

# 柔性机械臂的力-位混合控制及其在精密装配中的应用

凤泽元

上海大学机电工程与自动化学院, 上海市, 200444;

**摘要:** 本文聚焦柔性机械臂力-位混合控制展开研究, 以兼顾力精度与位精度的协同控制为核心, 通过任务空间正交分解法将工作空间划分为力控制与位置控制子空间, 构建“感知-算法-执行”闭环设计。研究结合多传感器融合、混合控制算法及执行机构优化保障系统鲁棒性, 并以精密装配为应用场景, 提出基于任务阶段的力-位子空间动态划分、面向公差的协同补偿及应对参数不确定性的鲁棒自适应控制策略, 通过航空发动机涡轮叶片装配等实例验证, 实现复杂工况下力与位置的高效协同控制。

**关键词:** 柔性机械臂; 力-位混合控制; 精密装配

**DOI:** 10.64216/3080-1508.25.11.031

## 1 柔性机械臂的力-位混合控制概述

### 1.1 兼顾“力精度”与“位精度”的协同控制

柔性机械臂的力-位混合控制, 以兼顾力精度与位精度的协同控制需求为核心导向, 旨在解决传统机械臂在刚性环境中因位置控制刚度过强而产生过大冲击力、易造成设备损伤或装配失效等关键问题, 同时满足复杂工况下高精度位置与力的双重控制要求。其核心思路是将机械臂的工作空间分解为力控制子空间与位置控制子空间, 通过任务空间的正交分解法在特定方向上精准控制接触力, 在另一方向上稳定控制运动位置, 最终实现力与位置的高效协同控制。

### 1.2 从感知到执行的闭环设计

力-位混合控制的闭环设计涵盖传感器感知、混合控制算法与执行机构驱动三大核心环节, 形成从环境感知到动作执行的完整决策与反馈链条, 以保障系统在复杂动态环境中稳定、高效运行。

其中从感知到执行闭环的第一步是实施多传感器融合, 结合六维力传感器、编码器、视觉系统等采集丰富多元的环境与状态信息, 再结合混合控制算法(包括动态调整机制与约束条件判断)进行精细化控制决策。

在执行机构优化方面, 需开展柔性关节结构设计以及高精度驱动器性能优化, 保障控制指令的快速响应与动作输出的平稳性, 提升系统对复杂环境的适应能力。

在闭环稳定性保障方面, 需验证控制算法在参数不确定与外部扰动作用下的稳定性, 同时针对模型误差和随机干扰设计自适应动态调整策略, 实时修正控制参数, 显著提升系统整体鲁棒性。

## 2 柔性机械臂的力-位混合控制在精密装配中的应用

### 2.1 基于装配任务阶段的“力-位子空间动态划分”

在柔性机械臂力-位混合控制的实践应用环节, 需基于装配任务的不同阶段做好力-位子空间的动态划分, 期间需将装配任务明确划分为接触前定位、接触过渡、稳态装配三个关键阶段, 每个阶段对应差异化的子空间划分策略。

#### 2.1.1 接触前定位

接触前定位阶段以位置控制为主导, 通过正运动学模型将目标位置转换为关节空间参数, 再利用编码器实时反馈构建闭环位置控制环路, 此时需控制环境交互阻尼保持最小值, 以避免机械臂与工件发生意外碰撞。

例如, 航空发动机高压涡轮叶片与轮盘榫槽装配任务需严格拆解为接触前定位、接触过渡、稳态装配三个阶段, 每个阶段均需围绕机械臂与榫头、榫槽的交互状态, 制定差异化的子空间控制策略, 确保各阶段衔接无冲突、控制精度达标。接触前定位阶段以机械臂的位置控制为主导, 工作人员需先通过激光测量仪获取轮盘榫槽的三维坐标( $X=285\text{mm}$ 、 $Y=312\text{mm}$ 、 $Z=400\text{mm}$ )与叶片榫头的目标插入起始位置坐标( $X=285\text{mm}$ 、 $Y=312\text{mm}$ 、 $Z=420\text{mm}$ ), 再利用机械臂的正运动学模型将这两组目标位置转换为机械臂6个关节的角度参数(关节1为 $25^\circ$ 、关节2为 $50^\circ$ 、关节3为 $-20^\circ$ 、关节4为 $5^\circ$ 、关节5为 $65^\circ$ 、关节6为 $12^\circ$ ), 随后启动每个关节配备的高精度编码器, 让编码器以 $1\text{kHz}$ 的频率实时采集当前关节角度并传输至控制系统, 构建闭环位置控制环路。

## 2.1.2 接触过渡

接触过渡阶段则需启动力-位混合控制模式，通过六维力传感器实时监测接触力变化，结合任务空间的正交分解矩阵将接触力投影至指定自由度，同时关闭该方向的位置控制环路转而采用阻抗模型调节接触力大小，其他自由度仍维持高精度位置控制。

例如，工作人员需先通过安装在机械臂末端的六维力传感器（测量精度 $\pm 0.2N$ ），实时监测榫头与榫槽首次接触时的力变化数据，当传感器检测到法向（Z轴方向）接触力从0N跃升至5N时，控制系统会自动调用任务空间的正交分解矩阵，将该接触力精准投影至Z轴自由度，同时立即关闭Z轴方向的位置控制环路，转而采用阻抗模型（刚度系数设定为150N/m、阻尼系数设定为8N·s/m）调节接触力大小，确保Z轴方向的接触力以2N/s的速率平稳上升至30N。

## 2.1.3 稳态装配阶段

稳态装配阶段要求根据装配类型动态调整子空间划分，例如过盈配合时需在接触面法向保持力控制、切向维持位置控制以防止工件滑动，间隙配合时则需在接触面所有方向启动力控制，通过动态阻抗参数调节实现柔顺装配；该阶段的划分需通过离线仿真验证各阶段转换的衔接条件，确保动态切换过程的平滑性与连续性。

例如，工作人员需在接触面法向（Z轴）保持力控制，通过力传感器实时反馈数据，将法向接触力稳定控制在50 $\pm 5N$ 范围内，确保榫头能以1mm/s的速度平稳压入榫槽，同时避免因力过大导致榫槽产生塑性变形；而在接触面切向（X轴与Y轴）维持位置控制，通过视觉系统（分辨率为0.001mm）实时采集榫头与榫槽的对齐数据，将X轴与Y轴的位置偏差控制在 $\pm 0.002mm$ 以内，防止榫头在压入过程中发生滑动；在进入稳态装配前，工作人员需通过MATLAB/Simulink搭建离线仿真模型，模拟从接触过渡阶段到稳态装配阶段的转换过程，验证当法向接触力达到30N、位置偏差小于0.003mm时的衔接条件。

## 2.2 面向装配公差的“力-位协同补偿”

### 2.2.1 公差带建模与参数提取

面向装配公差的力-位协同控制，是精密装配中保障装配质量的至关重要环节，工作人员需围绕公差带特征构建动态调整机制，通过力与位置的协同控制补偿因零件尺寸偏差、定位误差等因素导致的装配间隙或过盈

问题。期间，需完成公差带建模与参数提取，基于装配图纸的公差标注构建三维公差模型，将公差范围精确映射至机械臂的任务空间坐标系；其中需通过离线仿真分析公差对装配力的影响规律，例如线性尺寸公差会导致接触面法向间隙变化，位置度公差会引发切向偏移，进而确定力控制与位置控制的补偿优先级——当公差主要影响接触力时优先启动力控制补偿，当公差导致位置偏移时则强化位置控制调整；此阶段需完成公差参数的数字化表达，将公差带边界转化为控制系统的约束条件，为后续协同补偿提供量化基准。

例如，工作人员需基于装配图纸的公差标注，使用SolidWorks软件构建榫头与榫槽的三维公差模型，将榫槽宽度公差0.01–0.02mm、榫头厚度公差0.008–0.018mm精确映射至机械臂的任务空间坐标系（X轴对应榫槽宽度、Y轴对应榫槽长度、Z轴对应装配深度）；随后通过ADAMS软件进行离线仿真，分析不同公差参数对装配力的影响规律，仿真结果显示：当榫槽宽度处于公差上限（0.02mm）、榫头厚度处于公差下限（0.008mm）时，会导致X轴方向的接触面间隙达到0.012mm，进而使X轴方向的接触力降低至20N（低于设计要求的40N），而当位置度公差超出 $\pm 0.005mm$ 时，会引发Y轴方向的切向偏移，导致榫头与榫槽的对齐偏差达到0.007mm；基于此仿真结果，工作人员需确定力控制与位置控制的补偿优先级——当公差偏差主要影响接触力（如X轴间隙导致力不足）时，优先启动力控制补偿，当公差偏差导致位置偏移（如Y轴对齐偏差）时，则强化位置控制调整；同时，工作人员需将公差带边界转化为控制系统的约束条件，例如将X轴接触力的公差允许范围设定为40–60N、Y轴位置偏差的公差阈值设定为 $\pm 0.005mm$ ，为后续协同补偿提供量化基准。

### 2.2.2 协同补偿的动态分配机制

协同补偿的动态分配机制是保障控制效果的关键环节，工作人员需通过实时监测装配状态动态调整力与位置的控制权重，期间需通过六维力传感器与视觉系统的融合感知持续采集接触力与装配位置的偏差数据，并将其与公差模型进行比对分析。当检测到接触力超出公差允许范围时，控制系统需自动降低该方向的位置控制权重，同时增强力控制环的响应速度，通过阻抗模型动态调整接触力使其回归公差带内；当位置偏差超过公差阈值时则需暂停力控制调整，优先通过位置闭环修正机械臂姿态，确保装配接口精准对齐。在动态分配过程中

需引进优先级切换逻辑, 预设力控制与位置控制的切换阈值, 当地偏差与位置偏差同时存在时, 根据装配工艺要求决定补偿顺序, 避免力-位控制冲突导致系统震荡。

例如, 工作人员需将六维力传感器(采样频率 2kHz)与视觉系统(采样频率 1kHz)的数据进行融合, 持续采集 X 轴方向的接触力数据与 Y 轴方向的装配位置偏差数据, 并将其与预设的公差模型进行实时比对分析; 当力传感器检测到 X 轴接触力仅为 35N(低于公差允许范围的下限 40N)时, 控制系统会自动降低 X 轴方向的位置控制权重(从 0.8 降至 0.3), 同时增强 X 轴力控制环的响应速度(从 0.5s 降至 0.2s), 通过阻抗模型将 X 轴方向的刚度系数从 150N/m 上调至 200N/m, 动态调整接触力使其在 0.5s 内回升至 45N(处于公差带内)。

## 2.3 应对装配参数不确定性的“鲁棒自适应控制”

### 2.3.1 扰动分析

在精密装配过程中, 工作人员需实施应对装配参数不确定性的鲁棒自适应控制, 实现力-位混合控制对环境变化的实时响应与调整。工作人员需进行不确定性建模与参数初始化, 针对装配过程中可能出现的参数波动建立动态模型, 将不确定性因素划分为可观测的外部扰动与不可观测的内部扰动, 基于模型参考自适应控制理论设计控制框架。

例如, 工作人员需先进行不确定性建模与参数初始化, 针对装配过程中可能出现的参数波动建立动态模型, 将不确定性因素划分为可观测的外部扰动与不可观测的内部扰动——可观测的外部扰动包括榫槽表面油污导致的摩擦系数变化(实测摩擦系数范围为 0.15~0.35)、压缩空气压力波动导致的机械臂末端振动(振幅范围为 0.001~0.003mm), 这些扰动可通过力传感器与视觉系统直接监测; 不可观测的内部扰动包括机械臂关节轴承磨损导致的传动效率波动(传动效率范围为 95%~98%)、伺服电机温漂导致的输出扭矩偏差(扭矩偏差范围为 ±2%), 这些扰动无法通过直接测量获取; 基于模型参考自适应控制理论, 工作人员需搭建控制框架, 以理想装配状态(摩擦系数 0.25、传动效率 97%、无振动与扭矩偏差)下的力-位响应曲线为参考模型, 将实际装配过程中的力-位数据与参考模型进行比对, 为后续自适应调整提供依据。

### 2.3.2 设定基础控制参数

初始化阶段则需设定基础控制参数, 包括初始阻抗

刚度、阻尼系数以及自适应调整速率的上限与下限, 这些参数需通过离线仿真确定其稳定性边界, 确保系统在初始状态下具备基本的鲁棒性, 同时为后续在线调整预留充足空间。鲁棒自适应控制的动态调整机制是关键所在, 需通过实时监测系统运行状态、评估力与位置的动态特征, 并动态修正控制参数以抵消不确定性影响。

### 2.3.3 误差调控

控制系统需持续采集力传感器与位置传感器的反馈数据, 结合模型预测结果计算当前控制误差, 并通过误差分类算法区分误差来源——若误差主要由可观测扰动引起则采用前馈补偿策略, 直接调整控制输入以抵消扰动影响; 若误差源于不可观测因素则启动自适应调整模块, 根据误差变化趋势动态修正阻抗参数, 确保系统在参数不确定环境下仍能保持稳定的控制性能。

## 3 结语

总体来说, 本文通过对柔性机械臂力-位混合控制的研究, 揭示了任务阶段划分、公差补偿与鲁棒自适应控制在精密装配中的协同作用机制。研究表明, 动态子空间划分能实现不同装配阶段的精准控制切换, 力-位协同补偿可有效消解零件公差带来的装配偏差, 鲁棒自适应策略则为参数不确定性提供了稳定解决方案。这些控制策略不仅丰富了柔性机械臂的控制理论, 更为航空航天等领域的高精度装配提供了可推广的技术范式, 未来可进一步探索多机械臂协同场景下的力-位控制优化。

## 参考文献

- [1] 王逍, 陆志国, 李文翘. 基于关键关节的机械臂力/位混合控制仿真[J]. 控制工程, 2025, 32(09): 1687-1692+1717. DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.20220900.
- [2] 畅博彦, 高宇晗, 金国光, 等. 基于 Kresling 折纸的力位组合约束可展支撑机构动力学[J/OL]. 机械工程学报, 1-12 [2025-10-14]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2187.TH.20250815.1723.038>.
- [3] 孙晓旭, 吕华伟, 钱进, 等. 基于最优力位综合度的拖拉机耕深控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 1-14 [2025-10-14]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1964.S.20250716.0952.002>.

作者简介: 凤泽元(1996.09—), 男, 汉族, 上海市, 硕士研究生学历, 助理工程师, 研究方向: 具身智能、人机协作控制, 单位: 上海大学机电工程与自动化学院。