

# 自动化生产线中机械臂的轨迹规划与精度提升方法

叶雷

长沙威沃机械制造有限公司，湖南长沙，410000；

**摘要：**在制造业自动化程度持续提升的背景下，机械臂作为生产线核心设备，其运行效率与作业精度对生产节奏和产品质量至关重要。轨迹规划以效率为核心导向，通过优化路径与运动时序缩短作业时间，同时需规避障碍物保障安全，关节空间、笛卡尔空间规划及智能算法为核心方法。机械臂精度受机械结构特性、控制算法性能及外部环境因素制约，关节间隙、算法适应性不足、温度波动等均会导致精度下降。通过优化机械结构设计、改进控制策略、应用环境适应与补偿技术，可有效提升机械臂精度，以适应复杂生产场景需求。

**关键词：**自动化生产线；机械臂；轨迹规划；精度控制；性能优化

**DOI：**10.69979/3041-0673.26.01.066

## 引言

当前制造业自动化程度不断提升，机械臂作为生产线核心设备，其运行效率与作业精度关乎生产节奏与产品质量。复杂生产环境下，机械臂需在多障碍空间完成高精度操作，现有轨迹规划方法在适应性与效率上存在不足，精度易受多种因素干扰。研究更优的轨迹规划方式与精度提升手段，对推动生产线智能化、提高生产效益具有重要意义，这也是本研究的核心目标。

## 1 明确自动化生产线轨迹规划目标

### 1.1 以效率为导向的轨迹规划基础

在自动化生产线的连续运转体系中，效率是轨迹规划的核心导向。批量生产场景下，机械臂单次作业时间的缩短直接关联整体产能提升。轨迹规划需摒弃冗余路径设计，在起点与终点间构建最短路径架构。这不仅要求规划算法对空间路径进行精确计算，还需在运动时序上进行优化。通过合理分配加速、匀速与减速阶段，避免因加速迟缓或减速过早造成时间损耗。以流水线上的物料分拣作业为例，高效轨迹规划能确保物料快速流转，防止因路径迂回导致的堆积，维持生产线流畅运行。

### 1.2 保障安全的轨迹规划策略

安全性是轨迹规划不可逾越的底线。生产线空间往往布满设备、工装夹具等障碍物，机械臂运动轨迹必须严格规避这些潜在风险点。规划前期需对工作空间进行精准建模，明确障碍物的具体位置与边界范围，使生成的轨迹始终处于安全区域内。对于动态障碍物，如持续运转的传送带，轨迹规划系统需具备实时感知与动态调整能力。通过传感器实时监测障碍物位置变化，结合预设算法及时修正运动轨迹，确保机械臂在复杂动态环境

中安全作业，避免因碰撞导致设备损坏或生产中断。

### 1.3 能耗较高且能效比低

尽管自动化技术在提升生产效率、保证产品质量方面贡献显著，但当前的设备在运行过程中往往存在能量转换效率不高、能量消耗过大的问题。部分机械在设计时过度追求功能的多样性和复杂性，未充分优化能源利用方案，导致运行中能量浪费突出。具体表现为：非平滑运动曲线造成关节驱动系统功率频繁波动，冗余路径规划产生无效能耗，且输出参数未根据负载特性动态适配，进一步降低能量利用效率。这些问题直接增加了生产能耗成本，限制了机械臂在节能型高效生产场景中的应用效能。

## 2 分析机械臂轨迹规划核心方法

### 2.1 关节空间轨迹规划原理与应用

关节空间轨迹规划主要是通过控制机械臂各个关节的角度变化，来实现末端执行器的运动轨迹。这种方法的核心是利用数学公式（通常是多项式函数）来描述关节角度如何随时间变化。工程师需要设定关节的起始和终止角度、速度和加速度等条件，然后通过计算得到多项式的具体参数，最终生成平滑的关节运动曲线。这种规划方法的优点是计算相对简单，能够有效避免关节运动超出允许范围，从而保证机械臂的安全性和可靠性。以四自由度码垛机械臂为例，在自动化仓库的简单物料搬运任务中，机械臂的任务是将货物从暂存区搬运到指定货架位置。在这种情况下，关节空间轨迹规划能够高效地完成任务，因为它不需要严格限定末端执行器的运动路径，只需关注关节的运动即可。这种方法不仅提高了作业效率，还降低了因运动参数设置不当导致的碰撞或损坏风险。

## 2.2 笛卡尔空间轨迹规划的特点与适用场景

笛卡尔空间轨迹规划重点放在末端执行器在三维空间中的位置和姿态控制上。它直接定义末端执行器的运动路径，确保作业精度。其规划流程通常有三个关键步骤：首先，根据生产工艺要求确定末端执行器的运动路径，比如直线、圆弧或者根据 CAD 模型生成的复杂曲线；其次，把规划的路径分成一系列有精确坐标的目标点；最后，通过机械臂运动学逆解，算出各个关节对应这些目标点的角度值。运动学逆解是将末端位姿转换为关节角度的关键过程。在实际工业应用中，不同形状的笛卡尔路径对应不同的作业场景。直线轨迹常用于电子元件的拾取与放置任务，在 SMT（表面贴装技术）生产线上，机械臂需要以微米级的精度把电子元件从供料器转移到 PCB（印刷电路板）的指定焊盘位置。而圆弧轨迹广泛应用于曲面焊接领域，例如汽车车身的圆弧焊缝焊接作业，通过精确控制末端焊枪沿圆弧路径运动，能确保焊接质量的一致性和稳定性。笛卡尔空间轨迹规划凭借对末端路径的精准控制能力，成为满足高精度装配、精密焊接等复杂生产任务的关键技术。

## 2.3 智能算法辅助轨迹动态调整

在生产线频繁换产或环境复杂的场景中，传统轨迹规划方法调整慢、适应性差。智能算法的应用能让机械臂轨迹规划更灵活高效。当生产任务变化时，智能算法不需要人工重新设置参数，能自动根据新任务要求快速生成合适的运动路径。它可以实时收集机械臂的运动参数、周围障碍物位置、负载大小等信息，通过计算不断优化路径。比如在有固定设备和移动传送带的车间里，机械臂能通过智能算法实时感知障碍物的变化，自动调整运动的速度、加速度和路径上的关键节点，既保证不会发生碰撞，又能缩短完成作业的时间。同时，结合实时传感技术后，智能算法能根据机械臂实际运动中的偏差数据，及时修正路径，让机械臂在半导体封装、精密焊接等高精度作业中保持稳定的高质量表现。

## 3 探究影响机械臂精度的关键因素

### 3.1 机械结构特性对精度的制约

机械臂的机械结构特性是影响精度的基础因素。关节处的间隙会让运动出现滞后，当机械臂改变运动方向时，间隙会使末端产生定位偏差，影响作业的准确性。在长期使用后，关节轴承磨损会增大间隙，导致精度下降。连杆的弹性形变在有负载时更明显，尤其是长连杆结构，在末端负重时容易发生形变，导致实际位置和理论位置不一样。当机械臂搬运较重工件时，连杆的微小

形变会被放大，影响末端定位。材料的热变形也不能忽视，环境温度变化会使连杆长度发生细微改变，这些微小变化积累起来，会对机械臂整体精度产生明显影响，降低作业精度。在高温车间，机械臂长时间运行后，材料热胀冷缩会导致轨迹偏差。

### 3.2 控制算法性能对精度的影响

控制算法的好坏直接决定精度控制效果。传统控制算法对系统模型的依赖很强，当机械臂参数变化或受到外界干扰时，控制精度会大幅下降。随着机械臂部件磨损，其动力学参数发生改变，传统算法难以适应。传感器作为反馈环节的关键部件，其测量精度很重要，位置传感器的误差会直接传到控制环节，导致控制量计算出现偏差，影响机械臂运动精度。编码器的测量误差会累积到末端定位中。执行器的响应延迟，比如电机的动态滞后，会使实际运动和指令不同步，造成轨迹跟踪误差，降低机械臂作业精度。在高速运动时，电机响应延迟对精度的影响更为显著。

### 3.3 外部环境因素对精度的干扰

外部环境因素是影响机械臂精度的重要变量。温度波动会改变机械部件的配合间隙和材料特性，破坏运动稳定性，导致精度下降。在昼夜温差大的车间，机械臂早晨和午后的精度表现存在明显差异。振动源，比如相邻设备的运转，会通过地面或机架传到机械臂上，引起末端抖动，影响作业精度。冲压车间的大型设备运转产生的振动，会干扰周边机械臂的装配精度。在高速运动场景中，气流扰动特别明显，可能导致轻质末端执行器偏离预定轨迹。当机械臂以每秒 2 米的速度运动时，气流对末端吸盘的作用力不可忽视。粉尘、湿度等环境因素会加快部件磨损，间接降低机械臂长期运行的精度，对生产质量产生不利影响。在粉尘较多的车间，机械臂关节磨损速度明显加快。

## 4 提出机械臂精度提升的有效措施

### 4.1 机械结构设计的优化方向

优化机械结构是提升精度的基础。材料选择上，采用高刚性材料制作连杆和关节，减少机械臂负重时的变形，增强整体稳定性。加工装配环节，通过精密工艺和严格标准缩小关节间隙，搭配高精度轴承、减速器等部件，减少运动中的松动误差。关键部件采用轻量化设计，在保证硬度的前提下减轻重量，降低运动惯性和冲击，让机械臂更快更准地到达目标位置。同时优化结构布局，缩短力臂并采用对称式连杆设计，从结构上减少外力导

致的变形，提升运动时的精度稳定性。

#### 4.2 控制策略的改进方法

改进控制方式是提升机械臂精度的核心环节。通过引入自适应控制程序，系统能实时监测机械臂运行中的参数变化及外界干扰因素，如部件磨损、负载变化等，自动调整运行参数以维持稳定精度，避免因环境或设备状态波动产生定位偏差。采用提前控制策略优化动作响应，通过预设运动轨迹分析，提前计算各环节所需动力输出，有效弥补电机等执行部件的动作延迟问题，确保机械臂严格按预定路径运动。同时结合视觉识别与力度感应技术构建闭环控制体系，实时采集末端执行器的实际位置数据，与目标位置进行动态比对，根据偏差值持续修正运行指令，实现对轨迹的高精度跟踪，保障在复杂生产场景中完成精准作业任务。

#### 4.3 环境适应与补偿技术应用

做好环境适应与补偿是减少外部因素对机械臂精度干扰的关键。温度方面，通过在机械臂上安装温度感应装置与自动补偿模块，实时捕捉环境及设备自身的温度波动，系统会依据温度变化数据自动调整运动参数，精准抵消因热胀冷缩导致的结构变形误差，保障温度变化时的运行精度。振动控制上，安装主动减震设备，如压电陶瓷减震器，它能敏锐感知外界振动源传递的能量，同步产生反向作用力形成抵消，有效阻断振动对机械臂的影响。针对高速运动场景，专门优化末端执行器结构，通过流线型设计降低气流扰动带来的偏移，维持运动稳定性。同时建立定期校准机制，利用激光跟踪仪等高精度设备测量误差数据，构建专属误差修正模型，确保机械臂长期稳定保持高精度运行状态。

### 5 展望机械臂技术发展方向

#### 5.1 轨迹规划的智能化演进趋势

未来机械臂的轨迹规划将更加智能自主。通过机器视觉与智能学习技术的结合，机械臂能快速识别工件的形状和表面特点，像人类学习一样通过不断尝试优化运动路径，不再需要人工预先设置参数。在动态环境中，借助激光和雷达感知设备，机械臂能实时发现工件位置的细微变化，遇到障碍物时可在极短时间内重新规划路径，大幅提升生产线的灵活性，更好满足汽车零部件定制、电子产品小批量生产等多样化需求。

#### 5.2 精度提升技术的突破方向

机械臂的精度控制正朝着更高标准发展。通过先进

测量技术的应用，定位精度将从传统的微米级别提升到纳米级别，在芯片制造、微型电子元件生产等领域，能实现原子级别的精密操作。多种传感技术的融合将构建更敏锐的感知系统，通过视觉精准识别边缘、力度精细感知压力、触觉判断表面光滑度，形成综合决策能力。在航空发动机叶片打磨等高精度作业中，机械臂可根据实时感知数据调整操作，确保加工表面达到镜面级精度，进一步拓展在精密制造领域的应用。

#### 5.3 机械臂与生产线的协同优化发展

机械臂与生产线的协同优化是智能制造的关键。通过数字虚拟技术，可在电脑中构建与实际生产线一致的虚拟系统，对机械臂的运动轨迹进行大量模拟优化，从而缩短实际调试时间。在汽车焊接生产线上，虚拟系统可提前验证焊接顺序和路径，有效减少设备碰撞风险。同时，结合物联网技术，在机械臂关键部位安装振动、温度、电流等传感器，实时收集运行数据并上传至管理平台，构建全生命周期的健康管理体系，实现对机械臂的实时监控与维护，确保其长期稳定运行。

### 6 结语

自动化生产线中机械臂的轨迹规划与精度提升是提升生产效能的关键。明确规划目标、分析核心方法为轨迹优化奠定基础，探究影响因素并提出提升措施为精度控制提供路径。未来，随着智能化、高精度技术的发展，机械臂将更灵活、精准地适应复杂生产需求，与生产线协同更紧密，推动制造业向更高质量、更高效率方向发展，为工业智能化升级提供有力支撑。

### 参考文献

- [1] 魏兴田.磷化工自动化生产机械设备设计优化[J].自动化应用,2025,66(S1):342-344+348.
- [2] 唐德权.基于物联网技术的食品生产机械自动化设计与制造分析[J].中外食品工业,2025,(12):40-42.
- [3] 姚玉财.自动化技术在玉米生产机械装备中的应用[J].中国农机装备,2024,(09):35-37.
- [4] 彭晨曦.自动化技术在玉米生产机械装备中的应用[J].中国农机装备,2024,(06):84-86.
- [5] 马哈木提江·米吉提,郭君.白酒企业生产机械自动化技术发展研究[J].中国酒,2023,(12):52-53.

作者简介：叶雷（1990.09-），男，汉族，湖南益阳，工程师，本科学历，主要研究工程机械行业的工艺方面。