

- 小问 4 求解步骤：多目标优化 (NSGA-II)

- 1. 数据输入
- 2. 参数初始化 (NSGA-II 配置)
- 3. 模型调用 (多目标寻优)
- 4. 结果输出

小问 4 求解步骤：多目标优化 (NSGA-II)

1. 数据输入

- 导入模型：加载小问 4 定义的能耗积分模型 $E_{total}(\omega, T)$ 。
- 导入数据：电机参数 (R, K_t, k_{loss}) ，小问 1-3 的基础轨迹数据。

2. 参数初始化 (NSGA-II 配置)

- 种群规模：50 - 100 (多目标通常不需要太大种群)。
- 最大代数：200。
- 决策变量界限：
 - $\omega_1 \in [0, 5]$
 - $T_2 \in [4, 6]$
 - $\omega_3 \in [0, 10]$
- 目标方向：均为最小化 (Minimize)。

3. 模型调用 (多目标寻优)

- 步骤 3.1：初始评估
 - 生成初始种群，计算每个个体的 (E_{total}, T_{max}) 。
- 步骤 3.2：非支配排序
 - 对比所有个体，找出互不支配的个体集合 (Pareto Front Rank 1)。
 - 剔除 Rank 1，在剩余个体中找 Rank 2，依此类推。
- 步骤 3.3：拥挤度计算与选择
 - 在同 Rank 内，计算个体在目标空间中的密度。
 - 优先选择 Rank 小、拥挤距离大 (分布稀疏) 的个体进入下一代。

- 步骤 3.4：交叉变异
 - 模拟二进制交叉 (SBX) 和多项式变异 (Polynomial Mutation)。
 - 注意：变异分布指数 η 影响局部搜索能力，推荐设为 20。

4. 结果输出

- Pareto 前沿图：
 - 绘制散点图：X轴-时间，Y轴-能耗。
 - 注意：检查前沿是否光滑连续，若断裂则可能陷入局部最优或种群太小。
- 最优解推荐：
 - 计算“膝点” (Knee Point)：距离理想点 (0,0) 最近的解，或切线斜率突变处。
 - 输出该点的决策变量值 $[\omega_1^*, T_2^*, \omega_3^*]$ 及其对应的能耗与时间。
- 对比分析：输出优化后能耗相比初始方案的下降百分比（如“能耗降低 15%，时间仅增加 0.5s”）。