

- 小问 4：电机损耗模型 + 多目标遗传算法优化

- 1. 变量定义
- 2. 假设条件
- 3. 公式推导
  - 3.1 电机瞬时功率模型
  - 3.2 总能耗模型
  - 3.3 多目标优化模型 (NSGA-II)
  - 3.4 求解步骤
- 4. 建模流程图

## 小问 4：电机损耗模型 + 多目标遗传算法优化

### 1. 变量定义

变量符号	变量名称	变量类型	单位	取值范围/备注
$E_{total}$	总能耗	目标变量 (min)	J	-
$T_{max\_cycle}$	最大动作周期	目标变量 (min)	s	-
$\omega_1$	小问1伸展速度	优化变量	$^{\circ}/s$	$\leq 5$
$T_2$	小问2运动时间	优化变量	s	$\leq 6$
$\omega_3$	小问3画圆角速度	优化变量	rad/s	$\leq 10^{\circ}/s$
$P_{Cu}$	铜损功率	中间变量	W	-
$P_{Fe}$	铁损功率	中间变量	W	-
$P_{mech}$	机械损耗功率	中间变量	W	-
$I(t)$	电机电流	中间变量	A	-
$R$	电机绕组电阻	参数	$\Omega$	已知常数
$K_t$	转矩常数	参数	N · m/A	已知常数

### 2. 假设条件

1. **热稳态假设**: 假设电机在运行过程中温度保持恒定, 忽略温度变化对电阻  $R$  和磁路特性的影响。
  - 合理性: 动作时间较短, 温升效应不显著。
2. **参数解耦假设**: 假设铜损、铁损、机械损耗相互独立, 总损耗为三者线性叠加。
  - 合理性: 工程上常用的电机损耗估算模型, 误差在可接受范围内。
3. **电源理想假设**: 假设电池电压恒定为 67.2V, 内阻忽略不计。
  - 合理性: 电池容量较大 (15Ah), 短时间放电电压降较小。
4. **轨迹缩放假设**: 假设改变动作速度 (如  $\omega_1$ ) 仅改变时间轴的缩放, 动作的空间轨迹保持不变。
  - 合理性: 简化优化变量, 避免重新进行复杂的轨迹规划。

## 3. 公式推导

---

### 3.1 电机瞬时功率模型

对于每一个关节电机, 瞬时总输入功率  $P_{in}(t)$  由输出机械功率和内部损耗组成:

$$P_{in}(t) = P_{out}(t) + P_{loss}(t)$$

其中:

#### 1. 机械输出功率:

$$P_{out}(t) = \tau(t) \cdot \omega(t)$$

#### 2. 铜损 (Copper Loss):

$$P_{Cu}(t) = I(t)^2 R = \left(\frac{\tau(t)}{K_t}\right)^2 R$$

#### 3. 铁损 (Iron Loss): 通常与转速的高次幂相关, 根据题目模型:

$$P_{Fe}(t) = k_3 \cdot \omega(t)^4$$

#### 4. 机械摩擦损耗:

$$P_{mech}(t) = k_2 \cdot \omega(t)$$

## 3.2 总能耗模型

对所有  $N$  个关节在时间  $T$  内积分求和：

$$E_{total} = \sum_{j=1}^N \int_0^T (\tau_j(t) \omega_j(t) + \frac{\tau_j(t)^2 R}{K_t^2} + k_3 \omega_j(t)^4 + k_2 \omega_j(t)) dt$$

### 3.3 多目标优化模型 (NSGA-II)

优化变量：

$$X = [\omega_1, T_2, \omega_3]$$

目标函数：

$$\begin{cases} \min f_1(X) = E_{total}(X) & \text{(能耗最小)} \\ \min f_2(X) = \max(T_1, T_2, T_3) & \text{(最大周期最小/效率最高)} \end{cases}$$

约束条件：

$$s.t. \begin{cases} \omega_1 \leq 5^\circ/s \\ T_2 \leq 6s \\ \omega_3 \leq 10^\circ/s \\ \text{Error}_{traj} \leq 2\% \text{ (轨迹跟踪误差)} \end{cases}$$

### 3.4 求解步骤

1. **初始化**：生成包含  $N_{pop}$  个个体的种群，每个个体对应一组  $(\omega_1, T_2, \omega_3)$ 。
2. **评估**：将个体参数代入动力学模型，计算  $E_{total}$  和时间  $T$ 。
3. **非支配排序 (Non-dominated Sorting)**：根据  $f_1, f_2$  确定个体的帕累托等级。
4. **拥挤度计算**：在同一等级内计算拥挤距离，保持多样性。
5. **进化**：通过选择、交叉、变异生成子代。
6. **收敛**：迭代达到预设代数，输出 Pareto 前沿。

### 4. 建模流程图





