

# 结果分析：机器人运动学、轨迹规划与协同优化

本文件汇总了针对四个小问的求解结果分析，包含基础统计分析与深层物理/工程意义分析。

小问编号	主要问题与目标	基础分析 (数值与统计)	深层分析 (关联、敏感性与实际意义)
Q1	机械臂运动学与安全性验证  求解伸展 $60^\circ$ + 旋转 $30^\circ$ 后的末端坐标，并验证电机扭矩安全性。	1. 数值解读：  • 最终坐标：(0.146m, 0.085m, 0.293m)。   • 力矩计算：重力产生的静态保持力矩为 $3.16N \cdot m$ 。 2. 统计描述：  • 负载率：相比电机额定峰值 $120N \cdot m$ ，当前静态负载仅占用约 2.6% 的容量。  • 误差分析：基于解析法求解，无随机误差，结果为精确解。	1. 关联性与安全裕度：   • 结果完全满足 $T_{load} \leq T_{limit}$ 的约束。   • 安全系数： $S = 120/3.16 \approx 38$ ，表明电机选型对于静态保持任务存在巨大的冗余。  2. 实际意义：   • 极高的安全系数意味着该关节电机主要不是为了“举起”手臂而选型，而是为了满足高动态响应（高加速度）需求。设计合理。
Q2	单腿关节轨迹优化  基于遗传算法 (GA) 规划行走 $10m$ (均速 $2m/s$ ) 的膝关节	1. 数值解读：  • 最优时间：收敛于 $T = 5.00s$ ，精确匹配目标速度要求 ( $10m/2m/s$ )。  • 运动范围：膝关节角度从 $0^\circ$ 平滑过渡至 $45^\circ$ 。 2. 统计描述：  • 收敛性：适应度函数 (Loss) 从初始的 $> 1.1$ 快速收敛至 0.015。  • 平滑度：速度峰值控制在 $\pm 300^\circ/s$ 上限内，加速度无突变。	1. 关联性与平滑性：   • 轨迹呈现 S 型 (Sigmoid-like)，加速度变化连续，物理上意味着对减速机和连杆的机械冲击 (Jerk) 最小化。 2. 敏感性分析：  • 结果对时间约束 $T$ 高度敏感。若

最优轨迹，最小化能耗与冲击。

强制  $T < 4.5s$ ，所需力矩将呈指数级上升，可能突破  $120N \cdot m$  限制。  
**3. 实际意义：**证明了在给定速度下，存在能量最优的步态轨迹，可作为步态控制器的前馈输入。

Q3

全身协同运动控制  
模拟身体左转  $45^\circ$  与机械臂画圆的协同动作，验证动态稳定性。

**1. 数值解读：**协同动作：在  $10s$  内，身体Yaw角达到  $45^\circ$ ，同时手臂末端完成半径  $0.3m$  的圆周运动。  
**2. 统计描述：**稳定性：重心(CoM)侧向偏移量始终控制在  $\pm 0.1m$  的安全域内。  
训练过程：奖励(Reward)曲线呈指数上升，表明策略已收敛至最优解。

**1. 关联性：**成功实现了“移动底盘”与“操作臂”的任务解耦与并行，证明了协同控制策略在运动学层面的有效性。  
**2. 实际意义：**CoM 偏移量小于一般双足机器人的支撑多边形半宽，说明在执行此类复合动作时，机器人无需复杂的步点调整即可保持平衡，具备工程落地性。

Q4

多目标能效优化  
使用 NSGA-II 算法权衡作业总时间(效率)与总能耗(成本)。

**1. 数值解读：**解集规模：获得了 100 个 Pareto 前沿非支配解。  
推荐解 (Knee Point)：总时间  $5.13s$ ，总能耗  $337.79J$ 。  
**2. 统计描述：**分布特征：解集分布呈现明显的反比双曲线特征——时间越短，能耗呈指数级上升。  
拐点分析：推荐解位于曲线“膝部”，是边际效益最高的点。

**1. 关联性与权衡：**  
揭示了系统性能的物理边界。Pareto 前沿展示了在当前硬件条件下，无法同时进一步优化时间和能耗。  
**2. 实际意义与决策支持：**推荐解价值： $5.13s$  的方案仅比理论极限快方案（如  $4s$ ）慢约 20%，但能耗可节

小 问 编 号	主要问题 与目标	基础分析 (数值与统计)	深层分析 (关联、敏感性与实际意义)
			省约 40 – 50%。  • 策略建议：日常作业应采用推荐模式（Eco Mode）；仅在紧急任务下切换至极速模式（Boost Mode）。