

案例13：收放卷（间歇运转）负载计算和伺服选型

● 条件

1. 牵引辊运转模式：间歇运转，每次起停收放卷前进距离 $L=0.2\text{m}$
2. 每周期 $t=2\text{s}$ ：其中加速时间 $t_a=0.5\text{s}$ ，匀速时间 $t_b=0.5\text{s}$ ，减速时间 $t_d=0.5\text{s}$
3. 牵引辊参数：直径 $D_1=75\text{mm}$ ；长度 $L_1=800\text{mm}$ ；带动一相同尺寸无动力压辊
4. 放卷辊参数：直径 $D_{21}=75\text{mm}$ ；长度 $L_{21}=800\text{mm}$
5. 收卷辊参数：直径 $D_{31}=75\text{mm}$ ；长度 $L_{31}=800\text{mm}$
6. 辊筒材质参数：铝合金；密度 $\rho_A=2.70\times 10^3\text{kg/m}^3$
因辊筒一般不为实心，此例设辊筒材料空间占比为 $\eta_A=50\%$
7. 绕卷材质参数：PE薄膜；密度 $\rho_c=0.93\times 10^3\text{kg/m}^3$ ；宽度 $L_c=700\text{mm}$
因绕卷无法绝对密实，此例设绕卷材料空间占比为 $\eta_c=95\%$
8. 放卷参数：开始放卷时最大卷径 $D_{22}=250\text{mm}$ ；放卷完成时最小卷径 $D_{23}=80\text{mm}$ ；放卷张力 $F_2=15\text{N}$
9. 收卷参数：开始收卷时最小卷径 $D_{32}=80\text{mm}$ ；收卷完成时最大卷径 $D_{33}=180\text{mm}$ ；收卷张力 $F_3=20\text{N}$

● 计算1：牵引伺服减速电机

1. 收放卷机构间歇运转，且有定位要求

牵引伺服减速电机1#为位置模式

收放卷伺服减速电机2#、3#为转矩模式

典型结构如图：

2. 由给定运转模式绘制运动曲线如图：

3. 计算连续最大负载转矩 M_1

1) 牵引辊的摩擦转矩 M_{11}

在需要精度的情况需实地测量，

选型阶段可估值计算，此例估值 $M_{11} = 2\text{N} \cdot \text{m}$

2) 牵引辊两端收放卷张力差值转矩 M_{12}

$$M_{12} = \frac{(F_2 - F_3) \times D_1}{2} = \frac{(15 - 20) \times 0.075}{2} = -0.19\text{N} \cdot \text{m}$$

3) 连续最大负载转矩 M_1

$$M_1 = M_{11} + M_{12} = 2 - 0.19 = 1.81\text{N} \cdot \text{m}$$

4. 最高负载转速 N_1

1) 最高负载移动速度 V_1

根据运动曲线列方程：

$$\frac{t_a \times V_1}{2} + t_c \times V_1 + \frac{t_d \times V_1}{2} = L$$

$$\frac{0.5 \times V_1}{2} + 0.5 \times V_1 + \frac{0.5 \times V_1}{2} = 0.3\text{m}$$

$$V_1 = 0.3\text{m/s} = 18\text{m/min}$$

2) 最高负载转速 N_1

$$N_1 = \frac{V}{\pi \cdot D_1} = \frac{18}{\pi \times 0.075} = 76.4\text{r/min}$$

5. 计算瞬间最大负载转矩 M_{13}

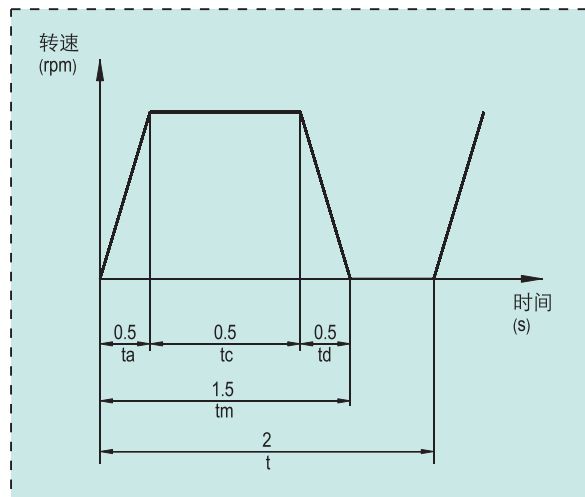
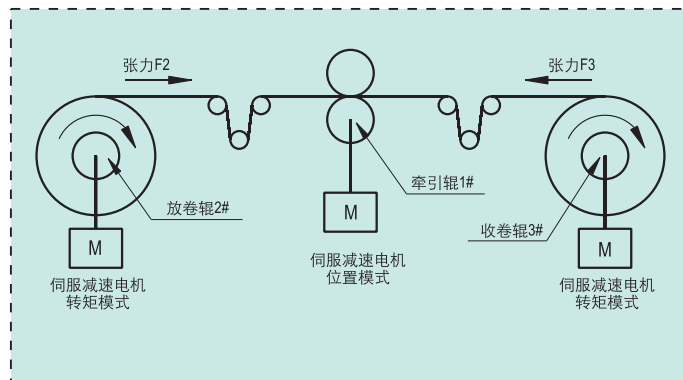
1) 单个牵引辊转动惯量 J_{11}

$$J_{11} = \frac{\pi}{32} \rho_A \cdot L_1 \cdot \eta_A \cdot D_1^4$$

$$= \frac{\pi}{32} \times 2.70 \times 10^3 \times 0.8 \times 0.5 \times 0.075^4 = 3355 \times 10^{-6} \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

2) 换算到减速电机输出轴的负载惯量 J_1

牵引辊带动同尺寸压辊，故 $J_1 = 2 \times J_{11} = 6710 \times 10^{-6} \text{kg} \cdot \text{m}^2$



- 3) 负载加速度转矩 M_{14}

$$M_{14} = J_1 \times \frac{2\pi \times N_1}{60t_a} = 0.00671 \times \frac{2\pi \times 76.4}{60 \times 0.5} = 0.11 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- 4) 瞬间最大负载转矩 M_{13}

$$M_{13} = M_1 + M_{14} = 1.81 + 0.11 = 1.92 \text{ N} \cdot \text{m}$$

6. 根据以下条件选择合适的伺服减速电机

- 1) 伺服减速电机额定转速 $N_{m1} > N_1 = 76.4 \text{ r/min}$
- 2) 伺服减速电机额定转矩 $M_{m1} > M_1 \times 1.5$ 倍安全系数 $= 1.81 \times 1.5 = 2.72 \text{ N} \cdot \text{m}$
- 3) 伺服减速电机瞬间最大转矩 $M_{s1} > M_{13} \times 2$ 倍安全系数 $= 1.92 \times 2 = 3.84 \text{ N} \cdot \text{m}$

根据以上条件，可选200W标准直轴伺服减速电机，速比 $i = 5$ ，型号 **MG60A020Y22HT5**

额定转速 $N_{m1} = 600 \text{ r/min} > 85 \text{ r/min}$

额定转矩 $M_{m1} = 2.9 \text{ N} \cdot \text{m} > 2.72 \text{ N} \cdot \text{m}$

瞬间最大转矩 $M_{s1} = 10.1 \text{ N} \cdot \text{m} > 3.84 \text{ N} \cdot \text{m}$

伺服减速电机输出轴型式为标准直轴式，通过伺服联轴器连接牵引辊，安装方便
本案例安装合理时电机轴不受径向力和轴向力，故无需验算径向负载与轴向负载

7. 验算惯量比JR

所选电机转子惯量 $J_{m1} = 25 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

换算到伺服减速电机输出轴的负载惯量 J_1

$$JR = \frac{J_1}{J_{m1} \times i^2} = \frac{6710 \times 10^{-6}}{25 \times 10^{-6} \times 5^2} = 10.74 \text{ 倍} < 20 \text{ 倍，满足要求}$$

8. 计算电子齿轮比D

- 1) 伺服电机编码器分辨率 $E = 131072$ 脉冲/圈
- 2) 电气停止精度 $\delta = \pm 0.01 \text{ mm}$ ，机构运动分辨率 $W = 0.01 \text{ mm/脉冲}$

$$D = \frac{F1-09/F1-10}{F1-11/F1-12} = \frac{W \cdot E \cdot i}{P_h} = \frac{0.01 \times 131072 \times 1}{10} = \frac{131072}{1000}$$

F1-09/F1-10：电子齿轮比分子，F1-11/F1-12：电子齿轮比分母，菜单设定范围：1~9999。

- 3) 求得 F1-09 = 13 F1-10 = 1072 F1-11 = 0 F1-12 = 1000
9. 验算PLC或运动控制器高速脉冲最高输出频率能否满足伺服电机最高工作转速要求，若无法满足，需增大机器运动分辨率W，修改电子齿轮比D

- 1) 伺服电机未减速前最高工作转速 N_{11}
- 2) 电机以最高工作转速运转时所需的高速脉冲最高频率 f_1

$$f_1 = \frac{N_{11} \times E}{D} = \frac{6.37 \times 131072 \times 2355}{32768} = 63.4 \text{ kHz}$$

PLC或运动控制器高速脉冲最高输出频率 $f_2 = 100 \text{ kHz}$

$f_1 = 63.4 \text{ kHz} < f_2 = 100 \text{ kHz}$ ，满足要求

● 计算2：放卷伺服减速电机

放卷伺服减速电机2#为转矩模式运行

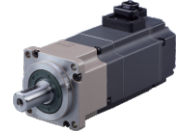
1. 计算连续最大负载转矩 M_2

- 1) 放卷辊的摩擦转矩 M_{21}
在需要精度的情况需实地测量，
选型阶段可估值计算，此例估值 $M_{21} = 0.8 \text{ N} \cdot \text{m}$
- 2) 放卷辊开始放卷时满卷张力转矩 M_{22}

$$M_{22} = \frac{F_2 \times D_{22}}{2} = \frac{-15 \times 0.25}{2} = -1.875 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- 3) 放卷辊放卷完成时空卷张力转矩 M_{23}

$$M_{23} = \frac{F_2 \times D_{23}}{2} = \frac{-15 \times 0.08}{2} = -0.6 \text{ N} \cdot \text{m}$$



伺服减速电机：MG60A020Y22HT5



伺服驱动器：MKA020Y22



编码器线：MXA60E □



动力线：MXA60M □

注意：放卷张力 F_2 方向与电机运行方向一致，即 F_2 作用于减速电机轴的转矩方向为拖动电机旋转，则减速电机需输出反向制动转矩与之平衡。计算时 M_{22} 、 M_{23} 符号取负。

案例13：收放卷（间歇运转）负载计算和伺服选型

- 4) 开始放卷时满卷 $M_{2min} = M_{21} + M_{22} = 0.8 - 1.875 = -1.08 \text{ N} \cdot \text{m}$

放卷完成时空卷 $M_{2max} = M_{21} + M_{23} = 0.8 - 0.6 = 0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$

连续最大反向制动负载转矩 $M_{2min} = 1.08 \text{ N} \cdot \text{m}$

连续最大正向驱动负载转矩 $M_{2max} = 0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$

连续最大负载转矩 $M_2 = 1.08 \text{ N} \cdot \text{m}$

2. 最高负载转速 N_2

最高负载移动速度 $V = 18 \text{ m/min}$

- 1) 开始放卷时满卷最大转速 $N_{21} = \frac{V}{\pi \cdot D_{22}} = \frac{18}{\pi \times 0.25} = 2.9 \text{ r/min}$

- 2) 放卷完成时空卷最大转速 $N_{22} = \frac{V}{\pi \cdot D_{23}} = \frac{18}{\pi \times 0.08} = 71.6 \text{ r/min}$

- 3) 最高负载转速 $N_2 = 71.6 \text{ r/min}$

3. 计算瞬间最大负载转矩

- 1) 放卷辊转动惯量 J_{21}

$$J_{21} = \frac{\pi}{32} \rho_A \cdot L_A \cdot \eta_A \cdot D_{21}^4 = \frac{\pi}{32} \times 2.70 \times 10^3 \times 0.8 \times 0.5 \times 0.075^4 = 3355 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

- 2) 满卷时绕卷材料转动惯量 $J_{22} = \frac{\pi}{32} \rho_c \cdot L_c \cdot \eta_c \cdot (D_{23}^4 - D_{22}^4) = \frac{\pi}{32} \times 0.93 \times 10^3 \times 0.7 \times 0.95 \times (0.25^4 - 0.08^4) = 234686 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

- 3) 满卷时换算到减速电机输出轴的负载惯量 J_2

$$J_2 = J_{21} + J_{22} = (3355 + 234686) \times 10^{-6} = 238041 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

- 4) 忽略辊筒与放卷材料之间纸筒惯量

空卷时 换算到减速电机输出轴的负载惯量 即为放卷辊转动惯量

$$J_{21} = 3355 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

- 5) 满卷时负载加速度转矩 M_{24}

$$M_{24} = J_2 \times \frac{2\pi N_{21}}{60t_a} = 0.238 \times \frac{2\pi \times 22.9}{60 \times 0.5} = 1.14 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- 6) 空卷时负载加速度转矩 M_{25}

$$M_{25} = J_{21} \times \frac{2\pi N_{22}}{60t_a} = 0.00336 \times \frac{2\pi \times 71.6}{60 \times 0.5} = 0.05 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- 7) 满卷时瞬间最大负载转矩 M_{26}

$$M_{26} = M_{2min} + M_{25} = -1.08 + 1.14 = 0.06 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- 8) 空卷时瞬间最大负载转矩 M_{27}

$$M_{27} = M_{2max} + M_{26} = 0.2 + 0.05 = 0.25 \text{ N} \cdot \text{m} > M_{26} = 0.06 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- 9) 瞬间最大负载转矩 $M_{27} = 0.25 \text{ N} \cdot \text{m}$

4. 根据以下条件选择合适的伺服减速电机

- 1) 伺服减速电机额定转速 $N_{m2} > N_2 = 71.6 \text{ r/min}$

- 2) 伺服减速电机额定转矩 $M_{m2} > M_2 \times 1.5 \text{ 倍安全系数} = 1.08 \times 1.5 = 1.62 \text{ N} \cdot \text{m}$

- 3) 伺服减速电机瞬间最大转矩 $M_{s2} > M_{27} \times 2 \text{ 倍安全系数} = 0.25 \times 2 = 0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$

根据以上条件，可选200W标准直轴伺服减速电机，速比 $i_1 = 5$ ，型号 **MG60A020Y22HT5**

额定转速 $N_{m1} = 600 \text{ r/min} > 71.6 \text{ r/min}$

额定转矩 $M_{m1} = 2.9 \times 1.25 = 3.6 \text{ N} \cdot \text{m} > 1.62 \text{ N} \cdot \text{m}$

注意：放卷电机处于被动牵引状态下，油封对电机轴的摩擦阻力此时可作为反向转矩输出。此状态电机额定转矩可按照标称额定转矩的1.25倍进行估算和选型。

瞬间最大转矩 $M_{s1} = 10.1 \text{ N} \cdot \text{m} > 0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$

伺服减速电机输出轴型式为标准直轴式，通过伺服联轴器连接牵引辊，安装方便
本案例安装合理时电机轴不受径向力和轴向力，故无需验算径向负载与轴向负载

即该例放卷过程随着卷径减小，连续负载转矩将逐步加大，由反向制动转为正向驱动

注意：收放卷辊筒质量按材料空间占比 $\eta_A=50\%$ 估算，精确计算需代入实际辊筒质量，用如下公式计算惯量：

$$J = \frac{m \cdot D^2}{4}$$

本例辊筒与放卷材料间纸筒惯量忽略

注意：放卷辊瞬间最大负载转矩为当前卷径下的连续负载转矩和负载加速度转矩之和，连续负载转矩随卷径减小而线性增大，加速度转矩则随卷径减小，惯量减小而减小。

欲确定放卷辊瞬间最大负载转矩应分别计算对比满卷、空卷状态下的值，本案例为放卷完成时空卷状态达到最大。



伺服减速电机：MG60A020Y22HT5

伺服驱动器：MKA020Y22



编码器线：MXA60E □



动力线：MXA60M □

● 计算3：收卷伺服减速电机

收卷伺服减速电机3#为转矩模式运行

1. 计算连续最大负载转矩 M_3

1) 收卷辊的摩擦转矩 M_{31}

在需要精度的情况需实地测量，

选型阶段可估值计算，此例估值 $M_{31} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$

$$2) \text{ 收卷辊开始收卷时空卷张力转矩 } M_{32} = \frac{F_3 \times D_{32}}{2} = \frac{20 \times 0.08}{2} = 0.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$3) \text{ 收卷辊收卷完成时满卷张力转矩 } M_{33} = \frac{F_3 \times D_{33}}{2} = \frac{20 \times 0.18}{2} = 1.8 \text{ N} \cdot \text{m} > M_{32} = 0.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

4) 连续最大负载转矩 M_3 (收卷完成时满卷状态)

$$M_3 = M_{31} + M_{33} = 1 + 1.8 = 2.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

2. 最高负载转速 N_3

$$1) \text{ 开始收卷时空卷最大转速 } N_{31} = \frac{V}{\pi \cdot D_{32}} = \frac{18}{\pi \times 0.08} = 71.6 \text{ r/min}$$

$$2) \text{ 收卷完成时满卷最大转速 } N_{32} = \frac{V}{\pi \cdot D_{33}} = \frac{18}{\pi \times 0.18} = 31.8 \text{ r/min}$$

3) 最高负载转速 $N_3 = 71.6 \text{ r/min}$

3. 计算瞬间最大负载转矩

1) 放卷辊转动惯量 J_{31}

$$J_{31} = \frac{\pi}{32} \rho_A \cdot L_2 \cdot \eta_A \cdot D_{31}^4$$

$$= \frac{\pi}{32} \times 2.70 \times 10^3 \times 0.8 \times 0.5 \times 0.075^4 = 3355 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

2) 满卷时绕卷材料转动惯量 J_{32}

$$J_{32} = \frac{\pi}{32} \rho_c \cdot L_c \cdot \eta_c \cdot (D_{33}^4 - D_{32}^4) = \frac{\pi}{32} \times 0.93 \times 10^3 \times 0.7 \times 0.95 \times (0.18^4 - 0.08^4) = 61251 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

3) 满卷时换算到减速电机输出轴的负载惯量 J_3

$$J_3 = J_{31} + J_{32} = (3355 + 61251) \times 10^{-6} = 64605 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

4) 满卷时负载加速度转矩 M_{34}

$$M_{34} = J_3 \times \frac{2\pi N_{32}}{60 t_a} = 0.0646 \times \frac{2\pi \times 31.8}{60 \times 0.5} = 0.43 \text{ N} \cdot \text{m}$$

5) 瞬间最大负载转矩 M_{35} (收卷完成时满卷状态)

$$M_{35} = M_3 + M_{34} = 2.8 + 0.43 = 3.23 \text{ N} \cdot \text{m}$$

4. 根据以下条件选择合适的伺服减速电机

1) 伺服减速电机额定转速 $N_{m3} > N_3 = 71.6 \text{ r/min}$

2) 伺服减速电机额定转矩 $M_{m3} > M_3 \times 1.5$ 倍安全系数 $= 2.8 \times 1.5 = 4.2 \text{ N} \cdot \text{m}$

3) 伺服减速电机瞬间最大转矩 $M_{s3} > M_{35} \times 2$ 倍安全系数 $= 0.25 \times 2 = 6.46 \text{ N} \cdot \text{m}$

根据以上条件，可选200W标准直轴伺服减速电机，速比 $i_1 = 10$ ，型号 **MG60A020Y22HT10**

额定转速 $N_{m3} = 300 \text{ r/min} > 79.6 \text{ r/min}$

额定转矩 $M_{m3} = 5.8 \text{ N} \cdot \text{m} > 4.2 \text{ N} \cdot \text{m}$

瞬间最大转矩 $M_{s1} = 20.2 \text{ N} \cdot \text{m} > 6.46 \text{ N} \cdot \text{m}$

伺服减速电机输出轴型式为标准直轴式，通过伺服联轴器连接牵引辊，安装方便

本案例安装合理时电机轴不受径向力和轴向力，故无需验算径向负载与轴向负载。

通过上述步骤，验证了本次选型的伺服减速电机符合使用条件

注意：收放卷辊筒质量按材料空间占比 $\eta_A = 50\%$ 估算，精确计算需代入实际辊筒质量，用如下公式计算惯量：

$$J = \frac{m \times D^2}{4}$$

本例辊筒与放卷材料间纸筒惯量忽略

注意：收卷辊瞬间最大负载转矩为当前卷径下的连续负载转矩和负载加速度转矩之和，数值均随卷径增大而增大，即满卷状态的瞬间最大负载转矩最大。



伺服减速电机：MG60A020Y22HT10



伺服驱动器：MKA020Y22



编码器线：MXA60E □



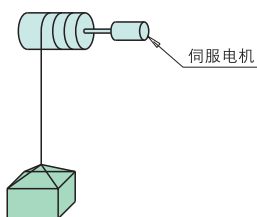
动力线：MXA60M □

案例13：收放卷（间歇运转）负载计算和伺服选型

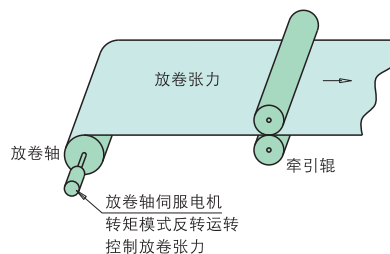
● 收放卷应用的直流母线并接

一、直流母线并接原理

- 电机驱动负载，按能量守恒原理将做功消耗电能，但在某些应用场合如：大惯量负载的强减速、垂直负载上升、下降，转矩模式下的放卷张力应用，此类型应用由于惯性力、重力、张力的作用反向拖动电机发电，电机不消耗电能反而作为电源发电。根据能量守恒原理，此时发电的电能由电动力线输送至伺服驱动器或变频器，导致驱动器或变频器直流母线电压上升，此时若将供电电压相等的多台伺服驱动器或变频器直流母线并接，可以将A电机发电的电能由并接的直流母线送至B电机驱动器或变频器使用，节约电能，同时避免A电机的驱动器或变频器直流母线电压升高。



垂直负载应用



放卷张力应用

二、优点

- 降低驱动器或变频器温度；避免驱动器或变频器直流母线过电压报警；节约电能。

三、缺点

- 增加接线；若驱动器或变频器内部发生强电回路故障，易导致并接在同一直流母线上的其他驱动器或变频器损坏。

四、直流母线并接原则和条件

- 1、仅限本公司单轴伺服驱动器或单轴变频器之间并接。
- 2、输入电源电压相同，且必须使用同一断路器供电。
- 3、单相 220V 供电必须为同一相线上的驱动器或变频器才可并接，不同相线供电的驱动器或变频器由于不同相之间的电压有微小偏差，无法绝对相等，因此不可并接，否则将损坏驱动器或变频器。
- 4、根据负载特点和工作时间，有目的地选择并接轴号和并接轴数。

例如：

1#轴为间歇运转负载，2#轴为发电型负载，3#轴为连续运转负载

选择 2# 和 3# 并接才有意义，同时2#的发电能量 3#必须能完全消耗，2#轴和3#轴必须同一断路器同一相线供电，若3#轴无法完全消耗发电能量，则还需增加并接轴数。

若1#和 2#并接，由于 1# 间歇运转，不运转时耗电极少，无法吸收电能，因此1#与2# 并接无使用价值。

