

# 案例10：机械臂负载计算和伺服选型

## ● 条件

1. 对图1机械臂中的肘关节伺服电机作选型
2. 运转模式：间歇运转，肘关节每次起停的摆动角度 $\theta=60^\circ$
3. 每次起停加速时间 $t_a=0.1s$ , 匀速时间 $t_c=0.5s$ , 减速时间 $t_d=0.1s$   
停顿时间 $t_e=0.5s$ , 每分钟间歇循环次数=50次
4. 肘关节至腕关节距离 $L_1=0.4m$ , 腕关节至夹持物中心距离 $L_2=0.1m$
5. 夹持物质量 $m_1=5kg$ , 肘臂(含腕关节电机及卡爪)自重 $m_2=15kg$
6. 驱动方式为伺服减速机直接驱动摆臂

## ● 计算

### 1. 运动曲线

### 2. 计算连续最大负载转矩

#### 1) 夹持物产生的重力转矩 $M_1$

图2为 $M_2$ 最大的极限位置, 此时

$$\begin{aligned} M_1 &= m_1 \times 9.8 \times (L_1 + L_2) \\ &= 5 \times 9.8 \times (0.4 + 0.1) \\ &= 24.5 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

#### 2) 肘臂自重产生的重力转矩 $M_2$

图2为 $M_3$ 最大的极限位置, 此时

$$\begin{aligned} M_2 &= \frac{1}{2} m_2 \times 9.8 \times (L_1 + L_2) \\ &= \frac{1}{2} \times 15 \times 9.8 \times (0.4 + 0.1) \\ &= 36.75 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

#### 3) 连续最大负载转矩 $M_3$

$$M_3 = M_1 + M_2 = 24.5 + 36.75 = 61.25 \text{ N} \cdot \text{m}$$

### 3. 计算瞬间最大负载转矩

#### 1) 换算到减速机输出轴的负载惯量 $J_1$

$$J_1 = \text{夹持物惯量 } J_2 + \text{肘臂惯量 } J_3$$

$$\text{其中: } J_2 = m_1 \times (L_1 + L_2)^2 = 5 \times (0.4 + 0.1)^2 = 1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$J_3$  可通过相关软件仿真求得

若无仿真条件, 可按直梁惯量作如下近似计算:

$$J_3 = \frac{1}{3} m_2 \times (L_1 + L_2)^2 = \frac{1}{3} \times 15 \times (0.4 + 0.1)^2 = 1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$\text{则 } J_1 = J_2 + J_3 = 1.25 + 1.25 = 2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

#### 2) 最高负载转速 $n_1$

根据运动曲线:

$$\frac{t_a \times n_1}{2} + t_c \times n_1 + \frac{t_d \times n_1}{2} = \frac{60^\circ}{360^\circ} \quad \text{即} \quad \frac{0.1 \times n_1}{2} + 0.5 \times n_1 + \frac{0.1 \times n_1}{2} = \frac{60^\circ}{360^\circ}$$

$$0.6n_1 = 0.1667 \text{ rad} \quad \text{求得 } n_1 = 0.278 \text{ r/s} = 16.68 \text{ r/min}$$

#### 3) 负载角加速度 $\alpha$

$$\alpha = \frac{2\pi n_1}{t_a} = \frac{2\pi \times 0.278}{0.1} = 17.46 \text{ rad/s}^2$$

#### 4) 负载加速度转矩

$$M_4 = J_1 \times \alpha = 2.5 \times 17.46 = 43.65 \text{ N} \cdot \text{m}$$

#### 5) 瞬间最大负载转矩

$$M_5 = M_3 + M_4 = 61.25 + 43.65 = 105 \text{ N} \cdot \text{m}$$

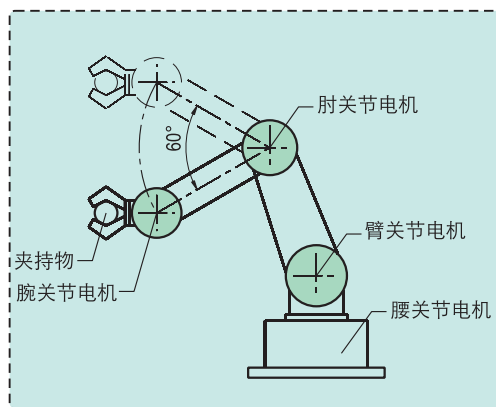


图1

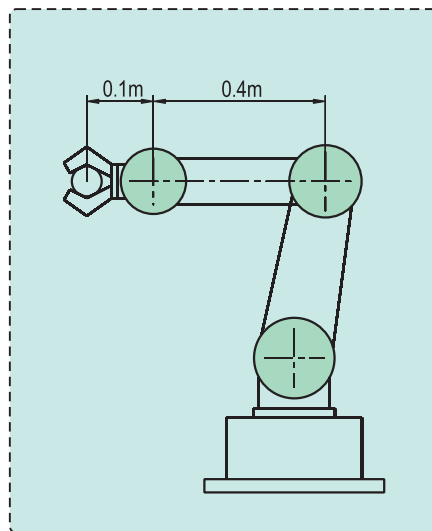
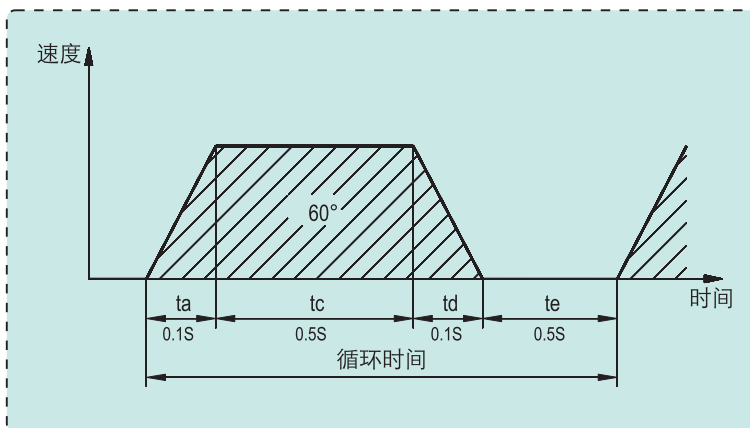


图2

为防止电机过热，电机每分钟的瞬间最大转矩累计时间一般不大于10秒  
本案例中每分钟间歇循环次数为50次，累计时间=50×0.1s=5s，符合要求

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  $n_{m1} > n_1 = 16.68\text{r/min}$
- 2) 伺服减速电机额定转矩  $M_{m1} > M_3 \times 1.5$ 倍安全系数 =  $61.25 \times 1.5 = 92\text{N} \cdot \text{m}$
- 3) 伺服减速电机瞬间最大转矩  $M_{m2} > M_5 \times 2$ 倍安全系数 =  $105 \times 2 = 210\text{N} \cdot \text{m}$

查阅综合目录，选 750W 减速电机，速比  $i=50$ ，电机型号 **MG130A075Y22HF50**

额定转速  $n_{m1} = 60\text{r/min} > 16.68\text{r/min}$

额定转矩  $M_{m1} = 102\text{N} \cdot \text{m} > 92\text{N} \cdot \text{m}$

瞬间最大转矩  $M_{m2} = 326\text{N} \cdot \text{m} > 210\text{N} \cdot \text{m}$

伺服减速电机输出端型式为标准法兰式，方便与机械臂法兰对接，  
并实现正反转无间隙配合

5. 验算惯量比JR

所选电机转子惯量  $J_2 = 146 \times 10^{-6} \text{kg} \cdot \text{m}^2$

$$\text{惯量比 } JR = \frac{J_1}{J_2 \times i^2} = \frac{2.5}{146 \times 10^{-6} \times 50^2} = 6.85 \text{倍} < 30 \text{倍}$$

6. 验算径向负载与轴向负载

- 1) 伺服电机输出轴所受的径向负载  $F_{r1}$

$$F_{r1} = (\text{夹持物重量} m_1 + \text{肘臂重量} m_2) \times 9.8 \\ = (5 + 15) \times 9.8 = 196\text{N}$$

设肘臂的安装法兰厚度为  $B_1 = 12\text{mm}$

依据综合目录中对应的“径向、轴向容许负载表”

计算伺服减速电机输出轴可承受的径向力  $F_r$

$$F_r = \frac{518520}{x + 96.5} = \frac{518520}{B_1 \div 2 + 96.5} = \frac{518520}{12 \div 2 + 96.5} = 5059\text{N}$$

则  $F_{r1} = 196\text{N} < F_r = 5059\text{N}$  满足要求

- 2) 本案例中机械臂只作圆周摆动，正常安装时轴向力  $F_{a1} = 0$

依据综合目录中对应的“径向、轴向容许负载表”

查得伺服减速电机输出轴可承受的轴向力  $F_a = 2185\text{N}$

则  $F_{a1} = 0 < F_a = 2185\text{N}$  满足要求

通过上述步骤，验证了本次选型的伺服减速电机在容量上符合使用条件

7. 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  $W = 0.01 \text{mm/脉冲}$

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

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  $F1-09 = 13$   $F1-10 = 1072$   $F1-11 = 0$   $F1-12 = 1000$
8. 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  $n_2 = n_1 \times i = 0.278 \times 50 = 13.9\text{r/s}$
- 2) 电机以最高工作转速运转时所需的高速脉冲最高频率  $f_1$

$$f_1 = \frac{n_2 \times E}{D} = \frac{13.9 \times 131072 \times 3600}{131072} = 50\text{kHz}$$

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

$f_1 = 50\text{kHz} < f_2 = 100\text{kHz}$  满足要求

通过上述步骤，验证了本次选型的伺服减速电机在位置控制上符合使用条件



伺服减速电机：MG130A075Y22HF50



伺服驱动器：MKA075Y22



编码器线：MXA80E □



动力线：MXA80M □