

- 小问 2 求解步骤：B 样条轨迹优化 (遗传算法)
 - 1. 数据输入
 - 2. 参数初始化 (GA 配置)
 - 3. 模型调用 (迭代寻优)
 - 4. 结果输出

小问 2 求解步骤：B 样条轨迹优化 (遗传算法)

1. 数据输入

- 读取约束参数：
 - 总距离 $S = 10 \text{ m}$
 - 平均速度 $v = 2 \text{ m/s}$ (隐含 $T \approx 5 \text{ s}$)
 - 最大角速度 $\omega_{max} = 10^\circ/\text{s}$
 - 最大力矩 $\tau_{max} = 8 \text{ N} \cdot \text{m}$
- 读取初始/终止状态： $\theta_{start} = 0, \theta_{end}$ (根据步态几何计算得出)。

2. 参数初始化 (GA 配置)

- 种群规模 (PopSize): 100
- 迭代代数 (MaxGen): 50 - 100
- 变异概率 (Pm): 0.1 (需在 $[0.05, 0.2]$ 间调试，过大导致难以收敛，过小易陷局部最优)
- 交叉概率 (Pc): 0.8
- 决策变量范围：
 - $T \in [4.5, 5.5]$ (在 5s 附近浮动)
 - 控制点 $P_1, P_2 \in [-30^\circ, 90^\circ]$ (符合膝关节物理限制)

3. 模型调用 (迭代寻优)

- 步骤 3.1: 种群初始化
 - 随机生成 100 组 $[P_1, P_2, T]$ 向量。

- **步骤 3.2: 适应度评估 (循环)**

- 对每个个体:

1. 构建 3 次 B 样条函数 $\theta(t)$ 。
2. 离散化时间 $t = 0 : 0.01 : T$ 。
3. 求导得到 $\dot{\theta}, \ddot{\theta}$ 。
4. 计算动力学力矩 τ 。
5. **计算惩罚项:**

$$Penalty = \alpha \cdot (\sum \max(0, |\dot{\theta}| - 10) + \sum \max(0, |\tau| - 8))$$

注意: 罚因子 α 需足够大 (如 10^5), 以确保违反约束的解被淘汰。

6. **计算目标函数:** $J = \int |\ddot{\theta}|^2 dt + Penalty$ 。

7. 适应度 $Fitness = 1/J$ 。

- **步骤 3.3: 进化操作**

- 执行轮盘赌选择、算术交叉、高斯变异, 生成新一代种群。
 - 记录每代最佳适应度, 绘制收敛曲线。

4. 结果输出

- 输出最优解向量 $[P_1^*, P_2^*, T^*]$ 。
- 绘制“关节角度-时间”曲线图。
- 绘制“角速度/力矩”曲线图, 并画出红色约束线验证是否满足要求。