

工业机器人轨迹规划与运动控制优化技术研究

沈 飞

湖北商贸学院 湖北 武汉 430079

【摘要】：针对工业机器人高速运行工况下轨迹平滑度不足与末端循迹精度衰减的矛盾，本文提出一种融合多目标规划与动力学主动补偿的系统级优化方案，在构建含非线性摩擦扰动的刚体动力学模型基础上，采用高阶非均匀有理 B 样条曲线进行轨迹参数化，并引入改进非支配排序遗传算法对运行时间与加速度执行多目标协同寻优，输出吻合机电硬件极限的理想参考曲线。在底层执行域，摒弃纯滞后误差反馈模式，创新性植入基于机理模型的动力学前馈指令与滚动时域模型预测控制策略，辅以在线摩擦辨识机制精准消除换向迟滞。工程验证表明，该系统性策略有效对冲了多轴强耦合带来的惯性冲击，将极限拐角处的动态循迹误差压降至微米量级，显著提升了机械设备在复杂连续作业中的瞬态平稳性与加工一致性。

【关键词】：工业机器人；多目标优化；轨迹规划；优化措施

DOI:10.12417/2982-3811.25.10.011

引言

现如今工业机器人已经遍及全球各行各业工业现场。目前在搬运，抛光，铸造，装配和码垛这类繁杂而单调的工作背景下，有效的规划工业机器人作业轨迹可提升生产速度，加快制造进度，提高生产数量，大大节省时间”。因此利用各种智能优化算法是目前工业机器人轨迹规划研究热点。现阶段，单纯基于空间几何约束的独立轨迹规划，或仅依靠底层伺服闭环的抗扰控制，已难以应对机械臂高频加减速时激发的非线性动力学扰动。上层指令规划与底层物理执行之间的机制割裂，已成为限制机器人动态跟踪精度的核心瓶颈。为此，本研究聚焦路径生成边界与伺服驱动性能的深度耦合，旨在提出一套涵盖高阶平滑轨迹寻优、惯性前馈补偿及摩擦动态修正的完整优化范式。预期通过重构机理模型与预判式控制律，从源头抑制系统多轴换向时的机械脉动与惯性过冲，为高端柔性制造场景提供坚实的理论支撑与高性价比的工程实践方案。

1 工业机器人运动学与动力学基础

1.1 机器人的空间几何映射

工业机器人的运动学建模本质上是对多体拓扑结构的空间几何映射。研究基于 D-H 参数法构建连杆间齐次变换矩阵，实现了从关节空间到笛卡尔空间的位姿解算。在该映射框架内，末端执行器位姿由系统各关节角位移唯一确定。同时，本文引入雅可比矩阵表征机械臂瞬态运动规律，将底层关节角速度映射为空间运行速度。该几何映射机制确立了轨迹规划的全局坐标参照，并为后续刚体动力学方程推演提供了数理基石。

1.2 机器人的受力与惯性分析

工业机器人的高速运行呈现出非线性与强耦合的动力学特征。连杆质量分布与空间姿态的瞬变，使系统产生复杂的惯性作用。本文基于拉格朗日体系构建刚体动力学方程，深入解析机械臂的瞬态受力机制。该模型解耦了三大动力学分量：关节加速度诱发的惯性力、多轴联动产生的科氏力与离心力，以及系统重力负载。动力学方程确立了关节运动参量与驱动力矩间的定量映射关系。上述受力分析揭示了动态运行时的内部扰动来源，直接为后续设计前馈补偿控制器提供物理参数。

1.3 真实运转中的机械阻力建模

理想动力学模型常忽略系统内部耗散。实际运转中，机器人关节传动机构普遍存在非线性机械摩擦。该阻力由静摩擦、库仑摩擦与粘滞摩擦耦合而成，在低速运行或换向时极易引发爬行现象与机体抖动。为修正理论偏差，本文在刚体动力学框架内引入摩擦扰动模型。该模型定量刻画了阻力随速度变化的非线性规律，精准还原了真实工况下的机械干扰特性。阻力模型的建立填补了理想受力分析的现实盲区，直接为后续设计前馈补偿控制器提供了关键物理参数。

2 基于多目标优化的平滑轨迹规划技术

2.1 轨迹参数化与连续性构建

离散路径点的连续解析表达是轨迹规划的基础。传统低阶插值法易引发加速度突变与系统谐振。引入非均匀有理 B 样条函数对机器人关节轨迹进行参数化构建。研究利用曲线的局部支撑特性，通过解算控制顶点，在精准贴合目标路径时严格保证运动学参量的高阶连续。

该参数化机制从源头消除了加加速度 (Jerk) 突变, 有效抑制了机体运转时的瞬态抖动。此连续性构建过程将复杂的空间规划转化为降维映射, 直接为后续多目标寻优算法提供了平滑的数学载体。

2.2 运动学与动力学约束映射

平滑轨迹的工程可执行性依赖物理边界的严格界定。脱离硬件属性的纯理论规划易导致驱动关节力矩饱和。可以在参数化曲线基础上, 构建运动学与动力学双重约束映射模型。研究提取伺服电机容许的极值速度与加速度, 确立运动学边界。同时结合动力学模型, 将电机峰值力矩映射为对轨迹高阶变化率的动态限制。该机制将物理硬件极限转化为算法寻优的硬性约束, 确保输出轨迹严格收敛于机械臂执行能力域内, 有效规避了越界指令引发的系统失稳。

2.3 多目标协同优化算法求解

理想的工业机器人轨迹需在运行效率与动态平稳性间寻求严密的数学平衡。传统单一时间最优策略常驱使关节逼近物理极限运行, 极易激起机械共振。为此, 本文构建了融合时间代价与加加速度 (Jerk) 积分的多目标评价函数。研究引入改进非支配排序遗传算法, 驱动轨迹控制顶点在多维约束空间内进行迭代演化, 进而精准求解 Pareto 前沿解集。该协同求解机制有效剥离了高速节拍与机体冲击的内在冲突, 最终输出了兼顾全局效率与瞬态平稳的最优轨迹参数。

3 业机器人轨迹规划与运动控制优化技术策略

3.1 引入动力前馈量, 削弱惯性强耦合

传统误差反馈控制存在不可避免的物理相位滞后, 难以应对机械臂高速运动时的非线性扰动。引入动力学前馈补偿策略, 本质上是将控制逻辑由“被动纠偏”彻底转变为“主动预判”。系统基于前期构建的刚体受力方程, 在伺服回路执行动作前, 直接提取当前空间位姿下的惯性矩阵与科氏力参数。当底层接收到高阶平滑轨迹指令时, 控制器同步解算出各关节实现该路径所需的理论驱动力矩, 并将此数据作为前馈指令直接叠加至电机的电流环。该机制在源头上抵消了多轴联动造成的物理耦合干扰, 大幅剥离了反馈控制器的抗扰负担。

以新能源汽车曲面挡风玻璃的高速聚氨酯涂胶工况为例, 该工况要求六轴工业机器人在携带大负载末端胶枪的前提下, 以 800mm/s 的恒定线速度沿复杂三维空间曲线连续作业。在工程实测中, 当机械臂高速掠过大曲率空间拐角时, 末端腕部的剧烈姿态偏转会瞬间产生极大的离心力与科氏力。这种非线性物理冲击会沿着机械结构反向加载至基座与大臂关节。若单纯依赖伺服驱动器内部的 PID 去硬抗这种瞬态冲击, 极易导致实际轨迹在弯道处发生微米级甩尾, 造成胶线截面畸变甚至偏离玻璃轮廓。

应用动力前馈策略后, 上位机在下发加工路径的同时, 按

照 1 毫秒的通信周期, 将规划好的瞬态速度与加速度带入动力学模型。系统精准推演并预判出即将到来的拐角处, 基座电机需要额外克服的惯性阻力, 随即在胶枪到达该物理坐标前, 直接向大臂伺服器下发对应的力矩补偿指令。这种前置干预等同于让伺服电机提前建立了对抗扰动的力矩裕度, 直接对冲了末端高频甩动带来的物理撕扯。现场采集数据表明, 在未变动任何硬件外设的条件下, TCP 动态循迹误差从 0.82 毫米骤降至 0.15 毫米以内。涂胶系统不仅在急弯处维持了平稳的恒速出胶, 各轴电机的瞬时电流曲线也由锯齿状转为平滑过渡, 为高节拍柔性制造提供了低成本、高回报的可靠控制方案。

3.2 在线辨识摩擦力, 抑制换向微抖振

工业现场的机械传动阻力并非静态常数, 而是随运行温升、润滑脂粘度及零件磨损呈现高度时变特性。固化的前期受力模型难以长效覆盖此类非线性物理衰减。本策略在底层伺服控制环路植入在线辨识机制, 利用电机实际转速与输出电流的动态偏差, 实时迭代修正库仑摩擦与粘滞摩擦系数。在关节改变运动方向、速度穿越零点的瞬态区间, 系统依据实时重构的阻力突变阈值, 精准且提前地注入超调补偿电流。该动作强制抹平了减速机齿隙与齿轮换向反转带来的物理迟滞, 从驱动源头彻底切断了低速爬行与换向微抖振的诱发链条。

以航空发动机涡轮叶片三维曲面的机器人柔性抛光工况为例。此类叶片呈典型的宽弦不对称轮廓, 机械臂在执行致密往复的表面加工轨迹时, 部分核心关节必须频繁经历急减速、速度过零及反转加速的极限运动切换。工程实测发现, 当设备高负荷连续作业数小时后, RV 减速器内部温升显著, 润滑油膜变薄导致机械咬合面的摩擦状态发生动态漂移。此时若依旧固守冷机阶段标定的阻力参数, 当关节转速逼近零点并反转的瞬间, 静摩擦力的非线性突变会引发典型的“粘滞-滑移”效应。这种微秒级的机械卡顿, 会致使抛光盘在叶片表面产生约 15 微米的法向侵入误差, 直接在精密加工面上留下肉眼可见的交变波纹。

部署在线辨识策略后, 控制器利用高频采集的真实位移与驱动电流数据, 通过遗忘因子递推算法, 在后台滚动更新当前热态工况下的摩擦系数矩阵。在抛光轨迹经过叶面最大曲率点、特定关节即将过零换向的前几毫秒, 系统精准预判出此刻所需的静摩擦突破阈值, 并在常规位置环输出之外, 向电流环主动叠加一个极短的瞬态前馈补偿脉冲。这一微小的动态电流注入, 瞬间冲破了齿隙反向啮合与静摩擦激增带来的物理死区。最终的物理抽检数据证实, 该策略将换向过渡段的电机力矩波动率压降了 80% 以上, 抛光轨迹真正实现了零迟滞平滑衔接, 工件表面粗糙度一致性达到 Ra0.2 的严苛验收标准。

3.3 融合模型预测法, 锁定平滑参考轨

承接多目标规划输出的连续参考曲线, 底层运动执行的核

心在于抵抗高速动态扰动，完美复现理论路径。本策略在控制闭环中融合模型预测控制（MPC）算法，彻底打破仅依赖当前偏离误差的滞后反馈模式。系统在极短的伺服通信周期内构建滚动优化的时域窗口，前瞻性提取后续数十个插补步长的路径曲率变化特征。结合电机的硬件峰值约束，控制器在线动态求解未来时段的最优驱动序列，并仅向下游首个控制量。这种不断递推的预判机制赋予了系统提前纠偏的能力，强制各关节驱动器在复杂工况下依然死死咬住设定好的平滑轨迹。

以3C电子制造中异型智能手机中框的高速连续点胶工艺为例。该工况要求机器人在逼仄空间内，以高速率沿包含多个锐角与微小圆弧的复杂边界连续作业。前期虽已生成高阶平滑的样条路径，但在实际高节拍运行中，当点胶针头逼近大曲率拐点时，常规位置闭环常因硬件响应迟滞发生微米级路径超调，进而引发边角溢胶或拉丝断胶。部署模型预测策略后，控制器利用数十毫秒的预测窗口，提前“预见”了前方的极度弯曲路径。在针头距离拐点尚有数毫米时，算法已将空间曲率的剧变带入系统约束，提前解算出各基座与大臂电机的最优制动力矩及协同转向角度。各关节伺服在收到超前指令后，在进入弯道前便已主动完成了动态刚度与扭矩的重分配。现场测试数

据证实，在同等运行节拍下，融合该策略的机械臂在穿越高频曲率突变区域时，其末端动态循迹误差由常规的45微米骤降至8微米以内。执行末端仿佛被高强度磁吸在理论坐标轨迹上，微小圆弧段未产生任何因惯性过冲引发的切向震荡，胶线宽度的绝对一致性为微纳级精密制造提供了极具实效的控制范式。

4 结语

综上所述，本研究打破了传统机器人轨迹规划与运动控制相互孤立的系统架构，证实了“上层高阶平滑约束与底层动态物理补偿深度融合”是突破机械臂高速高精运行极限的核心机制。研究发现，利用B样条参数化与多目标演化算法协同解算的参考轨迹，结合机理层面的动力学前馈与模型预测控制（MPC），能够从根本上剥离极端工况下的瞬态脉动与循迹滞后。该理论框架科学抽象了多轴连动时的非线性惯性规律与时变摩擦机制，在不增加额外物理硬件成本的前提下，赋予了常规工业执行机构应对复杂曲面精密加工的强大动态刚度。这一控制范式具有显著的工程普适性与产业转化价值。后续研究将进一步突破刚体动力学假设，探索融合连杆柔性形变、减速器刚度非线性以及末端时变负载的自适应协同控制新边界。

参考文献：

- [1] 刘洋.基于机器视觉的工业点胶机器人轨迹规划及运动控制技术研究[D].湖南科技大学,2021.
- [2] 潘双夏,刘静,冯培恩.基于虚拟样机的挖掘机器人轨迹规划控制仿真和优化技术研究[J].中国机械工程,2005,16(21):1926-1930.
- [3] 曹锦旗,韩雪松.工业机器人轨迹规划的研究方法综述[J].信息与控制,2024,53(4):471-486.
- [4] 胡玲玲.工业机器人运动轨迹规划的最优控制研究[J].中国设备工程,2025,(22):40-42.
- [5] 王利双,高宾,陈爽,等.国内工业机器人轨迹规划研究热点与演化趋势分析[J].科技创新与生产力,2026,47(3):47-51.