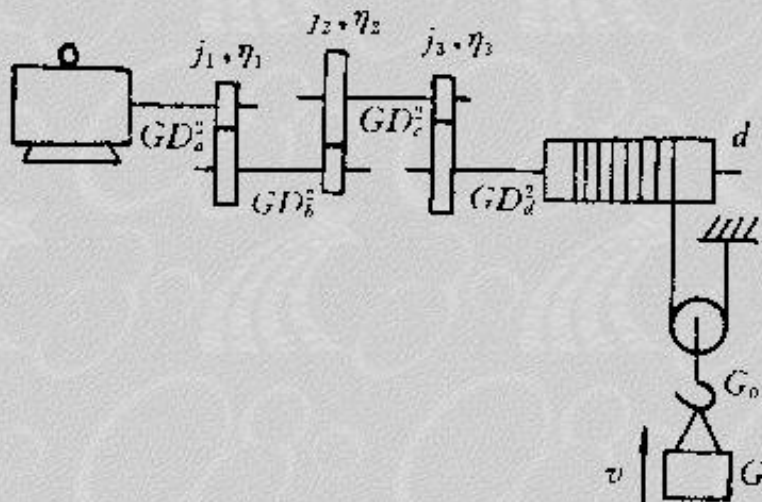
卷扬机示意图

## 第二节 多轴系统的运动方程

### ■ 垂直系统的折算-例题2-4

某起重机的电力拖动系统如图所示。电动机 $P_N=20$  kW,  $n_N=950$  r/min, 传动机构的速比 $j_1=3$ ,  $j_2=3.5$ ,  $j_3=4$ , 各级齿轮传动效率都是 $\eta=0.95$ , 各转轴上的飞轮矩 $GD_a^2=123$  N·m<sup>2</sup>,  $GD_b^2=49$  N·m<sup>2</sup>,  $GD_c^2=40$  N·m<sup>2</sup>,  $GD_d^2=465$  N·m<sup>2</sup>, 卷筒直径 $d=0.6$  m, 吊钩重 $G_0=1962$  N, 被吊重物 $G=49050$  N, 忽略电动机空载转矩, 忽略钢丝绳重量, 忽略滑轮传递的损耗, 求:

- (1) 以速度 $v=0.3$  m/s提升重物时, 负载(重物及吊钩)转矩、卷筒转速、电动机输出转矩及电动机转速;
- (2) 负载及系统的飞轮矩(折算到电动机轴上);
- (3) 以加速度 $a=0.1$  m/s<sup>2</sup>提升重物时, 电动机输出的转矩。





## 第二节 多轴系统的运动方程

解

(1) 以速度  $v=0.3 \text{ m/s}$  提升重物时, 负载 (重物及吊钩) 转矩

$$T_f = \frac{1}{2}(G_0 + G) \cdot \frac{d}{2} = \frac{1}{2} \times (1962 + 49050) \times \frac{0.6}{2} = 7651.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

卷筒转速

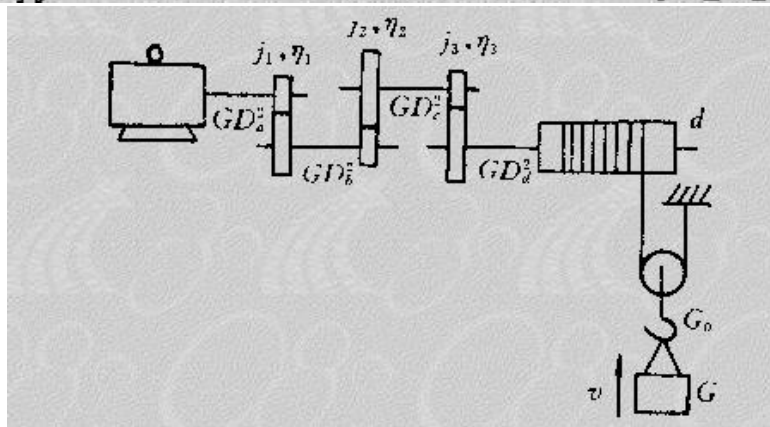
$$n_f = \frac{60(2v)}{\pi d} = \frac{60 \times 2 \times 0.3}{\pi \times 0.6} = 19.1 \text{ r/min}$$

电动机输出转矩

$$T_2 = T_f = \frac{T_f}{j\eta} = \frac{7651.8}{3 \times 3.5 \times 4 \times 0.95^3} = 212.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

电动机转速

$$n = n_f j = 19.1 \times 3 \times 3.5 \times 4 = 802.2 \text{ r/min}$$



## 第二节 多轴系统的运动方程

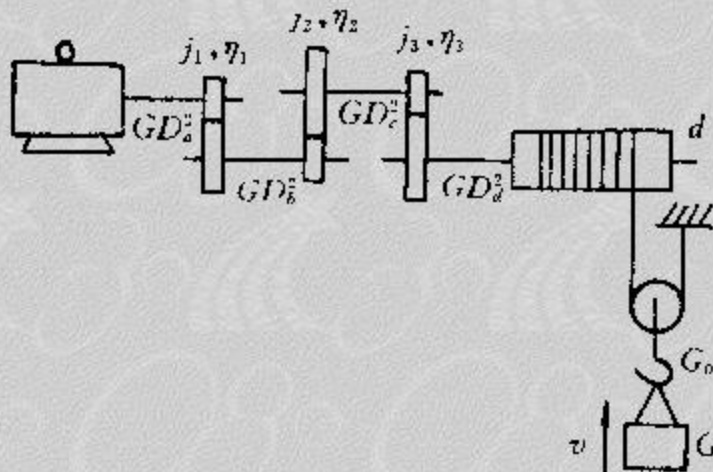
### (2) 负载及系统的飞轮矩

吊钩及重物飞轮矩

$$GD_F^2 = 365 \frac{(G_0 + G)v^2}{n^2} = 365 \times \frac{(1962 + 49050) \times 0.3^2}{802.2^2} \\ = 2.6 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

系统总的飞轮矩

$$GD^2 = GD_a^2 + \frac{GD_b^2}{j_1^2} + \frac{GD_c^2}{(j_1 j_2)^2} + \frac{GD_d^2}{(j_1 j_2 j_3)^2} + GD_F^2 \\ = 123 + \frac{49}{3^2} + \frac{40}{(3 \times 3.5)^2} + \frac{465}{(3 \times 3.5 \times 4)^2} + 2.6 \\ = 131.7 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$



## 第二节 多轴系统的运动方程

(3) 以加速度  $a=0.1 \text{ m/s}^2$  提升重物时, 电动机输出转矩的计算  
电动机转速与重物提升速度的关系为

$$n = n_f j_1 j_2 j_3 = 60 \times \frac{2v}{\pi d} j_1 j_2 j_3$$

电动机加速度与重物提升加速度的关系为

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{d}{dt} \left( \frac{120v}{\pi d} j_1 j_2 j_3 \right) = \frac{120}{\pi d} j_1 j_2 j_3 \frac{dv}{dt} \\ &= \frac{120}{\pi d} j_1 j_2 j_3 a \end{aligned}$$

电动机加速度大小为

$$\frac{dn}{dt} = \frac{120}{\pi \times 0.6} \times 3 \times 3.5 \times 4 \times 0.1 = 267.4 \text{ r/min} \cdot \text{s}$$

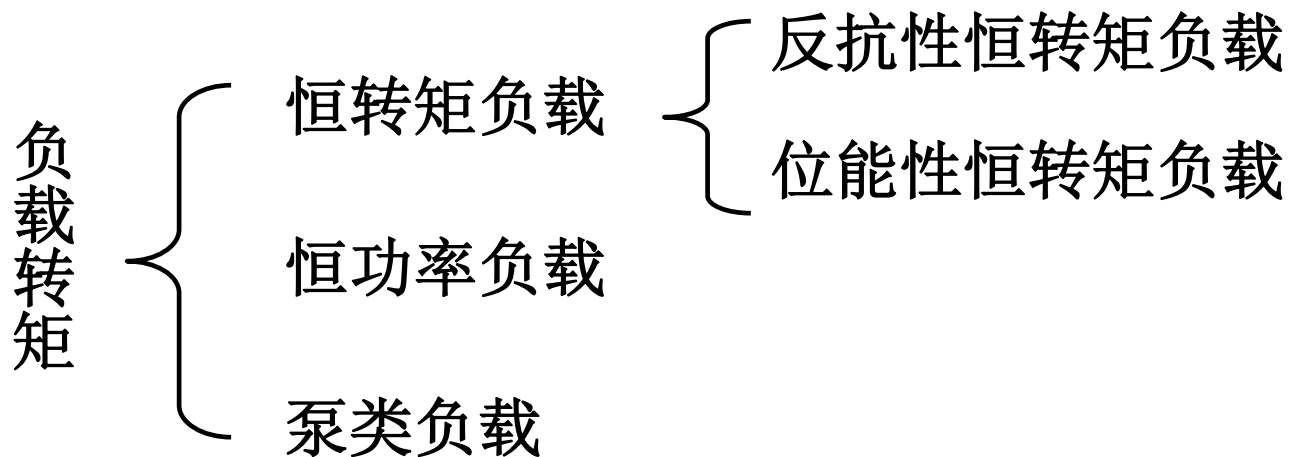
电动机输出转矩为

$$T = T_F + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = 212.5 + \frac{131.7}{375} \times 267.4 = 306.4 \text{ N} \cdot \text{m}$$



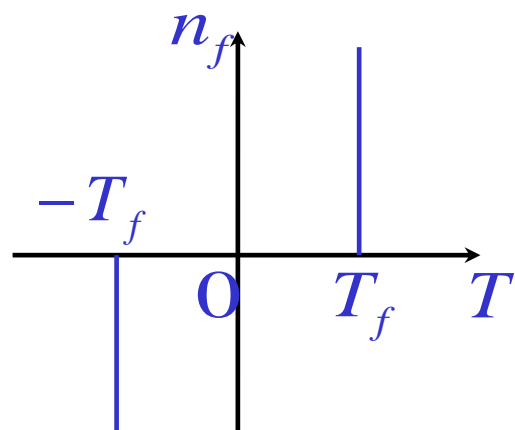
# 第三节 负载转矩特性

## ■ 负载转矩特性——负载转矩与转速之间的关系



# (一) 恒转矩负载的转矩特性

## ■ 反抗性恒转矩负载转矩特性

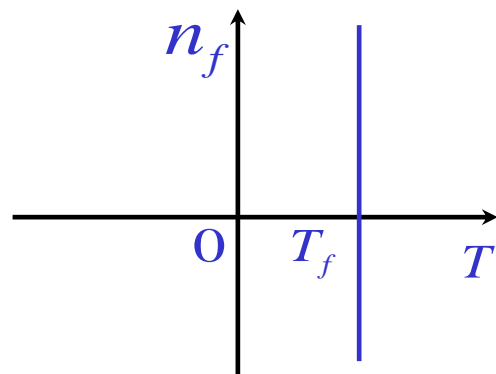


$$n_f < 0, T_f < 0$$

$$n_f > 0, T_f > 0$$

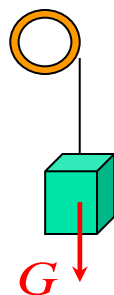
即  $T_f$  永远是阻碍运动的制动性转矩，  
且大小恒定。

## ■ 位能性恒转矩负载转矩特性



$$n_f < 0, T_f > 0 \quad \text{制动性}$$

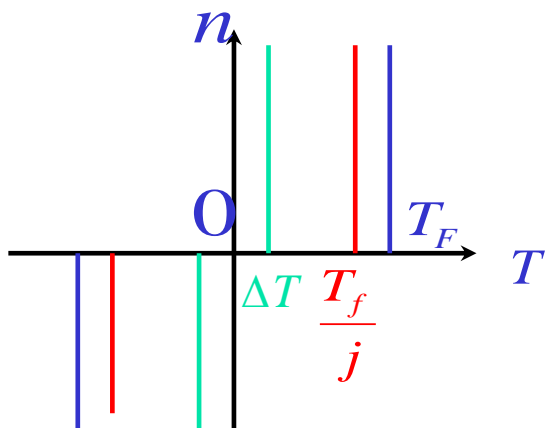
$$n_f > 0, T_f > 0 \quad \text{拖动性}$$



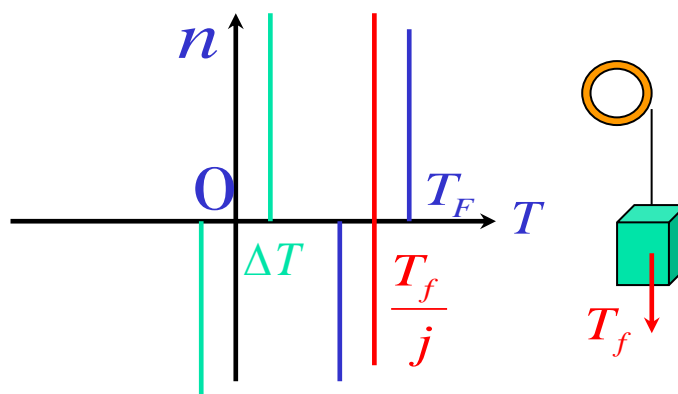
负载转矩大小、方向不变

# (一) 恒转矩负载的转矩特性

如果分别考虑  $T_f$  和  $\Delta T$  时



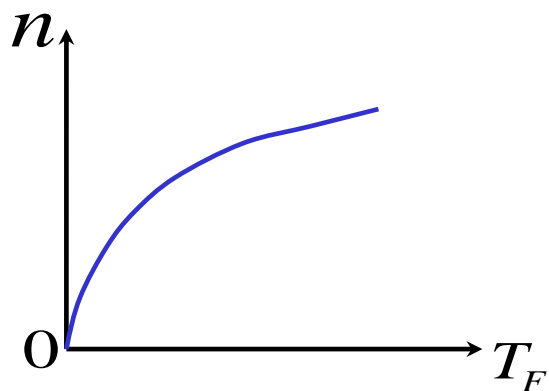
反抗性恒转矩负载



位能性恒转矩负载

## (二) 其他负载的转矩特性

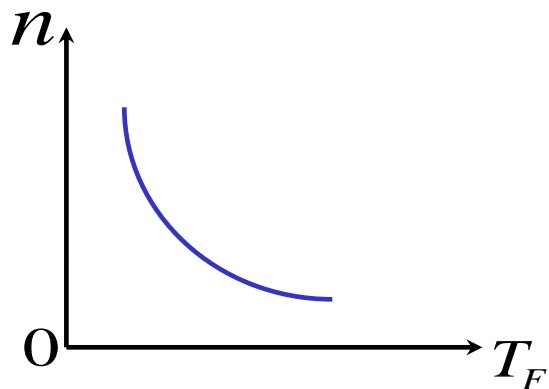
### ■ 泵类负载的转矩特性



转矩的大小与转速的平方成正比

$$T_F \propto n^2$$

### ■ 恒功率负载的转矩特性



负载的机械功率为常数  
转矩的大小与转速成反比

$$P = T\Omega = \text{常数} \quad T_F \propto \frac{1}{n}$$

## 第四节 电力拖动系统稳定运行的条件

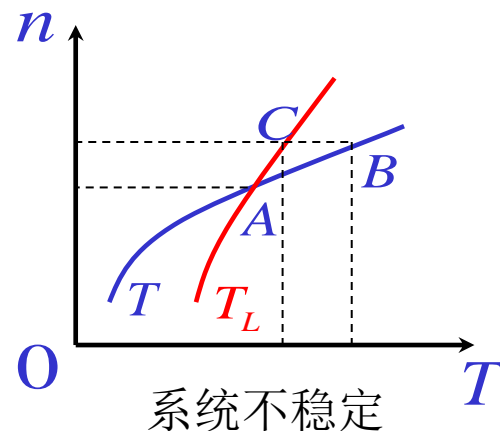
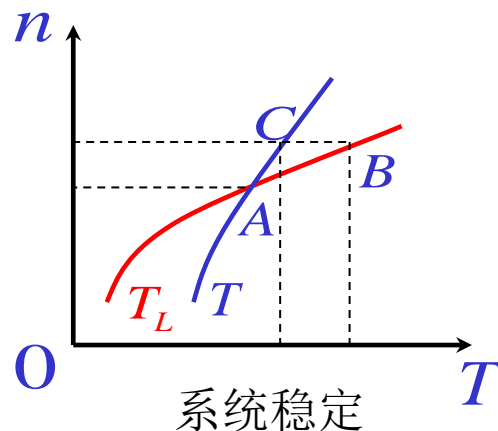
### ■ 电力拖动系统稳定运行的定义

- (1) 稳态时速度不变；
- (2) 受到干扰或系统给定变化时，速度能回复到原来的稳态速度或达到新的稳态速度。

### ■ 电力拖动系统稳定运行的条件

(1) 稳态时  $T = T_L$

(2) 暂态时  $\frac{dT}{dn} < \frac{dT_L}{dn}$





回顾

---

# 电 磁 力



# 第三章 直流电机

## 第一节 直流电机的用途及基本工作原理

### 一、直流电机的用途及特点

#### 1、用途：机械能与直流电能的相互转化

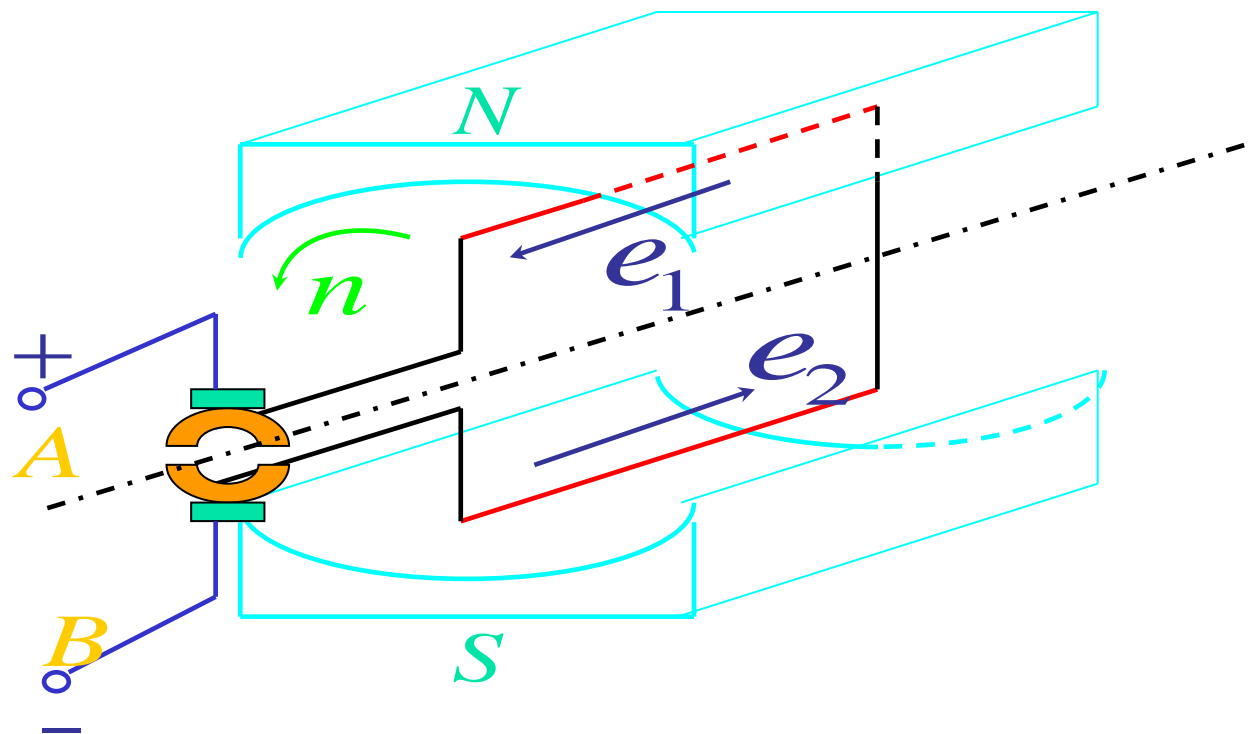
直流发电机：机械能——直流电能

直流电动机：直流电能——机械能

#### 2、特点：优点突出而缺点明显

- (1)调速范围大，易平滑调速
- (2)起、制动转矩大，过载能力强
- (3)易控制，可靠性高
- (4)换向问题，维护问题

## 二、直流发电机物理模型

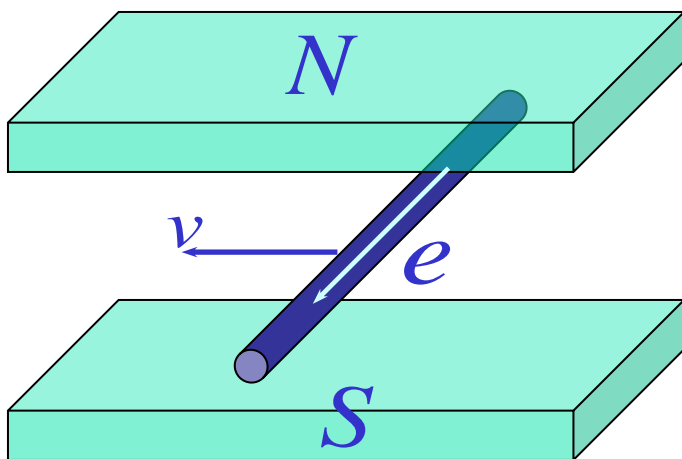




## 二、直流发电机物理模型

### 电磁感应定律

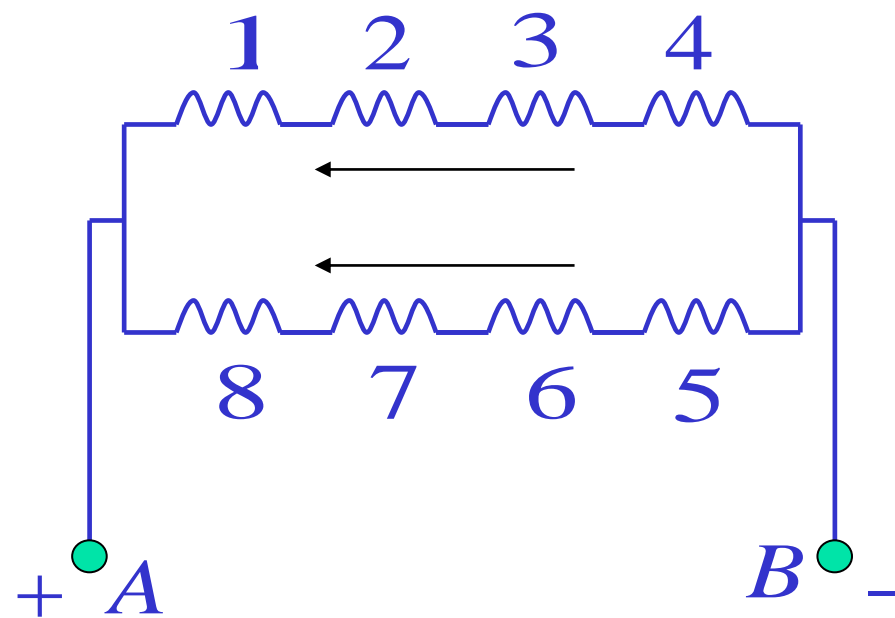
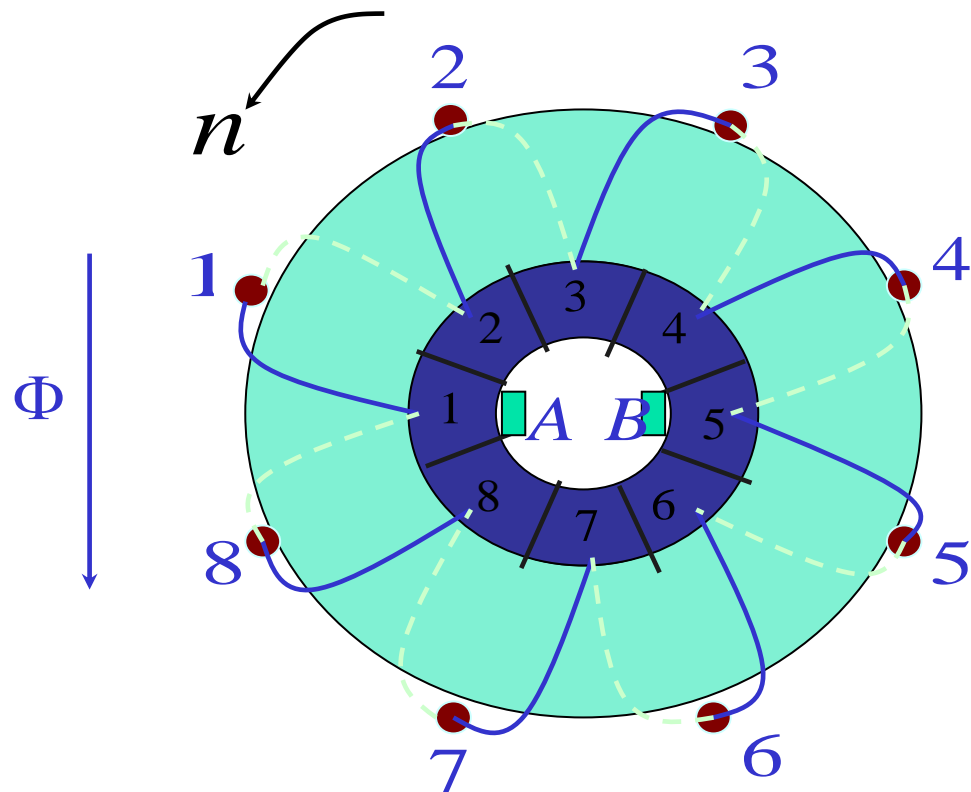
- 切割电动势：导体与磁场有相对运动



$$e = Blv$$

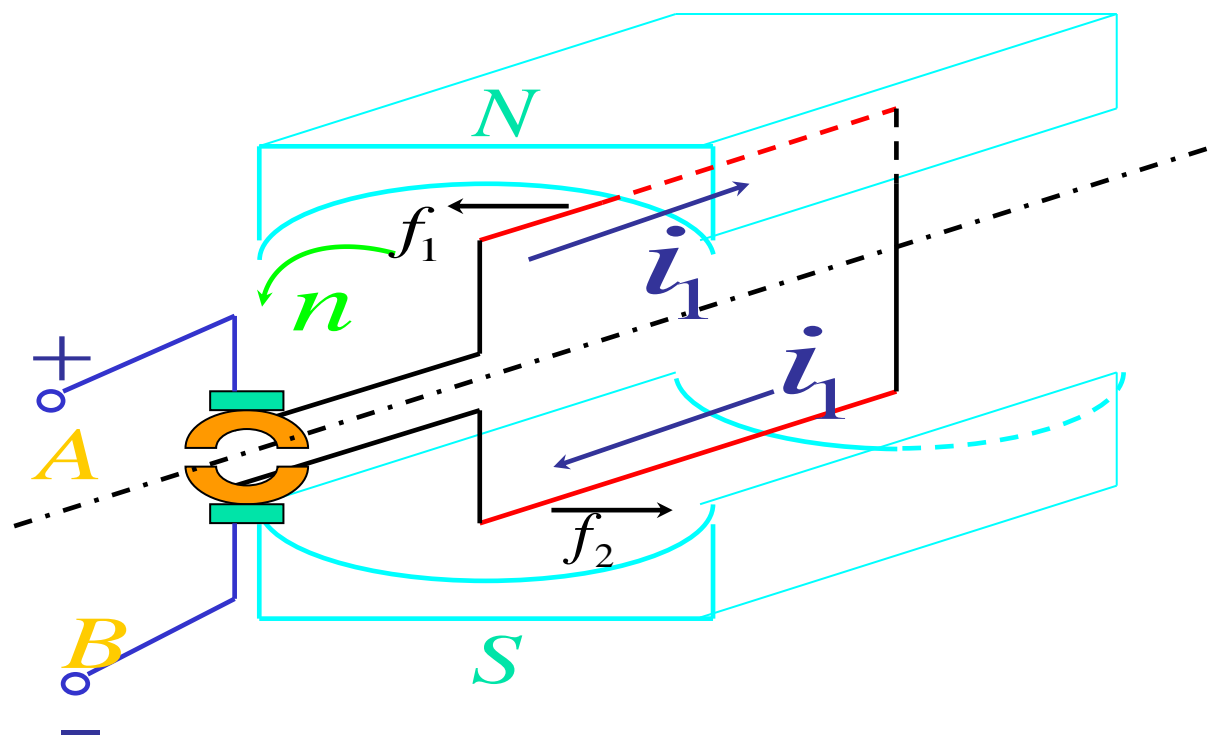
切割电动势的方向与磁场和运动方向的关系遵循右手定则

## 二、直流发电机物理模型



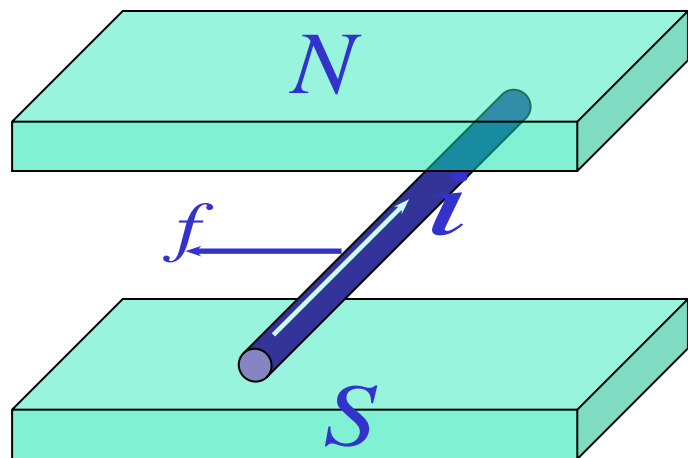
并联支路图

### 三、直流电动机物理模型



### 三、直流电动机物理模型

- 安培力：在磁场中磁场对载流导体施加的力



$$f = Bli$$

安培力的方向与磁场和电流的关系遵循左手定则

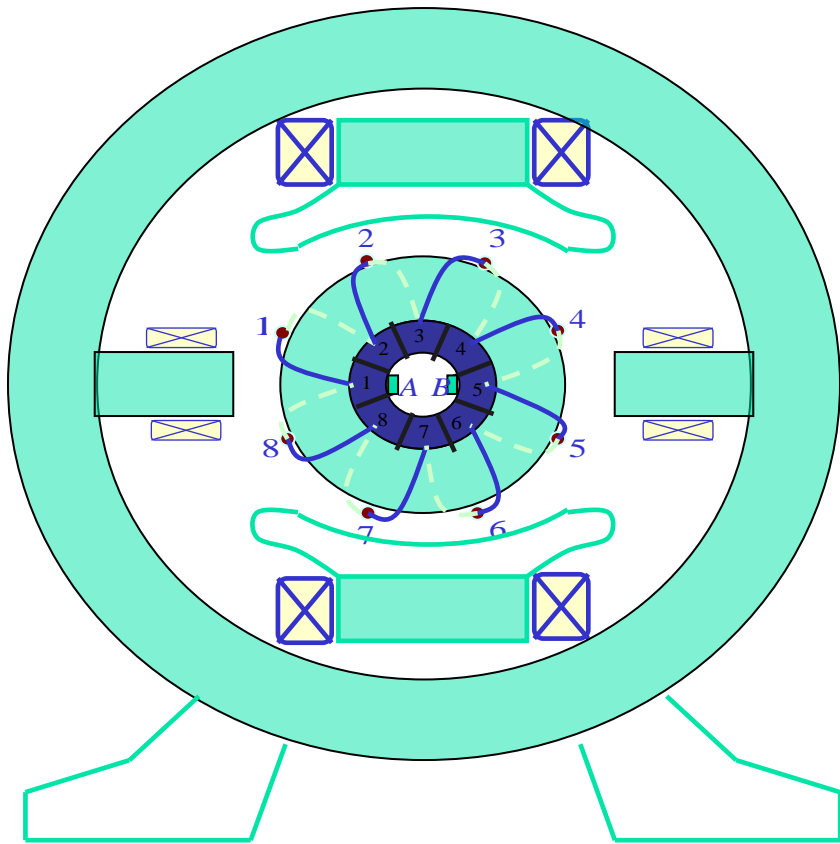


## 四、直流电机的可逆原理

- 直流发电机和直流电动机两者结构完全相同，只是运行条件不同
- 直流电机，适当改变其运行条件即可作为发电机运行，也可作为电动机运行
- 直流电机的运行状态具有可逆性。

# 第二节直流电机的主要结构与铭牌数据

## ■ 直流电机的主要结构



### 1、转子部分

- (1) 轴；
- (2) 电枢铁心；
- (3) 电枢绕组；
- (4) 换向器；
- (5) 风扇等。

### 2、定子部分

- (1) 机座；
- (2) 主磁极；
- (3) 励磁绕组；
- (4) 换向极；
- (5) 电刷装置等。

## 第二节直流电机的主要结构与铭牌数据

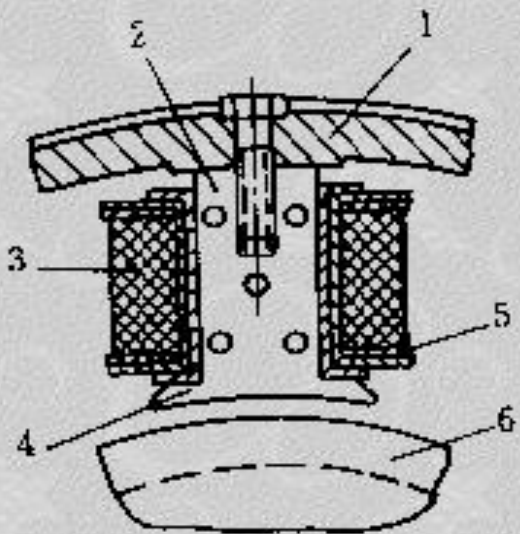


图 3.6 主磁极装置

1——机座；2——极身；3——励磁线圈；  
4——极靴；5——框架；6——电枢；

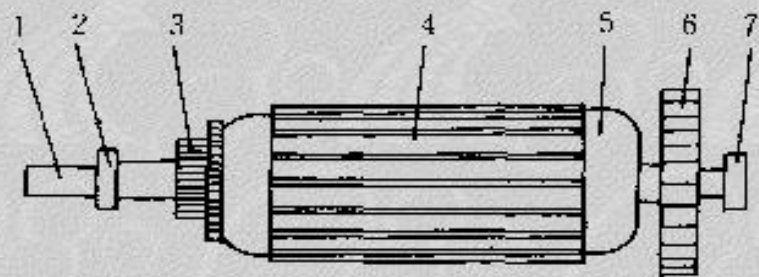


图 3.7 直流电机电枢

1——转轴；2——轴承；3——换向器；4——电枢铁心；  
5——电枢绕组；6——风扇；7——轴承

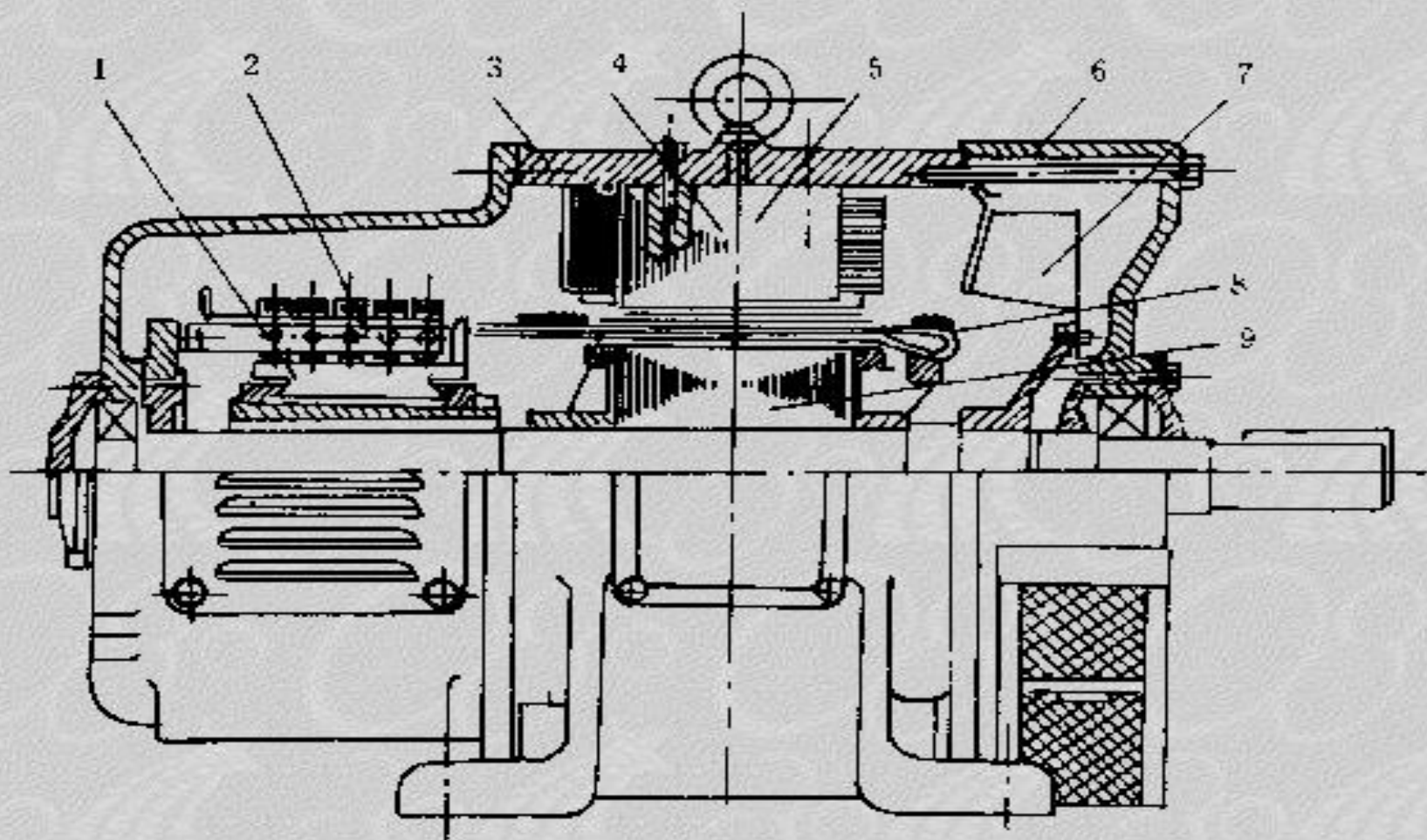


图 3.4 小型直流电机的结构

1——换向器； 2——电刷杆； 3——机座； 4——主磁极； 5——换向极；  
6——端盖； 7——风扇； 8——电枢绕组； 9——电枢铁心



# 第二节直流电机的主要结构与铭牌数据

## 直流电机的铭牌数据

- 额定容量（功率）： $P_N (W, kW)$  对于发电机： $P_N = U_N I_N$
- 额定电压： $U_N (V)$
- 额定电流： $I_N (A)$
- 额定转速： $n_N (r/min)$  对于电动机： $P_N = U_N I_N \eta_N$
- 励磁方式和额定励磁电流： $I_{fN} (A)$
- 额定效率： $\eta_N$   $P_N = T_{2N} \Omega_N = T_{2N} n_N / 9.55$
- 额定转矩： $T_N (N \cdot m)$  额定功率是**W**时，系数为**9.55**；  
额定功率是**kW**时，系数为**9550**
- 额定输出转矩： $T_{2N} (N \cdot m)$

## 第二节直流电机的主要结构与铭牌数据

例题：他励直流电动机  $P_N = 160\text{kW}$   $U_N = 220\text{V}$   $\eta_N = 90\%$

$n_N = 1500\text{ r/min}$  求输入功率  $P_1 = ?$  额定电流  $I_N = ?$  输出转矩

$T_{2N} = ?$

解： 
$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_N} = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{160}{0.9} = 177.8(\text{kW})$$

$$I_N = \frac{P_1}{U_N} = \frac{P_N}{U_N \eta_N} = 808.1(\text{A})$$

$$T_{2N} = 9.55 \frac{P_N}{n_N} = 9.55 \times \frac{160 \times 10^3}{1500} = 1018.7(\text{N} \cdot \text{m})$$



## 四、国产直流电机的主要系列产品

- Z2系列：一般用途的中、小型直流电机
- Z和ZF系列：一般用途的大、中型直流电机系列；Z是直流电动机，ZF是直流发电机
- ZT系列：恒功率且调速范围较大的拖动系统里的广调速直流电动机
- ZZJ系列：冶金辅助拖动机械用的冶金起重直流电动机
- ZQ系列：电力机车、工矿电机车和蓄电池供电电车用的直流牵引电动机
- ZH系列：船舶上各种辅助机械用的船用直流电动机
- ZA系列：用于矿井和有易爆气体场所的防爆安全型直流电动机
- ZU系列：用于龙门刨床的直流电动机
- ZKJ系列：冶金、矿山挖掘机用的直流电动机