



石家莊鐵道大學
SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY

在线开放课程

电力拖动系统动力学基础

多轴电力拖动系统的等效

主讲：常宇健

目录



在线开放课程

- 工作机构旋转运动时转矩与飞轮矩的折算
- 工作机构平移运动时转矩与飞轮矩的折算
- 工作机构做升降运动时转矩与飞轮矩的折算



多轴电力拖动系统组成

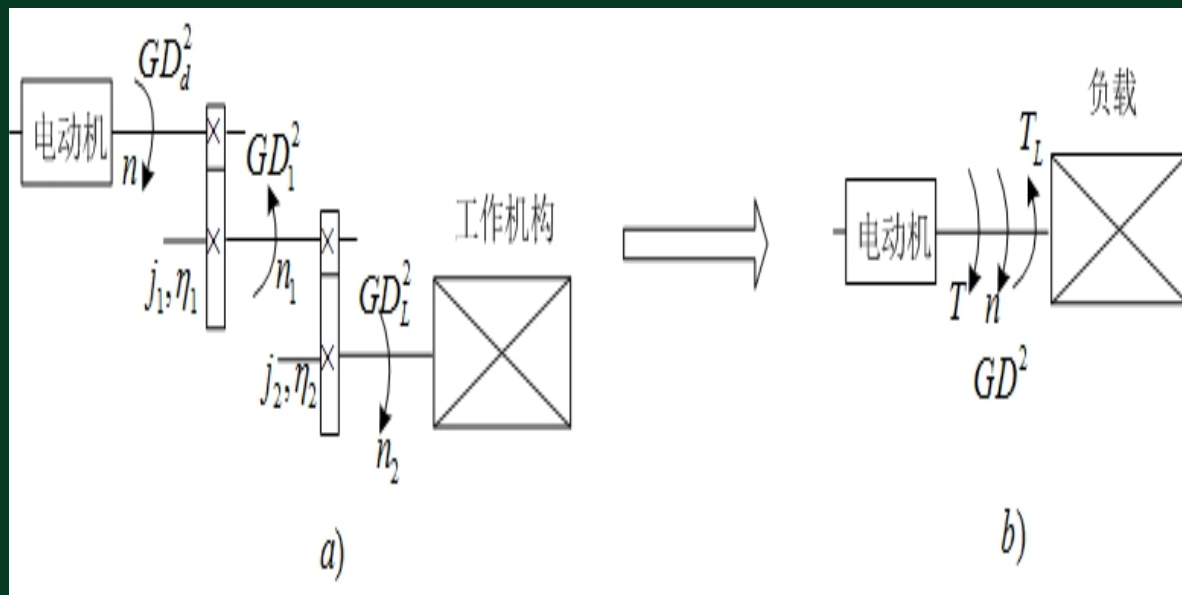


图 多轴电力拖动系统



折算原则

折算原则：折算前后系统所传送的功率及所系统储存的动能不变。

折算包括：负载转矩的折算和飞轮矩的折算

负载转矩的折算是从系统已知的实际负载转矩计算出折算到电动机轴上的等效负载转矩。

飞轮矩的折算是从已知的各传动轴上的飞轮矩计算出折算到电动轴上的总飞轮矩。

由于这两种折算随生产机械工作机构运动形式的不同而不同，下面分三种情况来进行讨论。

1. 工作机构旋转运动时转矩与飞轮矩的折算

(1) 负载转矩的折算

设上图中工作机构的实际负载转矩为 T_L ，转速为相应的角速度 Ω_L ，则工作机构的功率 P_L

$$P_L = T_L \Omega_L$$

设折算到电动机轴上的负载转矩为 T_L' ，电动机轴的转速为 n ，相应的角速度为 Ω ，则折算到电动机轴上的功率为 P_L 为

$$P_L = T_L' \Omega$$

在机械功率的传递过程中，传动机构存在着**功率损耗**，称为**传动损耗**。传动损耗可以用传动机构的效率 η 来描述。

传动损耗到底是由电动机承担还是由生产机械承担，取决于**功率传递的方向**。

若忽略传动机构的功率损耗，按照折算前、后功率不变的原则，于是有

$$P_L = P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = P_6 = P_7 = P_8 = P_9 = P_{10}$$

则折算后的负载转矩 T_L

$$T_L = T_1 \frac{\Omega_1}{\Omega_L} = T_1 \frac{n_1}{n_L} = \frac{T_1}{j}$$

$j = \frac{\Omega_1}{\Omega_L} = \frac{n_1}{n_L}$ ，为传动机构的总转速比。

在多级传动机构中，它等于各级传动轴转速比的乘积，即

$$j = j_1 \cdot j_2 \cdot j_n$$

当电动机工作在**电动状态**时：

功率传递方向是从**电动机**流向**生产机械**，传动损耗由电动机承担。此时，按照折算前、后传递功率不变的原则，折算后的**负载转矩**为：

$$T_L = \frac{T_L' \Omega_L}{\Omega} = \frac{T_L'}{jn}$$

当电动机工作在**发电制动状态**时：

功率传递方向是由**生产机械**流向**电动机**，此时传动损耗由生产机械承担。按照折算前、后传递功率不变的原则，折算后的**负载转矩**为：

$$T_L = \eta \frac{T_L \Omega}{\Omega} = \eta \frac{T_L}{j}$$

注意： η 为传动机构的总效率。

(2) 飞轮矩的折算



设图中电动机轴上的转动惯量为

 J_1

第二根轴的转动惯量为

 J_2

工作机构转轴的转动惯量为

 J_L

折算到电动机轴上的等效转动惯量为

 J

按照折算前后系统储存动能不变的原则，有：

$$\frac{1}{2} J_1 \omega_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \omega_2^2 + \frac{1}{2} J_L \omega_L^2 = \frac{1}{2} J \omega_1^2$$

所以，折算后的等效转动惯量 J 为

:

$$J = J_1 + \frac{J_2}{i_1^2} + \frac{J_L}{(i_1 i_2)^2}$$

将 $J = \frac{GD^2}{4g}$ 代入上式，可得到等效的单轴飞轮矩 GD^2 为：



在线开放课程

式中，



GD_d^2 是电动机转子的飞轮矩与装在该轴上的齿轮飞轮和；

GD_1^2 为第二根轴上两个齿轮飞轮矩之和；

GD_l^2 为第三根轴上工作机构飞轮矩与该轴齿轮飞轮矩之和。

由此可知，各级飞轮矩折算到电动机轴上时，应除以电动机与该级之间转速比的平方。因此，飞轮矩折算的一般形式为

：



2. 工作机构平移运动时转矩与飞轮矩的折算

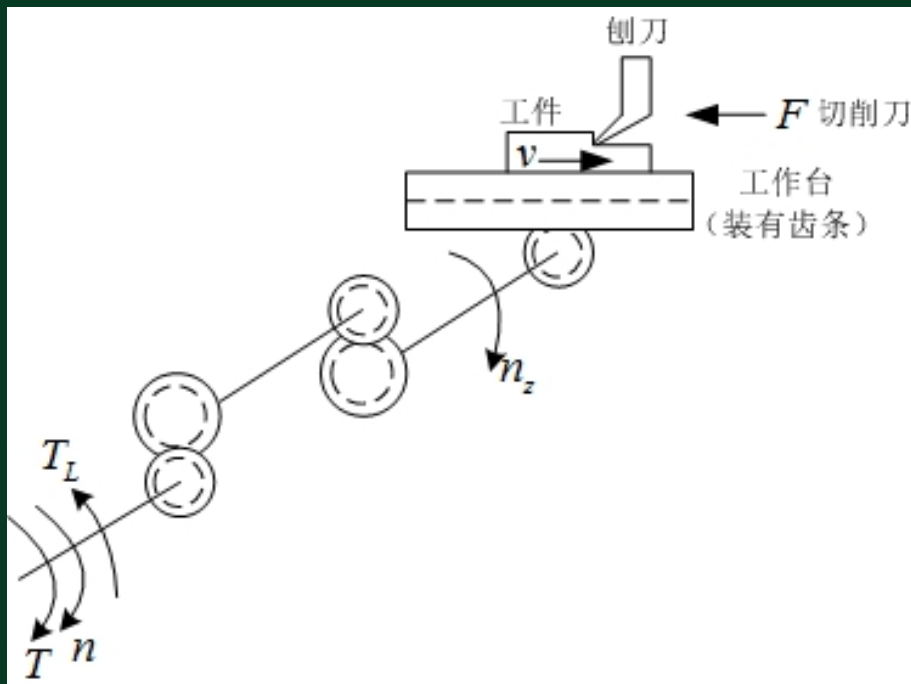


图 龙门刨床传动机构示意图

(1) 负载转矩的折算

设切削时图中工作台与工件的平移速度为 v (单位为 m/s)，工作机构做平移运动时受到的阻力（切削力） F 为 (单位为 N)，则切削功率 (单位为 W) 为

$$P = Fv$$

依据折算前、后功率不变的原则，若不考虑传动损耗，则有：

$$Fv = T_L \Omega$$

当考虑传动损耗时，

$$T_L = \frac{Fv}{\Omega} = \frac{Fv}{\Omega_1 \eta_1} = \frac{Fv}{\Omega_2 \eta_1 \eta_2} = \frac{Fv}{\Omega_n \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n}$$

于是，

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

(2) 飞轮矩的折算

设作平移运动的物体总质量为 m_L ，其重量 $G = m_L g$ ，所产生的动能为

$$\frac{1}{2} m_L v^2 = \frac{1}{2g} G v^2$$

设平移物体折算至电动机轴上的转动惯量为 J_L ，则：

$$\frac{1}{2} m_L v^2 = \frac{1}{2} J_L \Omega^2$$

于是，平移物体折算到电动机轴上的飞轮矩为：

$$\Phi_L = 36 \frac{G v^2}{n^2}$$

3. 工作机构做升降运动时转矩与飞轮矩的折算

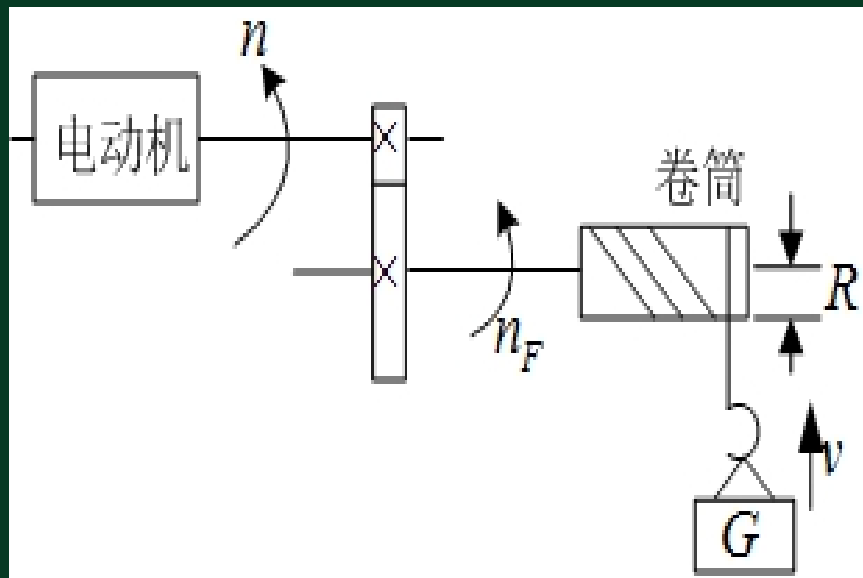


图 起重机电力拖动示意图

(1) 负载转矩的折算

假设重物的重量为 $G=mg$ ，提升重物 and 下放重物时的速度均为 v ，卷筒半径为 R ，总转速比为 j 。

① 提升重物

提升重物时，作用在卷筒轴上的负载转矩为 GR ，若不计传动机构损耗，则折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 为：

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

当考虑传动损耗时，

$$T_L = \frac{GR}{j\eta} = \frac{Gv}{m\eta}$$

② 下放重物

下放重物时，作用在卷筒轴上的负载转矩仍为 GR ，若不计传动机构损耗，则折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 仍为：

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

当考虑传动损耗时，

$$T_L = \frac{GR}{j} \frac{1}{\eta_1 \eta_2 \dots \eta_n} = \frac{GV}{n}$$

③ 提升与下放重物效率关系

当对同一重物提升和下放时，可认为传动机构的**损耗相等**，则

$$\frac{GR}{j\eta} = \frac{GR}{j\eta} \quad \eta_c^{\downarrow} = 2 - \frac{1}{\eta_c^{\uparrow}}$$

$$\eta_c^{\uparrow} = 0.5, \eta_c^{\downarrow} = 0$$

提升：一半功率消耗在传动机构

下放：电机不承担负载转矩

$$\eta_c^{\uparrow} = 0.5, \eta_c^{\downarrow} = 0$$

提升：超过一半功率消耗在传动机构

下放：重力不足以克服损耗

(2) 飞轮矩的折算



在线开放课程

由于升降运动和平移运动都属于直线运动，所以其飞轮矩的折算方法与平移运动相同。



例1-2 由电动机与卷扬机组成的拖动系统如图1-5所示。设重物 $G=5000\text{N}$ ，当电动机的转速为 $n=1000\text{r/min}$ 时，重物的上升速度为 $v=1\text{m/s}$ ，电动机转子的转动惯量为 $J_1=0.01\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ，卷筒直径 $D=0.5\text{m}$ ，卷筒的转动惯量 $J_2=0.01\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ，减速机构的转动惯量和钢绳质量可以忽略不计，传动机构的效率 $\eta=0.95$ 。试求：

(1) 使重物匀速上升时电动机转子轴上的输出转矩；(2) 整个系统折算到电动机轴上的总飞轮矩；(3) 使重物以 1m/s^2 的加速度上升时电动机转子轴上的输出转矩。

解：(1) 当重物匀速上升时，电动机转子轴上的输出转矩与折算到电动机轴上的负载转矩相等。按照功率传递方向，于是有

$$T_2 = T_1 \frac{D_1}{D_2} = 1000 \times \frac{100}{200} = 500 \text{ N}\cdot\text{m}$$

(2) 根据题意，卷筒的转速为

$$n_2 = \frac{D_1}{D_2} n_1 = \frac{100}{200} \times 1440 = 720 \text{ r/min}$$

由于传动机构的总转速比 j 为

$$j = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1000}{720} = 1.384$$

所以折算到电动机转子轴上的总飞轮矩为：

$$\begin{aligned}GD^2 &= GD_a^2 + \frac{GD_f^2}{j^2} + 365 \frac{Gv^2}{n^2} \\ &= 78.4 + \frac{74.48}{13.084^2} + 365 \frac{5000 \times 2^2}{1000^2} \\ &= 86.135 N \cdot m^2\end{aligned}$$

(3) 考虑到电动机的转速与提升重物速度之间的关系

$$n = n_f j = \frac{\omega}{\pi D_f} j$$

于是电动机的加速度与提升重物时的加速度之间的关系为

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\omega}{\pi D_f} j a_L$$

因此，当重物以 1 m/s^2 的加速度上升时电动机转子轴上的输出转矩为：

$$\begin{aligned} T &= T_L + \frac{GD}{375} \frac{dh}{dt} = T_L + \frac{GD}{375} \frac{\omega}{\pi D_f} j\alpha_L \\ &= 100.5 + \frac{86135}{375} \times \frac{\omega}{\pi \times 0.5} \times 13.084 \times 1 \\ &= 215.35 \text{ N}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

小结



在线开放课程

- 折算原则
- 旋转机构折算
- 平移机构折算
- 提升机构折算

