

伺服电机容量选择指南

引言

本文档以实例为基础，通过对机械系统部件构成及运行情况的计算，得出必要的电机容量参数，方便客户选择合适的伺服电机。容量选择计算，主要流程如图 1 所示，主要计算项目包括：

负载惯量（机械负载系统的惯量）

负载转矩（驱动机械所需转矩）

运行模式（加/减速时间）

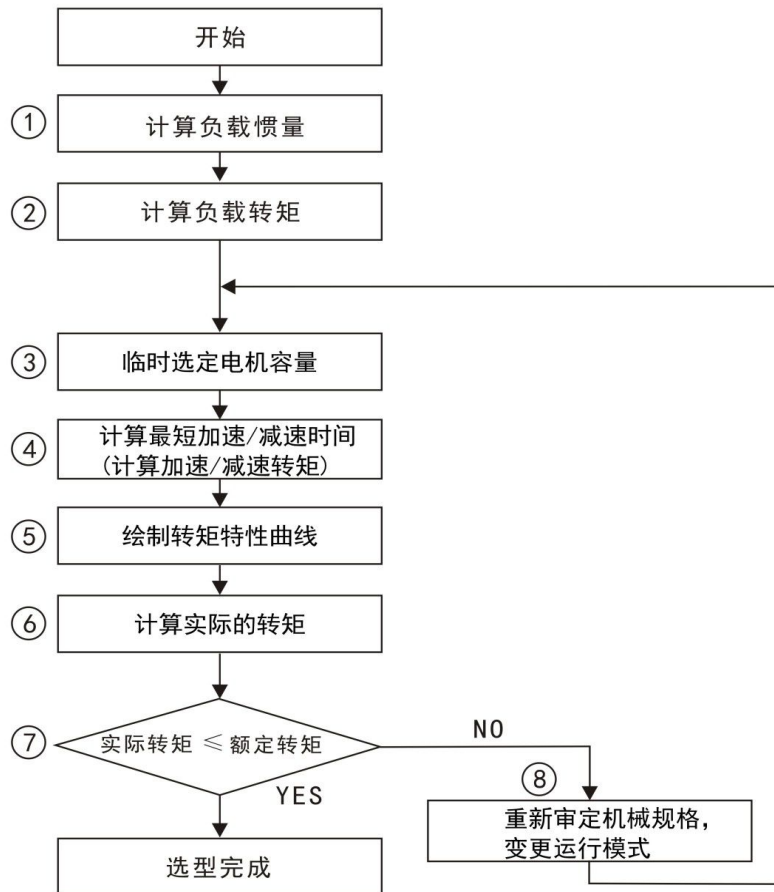


图 1 容量选择流程图

容量选择流程

1) 计算负载惯量 (J_L)

计算对于电机轴换算的机械系统负载惯量；
计算电机旋转时随转动部分的惯量，并求出总和；

2) 计算负载转矩 (T_L)

计算对于电机轴换算的负载转矩；

3) 临时选定电机容量

电机负载惯量 (J_R)

$$J_R \geq J_L / m$$

m 一般选择在 (0 ~ 30)，视运行场景而定（运动部件移动速度快数值可以选择小点，运动部件移动速度缓慢数值可以选择大点）；

电机负载转矩 (T_N)

$$T_N \geq T_L / \lambda$$

λ 为安全系数；

4) 计算最短的加速/减速时间

根据临时选定电机参数计算出最短加速/减速时间
最短加速/减速时间：

$$t_{ac} = \frac{(J_R + J_L) \times 2\pi \times (N_1 - N_0)}{60 \times (T_p - T_L)}$$

已知最短加速/减速时间 t_{ac} ，计算加速/减速转矩

加速/减速转矩：

$$T_{AC} = \frac{(J_R + J_L) \times 2\pi \times (N_1 - N_0)}{60 \times t_{AC}} + T_L$$

J_R 伺服电机额定转子惯量

J_L 负载对电机的惯量

N_1 结束速度

N_0 开始速度

T_p 峰值力矩

T_L 负载转矩

t_{ac} 最短加减速时间

5) 绘制转矩特性曲线

由运动模式，周期运行时间和速度关系如图 2，输出转矩绘制输出转矩特性曲线如图 3 所示。

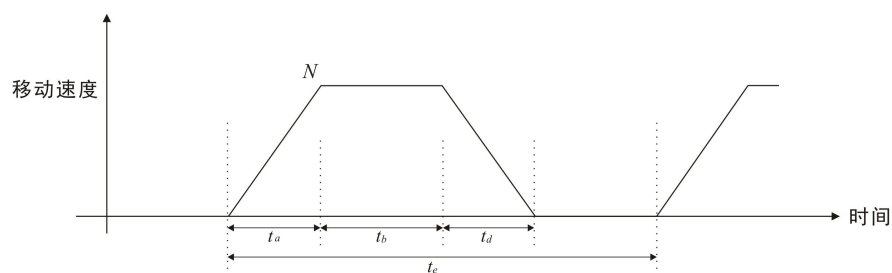


图 2 电机运转速度与时间关系图

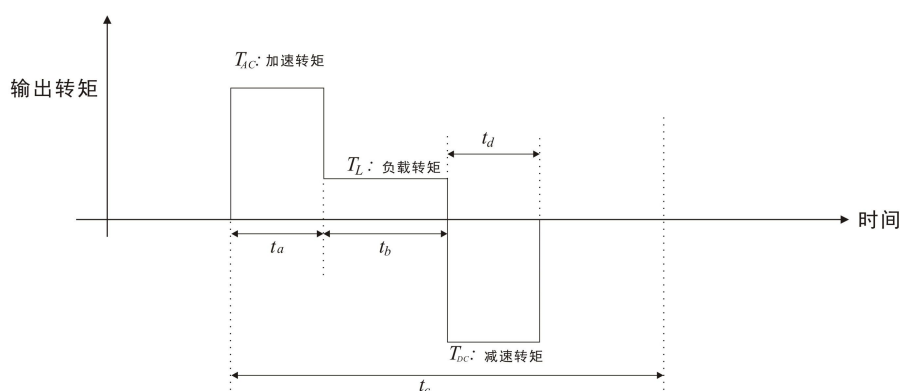


图 3 电机负载转矩与时间关系图

6) 计算实际转矩 (T_{rms})

计算一个循环周期内实际转矩。

$$T_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{(T_{AC}^2 \times t_a) + (T_L^2 \times t_b) + (T_{DC}^2 \times t_d)}{t_c}}$$

7) 比较实际转矩和额定转矩

如果实际转矩小于额定转矩，则符合运转需求，可以购买使用。

如果实际转矩大于额定转矩，则重新审核方案。

8) 电机方案重新审核

- 加大电机容量
- 延长运转频率（周期时间）
- 允许范围内，将加速/减速时间加长一些
- 当旋转速度有余量时，加大减速比
- 当升降机型停止时间长时，加机型制动
- 高频率运行时，尽量加大减速比，减少惯量矩

容量选择计算实例

滚珠丝杆机构为例



图 4 滚珠丝杆模型图

| | | | |
|---------|--|------------|---------------------|
| 丝杆直径： | $B_d = 20\text{mm}$ | 丝杆长度： | $B_l = 0.5\text{m}$ |
| 丝杆螺距： | $B_p = 20\text{mm}$ | 负载质量： | $w_l = 10\text{kg}$ |
| 摩擦系数： | $\mu = 0.1$ | 机型效率： | $\eta = 0.9$ |
| 减速比： | $GL = 0.5$ | 安全系数： | $\lambda = 0.9$ |
| 减速部件惯量： | $J_c \approx 10 \times 10^{-6} (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ | —————可参考附录 | |

运转模式

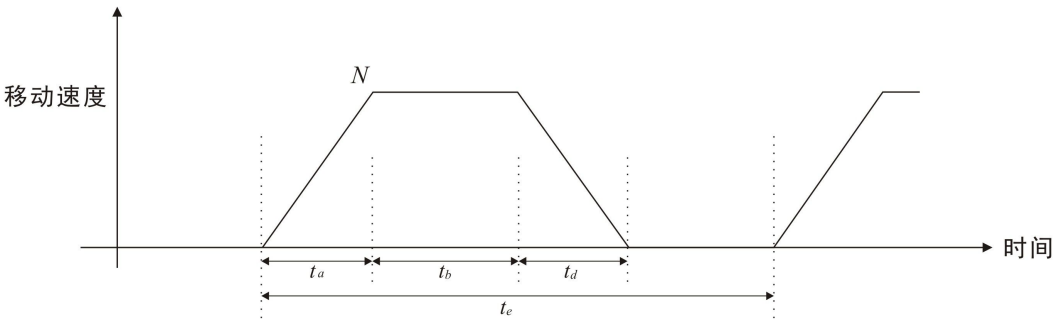


图 5 模型台面移动速度与时间关系图

| | |
|------|---------------------|
| 加速时间 | $t_a = 0.1\text{s}$ |
| 匀速时间 | $t_b = 0.8\text{s}$ |
| 减速时间 | $t_d = 0.1\text{s}$ |
| 循环时间 | $t_c = 2\text{s}$ |
| 移动距离 | $l = 0.3\text{m}$ |

◆ 计算负载惯量 (J_L)

丝杆质量:

$$\begin{aligned} B_w &= \rho \pi \left(\frac{B_d}{2} \right)^2 B_l \\ &= 7.9 \times 10^3 \times 3.14 \times \left(\frac{20}{1000 \times 2} \right)^2 \times 0.5 \\ &= 1.24 \text{ Kg} \end{aligned}$$

丝杆惯量:

$$\begin{aligned} J_b &= \frac{1}{2} \cdot B_w \cdot \left(\frac{B_d}{2} \right)^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 1.24 \times \left(\frac{20}{2 \times 1000} \right)^2 \\ &= 6.2 \times 10^{-5} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

台面负载惯量:

$$\begin{aligned} J_t &= \frac{W_l \cdot B_p^2}{4 \pi^2} \\ &= \frac{10 \times 0.02^2}{4 \times 3.14^2} \\ &= 1.0 \times 10^{-4} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

负载总惯量:

$$\begin{aligned} J_L &= J_c + J_b + J_t \\ &= 10 \times 10^{-6} + 6.2 \times 10^{-5} + 1.0 \times 10^{-4} \\ &= 1.72 \times 10^{-4} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

◆ 计算负载转矩 (T_L)

负载转矩:

$$\begin{aligned} T_L &= \frac{(\mu \cdot g \cdot W_l + F)}{2 \pi \eta} \left(\frac{B_p}{1000} \right) GL \\ &= \frac{(0.1 \times 9.81 \times 10)}{2 \times 3.14 \times 0.9} \times \left(\frac{20}{1000} \right) \times 0.5 \\ &= 0.017 \text{ Nm} \end{aligned}$$

◆ 临时选定电机容量

假设惯量比: $m = 15$

电机额定惯量:

$$\begin{aligned} J_R &\geq J_L / m \\ &\geq 1.72 \times 10^{-4} / 15 \\ &\geq 1.15 \times 10^{-5} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

电机额定力矩:

$$\begin{aligned} T_N &\geq T_L / \lambda \\ &\geq 0.017 / 0.9 \\ &\geq 0.019 \text{ Nm} \end{aligned}$$

查电机参数列表, 初步选择电机为 60BL A20-30 (200W) 型号电机。

该型号额定转子惯量 $J_R = 0.167 \times 10^{-4} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$

额定力矩 $T_N = 0.637 \text{ Nm}$

峰值力矩 $T_p = 1.911 \text{ Nm}$

◆ 计算最短的加速/减速时间

已知移动距离 0.3m, 求得最大速度 V_{\max}

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \times V_{\max} \times t_a + V_{\max} \times t_b + \frac{1}{2} \times V_{\max} \times t_d &= l \\ V_{\max} &= 0.334 \text{ m/s} \end{aligned}$$

换算成电机转速 N

$$\begin{aligned} N &= 60 \frac{V_{\max}}{B_p \times GL} \\ &= 60 \times \frac{0.334}{0.02 \times 0.5} \\ &= 2004 \text{ rpm} \end{aligned}$$

$N < \text{预选电机额定转速 } n_N (3000_{\text{rpm}})$ -----符合要求

最短加减速时间:

$$\begin{aligned} t_{\min} &= \frac{(J_R + J_L) \times 2\pi \times (N_1 - N_0)}{60 (T_p - T_L)} \\ &= \frac{(0.167 + 1.72) \times 10^{-4} \times 2 \times 3.14 \times 2004}{60 \times (1.911 - 0.017)} \\ &= 0.02 \text{ s} \end{aligned}$$

知最短加减速时间 $t_{AC} = 0.1s$ ，求加减速转矩

$$\begin{aligned} T_a &= \frac{(J_R + J_L) \times 2\pi \times (N_1 - N_0)}{60t_{AC}} + T_L \\ &= \frac{(0.167 + 1.72) \times 10^{-4} \times 2 \times 3.14 \times 2004}{60 \times 0.1} + 0.017 \\ &= 0.41 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_d &= \frac{(J_R + J_L) \times 2\pi \times (N_1 - N_0)}{60t_{AC}} - T_L \\ &= \frac{(0.167 + 1.72) \times 10^{-4} \times 2 \times 3.14 \times 2004}{60 \times 0.1} - 0.017 \\ &= 0.37 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$T_a(0.41N_m) < T_P(1.911N_m)$ (预选电机最大转矩) -----符合要求

◆ 绘制转矩特性曲线

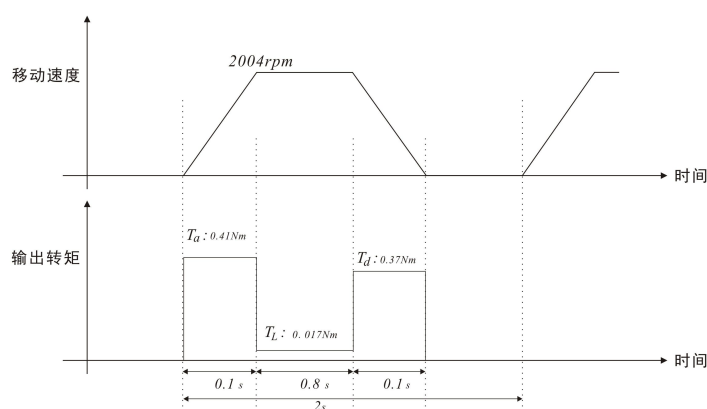


图6 模型台面移动速度与输出转矩关系图

◆ 计算实际转矩 (Trms)

$$\begin{aligned} T_{rms} &= \sqrt{\frac{(T_a^2 \times t_a) + (T_L^2 \times t_b) + (T_d^2 \times t_d)}{t_C}} \\ &= \sqrt{\frac{(0.41^2 \times 0.1) + (0.017^2 \times 0.8) + (0.37^2 \times 0.1)}{2}} \\ &= 0.124 \text{ Nm} \end{aligned}$$

◆ 实际转矩对比预选电机额定力矩

$T_{rms}(0.124N_m) < T_N(0.637N_m)$ -----符合要求

(说明预选电机各项参数指标在合理使用范围内，预选电机 60BLA20-30 (200W) 型号电机可以使用。)

附录

〈参考〉

摩擦系数 μ 的目标值

| 机构 | 摩擦系数 |
|--------------------|------------|
| 轨道和铁车轮 (台车, 吊车) | 0.05 |
| 直线导轨 | 0.05 ~ 0.2 |
| 滚珠花键轴 | |
| 滚柱工作台 | |
| 滚柱系统 | |

材质密度

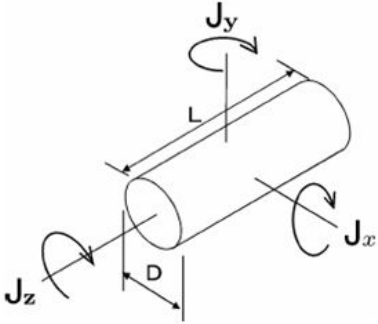
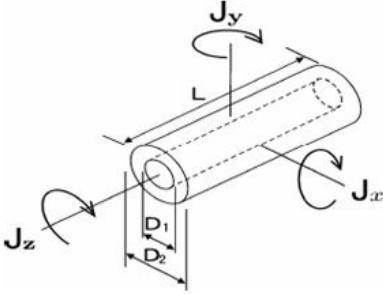
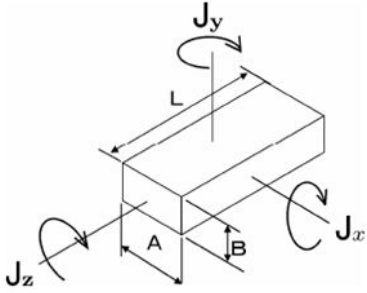
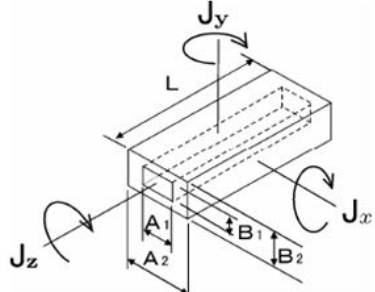
| 材质 | 密度: kg/m^3 |
|-----|---------------------|
| 铜 | 8.96×10^3 |
| 黄铜 | 8.54×10^3 |
| 不锈钢 | 7.91×10^3 |
| 铁 | 7.85×10^3 |
| 铝 | 2.7×10^3 |
| 聚缩醛 | 1.43×10^3 |

机械效率 η 的目标值

| 机构 | 机械效率 |
|----------------|------------|
| 台式丝杠 | 0.5 ~ 0.8 |
| 滚珠丝杠 | 0.9 |
| 齿条和小齿轮 | 0.8 |
| 齿轮减速器 | 0.8 ~ 0.95 |
| 蜗轮减速器(起动) | 0.5 ~ 0.7 |
| 蜗轮减速器 (运行中) | 0.6 ~ 0.8 |
| 皮带传动 | 0.95 |
| 链条传动 | 0.9 |

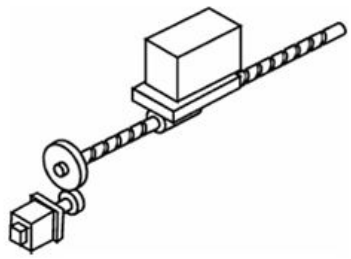
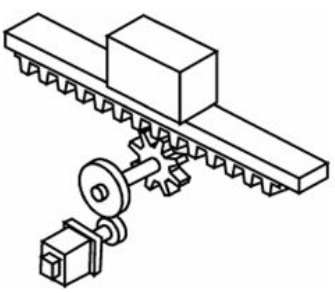
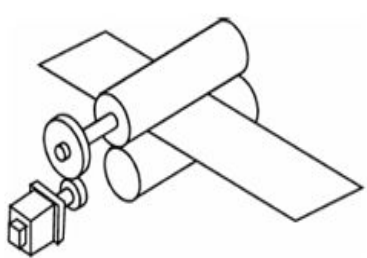
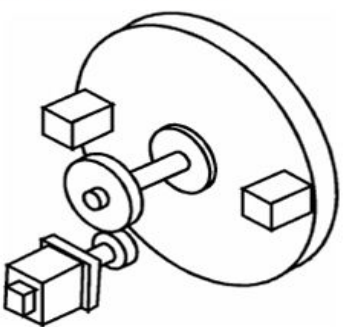
附录

〈惯量计算〉

| | |
|---|---|
|  | $J_z = \frac{W}{8} \left(\frac{D}{10^3} \right)^2$ $= \frac{\pi \rho}{32} \left(\frac{L}{10^3} \right) \left(\frac{D}{10^3} \right)^4$ $J_x = J_y = \frac{W}{16} \left(\frac{D}{10^3} \right)^2 + \frac{W}{12} \left(\frac{L}{10^3} \right)^2$ $W = \frac{\pi \rho}{4} \left(\frac{L}{10^3} \right) \left(\frac{D}{10^3} \right)^2$ |
|  | $J_z = \frac{W}{8} \left[\left(\frac{D_2}{10^3} \right)^2 + \left(\frac{D_1}{10^3} \right)^2 \right]$ $= \frac{\pi \rho}{32} \left(\frac{L}{10^3} \right) \left[\left(\frac{D_2}{10^3} \right)^4 + \left(\frac{D_1}{10^3} \right)^4 \right]$ $J_x = J_y = \frac{W}{16} \left[\left(\frac{D_2}{10^3} \right)^2 + \left(\frac{D_1}{10^3} \right)^2 \right] + \frac{W}{12} \left(\frac{L}{10^3} \right)^2$ $W = \frac{\pi \rho}{4} \left(\frac{L}{10^3} \right) \left[\left(\frac{D_2}{10^3} \right)^2 - \left(\frac{D_1}{10^3} \right)^2 \right]$ |
|  | $J_x = \frac{W}{12} \left[\left(\frac{B}{10^3} \right)^2 + \left(\frac{L}{10^3} \right)^2 \right]$ $J_y = \frac{W}{12} \left[\left(\frac{L}{10^3} \right)^2 + \left(\frac{A}{10^3} \right)^2 \right]$ $J_z = \frac{W}{12} \left[\left(\frac{B}{10^3} \right)^2 + \left(\frac{A}{10^3} \right)^2 \right]$ $W = \rho \left(\frac{A}{10^3} \right) \left(\frac{B}{10^3} \right) \left(\frac{C}{10^3} \right)$ |
|  | $J_x = \frac{W_2}{12} \left[\left(\frac{B_2}{10^3} \right)^2 + \left(\frac{L}{10^3} \right)^2 \right] - \frac{W_1}{12} \left[\left(\frac{B_1}{10^3} \right)^2 + \left(\frac{L}{10^3} \right)^2 \right]$ $J_y = \frac{W_2}{12} \left[\left(\frac{A_2}{10^3} \right)^2 + \left(\frac{L}{10^3} \right)^2 \right] - \frac{W_1}{12} \left[\left(\frac{A_1}{10^3} \right)^2 + \left(\frac{L}{10^3} \right)^2 \right]$ $J_z = \frac{W_2}{12} \left[\left(\frac{A_2}{10^3} \right)^2 + \left(\frac{B_2}{10^3} \right)^2 \right] - \frac{W_1}{12} \left[\left(\frac{A_1}{10^3} \right)^2 + \left(\frac{B_1}{10^3} \right)^2 \right]$ $W = \rho \left[\left(\frac{A_2}{10^3} \right) \left(\frac{B_2}{10^3} \right) - \left(\frac{A_1}{10^3} \right) \left(\frac{B_1}{10^3} \right) \right] \left(\frac{L}{10^3} \right)$ $W_2 = \rho \left(\frac{A_2}{10^3} \right) \left(\frac{B_2}{10^3} \right) \left(\frac{L}{10^3} \right) \quad W_1 = \rho \left(\frac{A_1}{10^3} \right) \left(\frac{B_1}{10^3} \right) \left(\frac{L}{10^3} \right)$ |

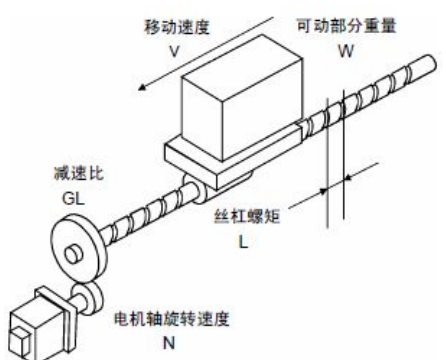
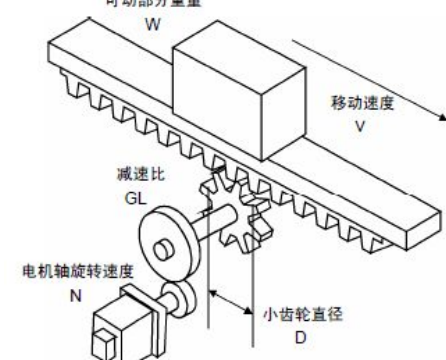
附录

〈惯量换算〉

| | |
|---|--|
| <p>滚珠丝杠</p>  | $J = W \left(\frac{1}{2\pi} \times \frac{BP}{10^3} \right)^2 \times GL^2$ <p>W: 可动部分总质量[Kg] BP: 丝杆螺距[mm] GL: 减速比</p> |
| <p>齿条和小齿轮・传送带・链条传动</p>  | $J = W \left(\frac{1}{2\pi} \times \frac{D}{10^3} \right)^2 \times GL^2$ <p>W: 可动部分总质量[Kg] D: 齿轮直径[mm] 链轮直径[mm] GL: 减速比</p> |
| <p>进料辊</p>  | $J = W \left(\frac{1}{2} \times \frac{D}{10^3} \right)^2 \times GL^2$ <p>W: 可动部分总质量[Kg] D: 辊子直径[mm] GL: 减速比</p> |
| <p>旋转体・转盘驱动</p>  | <p>物体相对于旋转轴的惯量</p> $J_{物} = \left[J + W \left(\frac{L}{10^3} \right)^2 \right] \times GL^2$ <p>W: 物体质量[Kg] J: 通过物体重心的惯量 D: 跟旋转轴的距离[mm] GL: 减速比</p> |

附录

〈转矩计算〉

| | |
|--|---|
|  <p>移动速度 V</p> <p>可动部分重量 W</p> <p>减速比 GL</p> <p>丝杠螺距 L</p> <p>电机轴旋转速度 N</p> <p>• 上升时(垂直)</p> <p>• 下降时(垂直)</p> <p>• 停止时(垂直)</p> | <h4>滚珠丝杠</h4> $T_L = \frac{(\mu W + F) \times 9.81}{2\pi\eta} \left(\frac{BP}{10^3} \right) \times GL$ <p>μ: 摩擦系数 BP: 丝杠螺距[mm]</p> <p>W, W_1: 可动部分重量[kg]</p> <p>W_2: 配重重量[kg]</p> <p>GL: 减速比(无单位) F: 推力[kg]</p> $T_L = \frac{((\mu + 1) W_1 - W_2) \times 9.81}{2\pi\eta} \left(\frac{BP}{10^3} \right) \times GL$ $T_L = \frac{((\mu - 1) W_1 - W_2) \times 9.81}{2\pi\eta} \left(\frac{BP}{10^3} \right) \times GL$ $T_L = \frac{(W_1 - W_2) \times 9.81}{2\pi\eta} \left(\frac{BP}{10^3} \right) \times GL$ |
|  <p>可动部分重量 W</p> <p>移动速度 V</p> <p>减速比 GL</p> <p>电机轴旋转速度 N</p> <p>小齿轮直径 D</p> <p>• 上升时(垂直)</p> <p>• 下降时(垂直)</p> <p>• 停止时(垂直)</p> | <h4>传送带・齿条和小齿轮</h4> $T_L = \frac{(\mu W + F) \times 9.81}{\eta} \left(\frac{D}{2} \times \frac{1}{10^3} \right) \times GL$ <p>μ: 摩擦系数 D: 直径[mm]</p> <p>W, W_1: 可动部分重量[kg]</p> <p>W_2: 配重重量[kg]</p> <p>GL: 减速比(无单位)</p> $T_L = \frac{((\mu + 1) W_1 - W_2) \times 9.81}{\eta} \left(\frac{D}{2} \times \frac{1}{10^3} \right) \times GL$ $T_L = \frac{((\mu - 1) W_1 - W_2) \times 9.81}{\eta} \left(\frac{D}{2} \times \frac{1}{10^3} \right) \times GL$ $T_L = \frac{(W_1 - W_2) \times 9.81}{\eta} \left(\frac{D}{2} \times \frac{1}{10^3} \right) \times GL$ |