

晶圆搬运机械臂运动建模与逆动力学控制仿真

胡培岩, 纪玉杰

沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年12月8日; 录用日期: 2026年1月1日; 发布日期: 2026年1月8日

摘要

晶圆搬运机械臂是半导体生产设备的重要组成部分, 针对晶圆搬运机械臂在高精度轨迹跟踪和快速响应方面的不足, 本文围绕其传动方案与控制问题展开研究。首先, 综合比较多种传动方案在启动负载、布置紧凑性及洁净性能等方面特性后, 优选带传动作为机械臂的传动方案, 以有效降低前端关节惯量并满足洁净环境下的晶圆搬运需求。然后, 利用SolidWorks建立机械臂的三维模型, 采用拉格朗日方法建立机械臂的动力学模型并推导逆动力学方程, 在此基础上设计相应的逆动力学控制律。最后, 在Simulink平台上搭建晶圆搬运机械臂仿真系统, 对典型轨迹跟踪工况进行仿真验证。仿真结果表明, 所提出的传动方案与控制方法就具有较好的轨迹跟踪精度和动态响应性能, 为晶圆搬运机械臂的工程设计与优化提供了参考。

关键词

晶圆机械臂, 三维模型, 动力学建模, 逆动力学控制

Motion Modeling and Inverse Dynamics Control Simulation of Wafer Handling Robotic Arm

Peiyang Hu, Yujie Ji

School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

Received: December 8, 2025; accepted: January 1, 2026; published: January 8, 2026

Abstract

The wafer handling robotic arm is a key component of semiconductor production equipment. To address the shortcomings of the wafer transport robotic arm in high-precision trajectory tracking and fast response, this paper focuses on its drive system and control issues. First, after comprehensively comparing various drive schemes in terms of startup load, compactness, and cleanliness

performance, the belt drive is selected as the preferred drive system for the robotic arm. This choice effectively reduces the inertia of the front joints and meets the wafer handling requirements in clean environments. Next, a three-dimensional model of the robotic arm is established using SolidWorks, and the dynamic model of the arm is derived using the Lagrange method to formulate the inverse dynamics equations. Based on this, the corresponding inverse dynamics control law is designed. Finally, a simulation system for the wafer handling robotic arm is built on the Simulink platform, and typical trajectory tracking conditions are simulated for verification. The simulation results show that the proposed drive system and control method provide good trajectory tracking accuracy and dynamic response performance, offering a reference for the engineering design and optimization of wafer handling robotic arms.

Keywords

Wafer Robotic Arm, 3D Model, Dynamic Modeling, Inverse Dynamics Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着半导体工艺向大尺寸晶圆、高集成度和高良率方向持续发展,生产线对晶圆搬运过程的洁净度、定位精度和节拍效率提出了愈加严苛的要求。晶圆搬运机械臂作为晶圆在各工艺模块之间转运的关键执行机构,其结构设计与控制性能直接影响整线产能及产品质量。因此,面向洁净环境下的高速、高精度晶圆搬运需求,开展具有轻量化、低惯量与优良动态性能的晶圆搬运机械臂研究有重要的工程应用价值[1][2]。在实际应用中,晶圆搬运机械臂常需在高速启停和频繁往返的工况下运行,对机械臂系统的轨迹跟踪精度、动态响应速度和稳定性提出了更高要求[2]。传统刚体假设下的动力学模型难以准确反映柔性钢带传动引入的弹性变形和振动放大效应,容易导致控制律设计偏离实际工况,不利于晶圆稳定搬运。钢带/绳传动等柔性传动形式在实现晶圆搬运机械臂轻量化与低惯量的同时,也导致了等效刚度时变、迟滞非线性及振动放大等问题,使传统刚体动力学模型与控制方法难以满足高速高精度搬运需求。基于更贴近实际的刚柔耦合动力学模型,结合平滑轨迹规划与逆动力学补偿控制进行联合优化,是提升晶圆搬运机械臂综合性能的有效途径。在此背景下,国内外研究人员围绕机械臂的建模与控制开展了大量探索[3]-[7]。Yanga C 等采用 PID 模糊控制抑制柔性机械臂的弹性振动,提高了压电柔性臂端的定位和控制精度[8]。张泽峰等针对 MAG8 直驱型真空机械手容易掉片的问题,结合机械手对传输精度及速度等参数的需求,开展了运动规划的研究,采用改进的 MDH 方法建立正、逆运动学模型与解析求解,使其计算过程更加精简。随后基于拉格朗日与牛顿-欧拉方法建立动力学模型,推导质量阵、科氏力阵与关节力矩传递关系,形成逆动力学求解与柔顺控制的计算框架。基于 MATLAB 仿真平台的实验结果表明,求解后的 MAG8 型机械手末端柔顺控制效果良好[9]。孙浩翔提出一种将模型预测控制(MPC)与雅可比零空间参数化结合的逆运动学求解框架,把逆运动学方程寻解问题转化为带约束的优化问题,经过优化求解将末端轨迹误差控制在一个较低范围内[10]。唐炫铭等则针对绳驱机械臂力学建模复杂的问题基于单关节进行受力分析,建立力与力矩的平衡公式,并进一步完成多关节的运动学仿真以验证运动学模型的准确性[11]。基于上述研究,本文围绕晶圆搬运机器人在高速、高精度工况下的运动分析与逆动力学控制方法展开研究,旨在构建更贴合柔性传动特性的动力学模型,并实现高精度、可实时性的控制策略设计。本研究不仅有助于完善晶圆搬运机器人的建模与控制理论体系,也为后续开展轨迹跟踪控制的实现与性能优

化奠定坚实基础, 从而推动晶圆搬运装备向高性能与高可靠性方向发展[12]-[14]。

2. 机械臂传动的选型和建模

在机械臂的传动结构设计中, 驱动方式分为集中式驱动和分散式驱动两种。分散式驱动是将每个驱动电机直接安装在机械臂的各个关节上, 使传动链最短、结构直观, 关节输出刚度和精度更好, 同时易于模块化扩展与维护。这种分布方式使机械臂的灵活性大大增强, 能够适应复杂的运动需求。然而, 驱动电机分布在每个关节上会显著增加机械臂的整体重量与惯性, 增加机械臂系统的能耗, 电机启动负载也随之提高。集中式驱动的机械臂则将驱动器统一分布到机械臂基座, 通过设计传动系统实现远程转矩传递。该驱动方式使得机械臂在设计环节时散热、维护、布线、驱动器布置更为方便。在电机启动时, 该设计也使机械臂前端的惯性降低, 使机械臂在高速运动、快速加减速和频繁往返动作中具备更好的动态性能与安全性。集中式驱动机械臂在柔性医疗机械臂、平面运料机械臂或协作机械臂等强调轻量化与柔顺性的场景, 可有效提升操作安全性。

集中式传动系统常见的传动方式包括钢带传动、同步带传动、差动机构以及传动轴等多种方案。其中, 钢带传动因材料密度低、质量轻、可实现灵活布置而在轻量化与低载荷机械臂中得到广泛应用, 尤其适合对执行臂惯量和动态性能要求较高的场合。同步带传动具有较高的传动效率与良好的载荷承载能力, 在需要稳定啮合和较大输出力矩的场景中具有优势。差动机构能够实现多自由度间的运动耦合与解耦, 传动链短、布局紧凑, 适用于多自由度冗余机械手的末端结构。传动轴则具备良好的扭矩传递能力和高结构刚度, 可为系统提供稳定的动力输出。

晶圆机器人的机械臂搬运作业对机械臂的轻量化、低惯量与高速平稳运动具有严格要求, 钢带传动相较同步带、传动轴及差动机构展现出更突出的综合优势。同步带虽然具有较高刚度, 但其带轮尺寸与带宽限制了布置的紧凑性, 并会增加前端关节质量, 不利于晶圆搬运中对高速与微振动抑制的要求; 传动轴虽具备优良扭矩输出能力, 但其较大的固有质量和空间需求使其难以满足轻质长臂结构的惯量限制; 差动机构则因耦合特性带来控制复杂度与误差叠加问题, 不适用于追求简洁运动控制与高洁净性的场景。相比之下, 钢带传动以其最小截面、极高路径可塑性和极低质量, 可有效降低前端关节惯量, 实现高速、低扰动的晶圆搬运轨迹, 同时保持传动链平顺、噪声低、粒子生成少等洁净优势, 因此对于驱动负载较低的晶圆输送机器人而言, 该方案是更为理想的选择, 其中, 机械臂的大臂部分通过轴套与电机输出端直接连接实现驱动, 而小臂则由传动轴带动钢带, 并通过钢带与小臂的关节相连, 从而完成小臂的运动传递, 传动方案如图 1 和图 2 所示。基于上述分析, 通过 SOLIDWORKS 建立晶圆输送机器人的三维模型如图 3 所示。

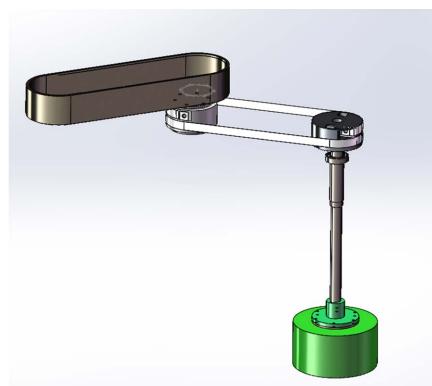


Figure 1. Transmission scheme of the robotic arm's forearm
图 1. 机械臂小臂的传动方案

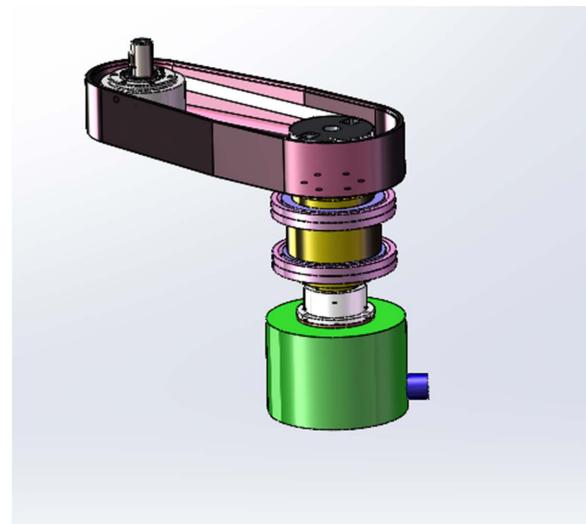


Figure 2. Transmission scheme of the robotic arm's primary arm
图 2. 机械臂大臂的传动方案

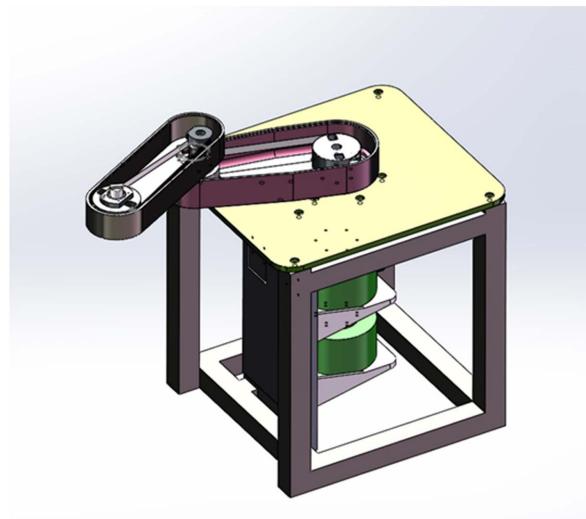


Figure 3. 3D model of the wafer handling robotic arm
图 3. 晶圆输送机械臂整机的三维模型

3. 机械臂的运动分析

将大臂与小臂均设计为 240 mm, 是在满足 300 mm 晶圆设备工作空间的前提下, 实现运动学对称性、结构刚度、动态响应、控制精度与制造可行性之间的最优工程折中。最终得出机械臂的 D-H 参数如表 1 所示。

Table 1. D-H parameters of the wafer handling robot arm
表 1. 晶圆输送机械臂的 D-H 参数表

臂杆 i	$q_i / {}^\circ$	d_i / mm	l_i / mm	$\alpha_i / {}^\circ$
l_1	-120~120	0	240	0
l_2	-60~60	0	240	0

其中, q_i 为关节角, d_i 为连杆偏移, a_i 为连杆长度, α_i 为连杆扭转角。

假设大臂的关节角度为 $q_1 = 30^\circ$, 小臂的关节角度为 $q_2 = 45^\circ$, 基于大小臂的角度变化对机械臂模型进行正运动学求解。

大臂的变换矩阵为:

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & a_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & a_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 30^\circ & -\sin 30^\circ & 0 & l_1 \cdot \cos 30^\circ \\ \sin 30^\circ & \cos 30^\circ & 0 & l_1 \cdot \sin 30^\circ \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

小臂的变化矩阵为:

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & -\sin 45^\circ & 0 & l_2 \cdot \cos 45^\circ \\ \sin 45^\circ & \cos 45^\circ & 0 & l_2 \cdot \sin 45^\circ \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

总变化矩阵即为各个关节变化矩阵的乘积, 则机器人末端腕部的齐次变换矩阵为:

$$\begin{aligned} T = A_1 A_2 &= \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & a_1 c_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & a_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_2 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2) & -\sin(q_1 + q_2) & 0 & l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_1 \cos q_1 \\ \sin(q_1 + q_2) & \cos(q_1 + q_2) & 0 & l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_1 \sin q_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

4. 基于 MATLAB Robotic Toolbox 的机械臂工作空间分析

机械臂工作空间的准确表征是晶圆输送系统结构设计与工艺布局的关键基础之一。传统的解析方法通常依赖对运动学方程的代数推导与不等式求解, 当机构自由度较多或存在复杂约束时, 解析求解较为困难, 且难以直接反映实际可达区域的空间分布特性。蒙特卡洛方法通过在关节空间内进行随机采样, 并借助正运动学方程将采样点映射到笛卡尔空间, 可以在不增加推导复杂度的前提下, 自然地考虑各类约束条件, 从统计意义上逼近机械臂的实际可达空间。与解析方法相比, 该方法具有实现简单、适用于任意结构和约束形式、易于仿真等优点。

在 MATLAB 软件中, 采用蒙特卡洛法, 经过多次试验, 得出了在随机抽样点设置为 50,000 的情况下, 出图效果和计算时间都比较合适, 并在运行后获得了机器人的工作空间的落点图。采用 Matlab Robotic 工具箱进行模拟仿真。

如图 4 和图 5 所示, Robotic toolbox 模型中大臂的长度为 240 mm, 大臂关节的转角范围 120° 旋转, 小臂的长度为 240 mm, 小臂关节转角范围为 60° , 本研究仅考虑两个旋转关节, 未对末端的移动关节和 Z 轴方向分析研究, 因此本次分析结果工作空间仅仅是一个类圆环形的图像。

首先基于拉格朗日方法, 建立平面二自由度刚性机器人的动力学方程, 首先分析机器人的势能方程, 机器人小臂可以看作柔性臂杆, 由于机器人样机全程水平于地面运动, 重力势能不纳入考虑范围内。

则机器人系统的总动能为:

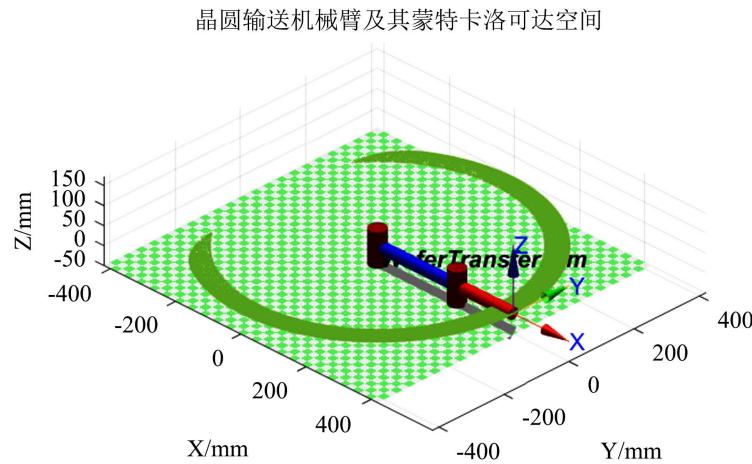


Figure 4. Robot workspace
图 4.机器人的工作空间

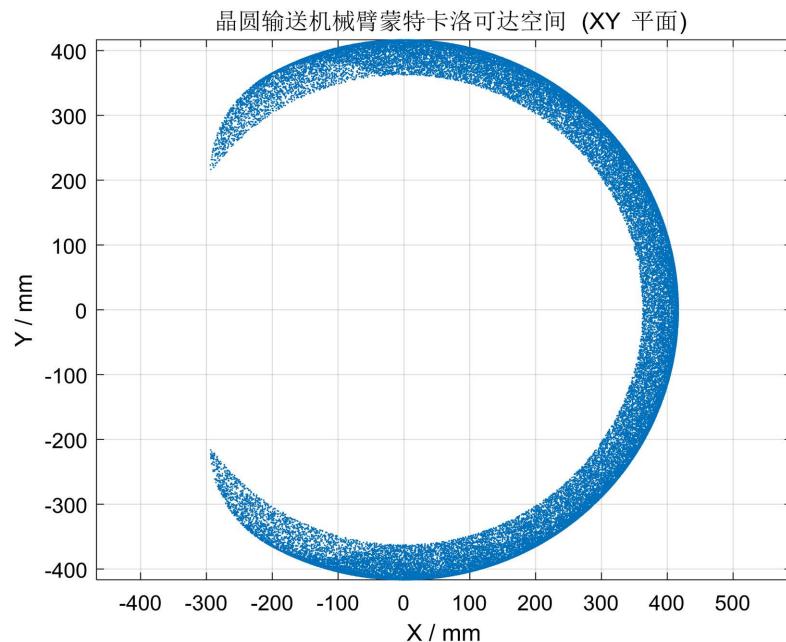


Figure 5. Projection of the workspace onto the XY plane
图 5. 工作空间在 XOY 平面的投影

$$T = \frac{1}{2} I_1 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{c2}^2 + \frac{1}{2} I_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \quad (4)$$

I_1 和 I_2 分别表示连杆绕其质心的转动惯量, 由于大臂和小臂均围绕其关节(即臂的一端)转动, 则大臂和小臂的转动惯量分别是 $I_1 = \frac{1}{3} m_1 l_1^2$, $I_2 = \frac{1}{3} m_2 l_2^2$ 。

则拉格朗日函数为:

$$L = T - V = \frac{1}{2} (I_1 + m_2 l_1^2 + I_2) \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{q}_2^2 + I_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 + m_2 l_1 l_{c2} \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos q_2 - \frac{1}{2} k (q_2 - \theta)^2 \quad (5)$$

基于拉格朗日函数, 进一步对每个广义坐标应用拉格朗日方程。

大臂的拉格朗日动力学方程为:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_1} = \tau_1 \quad (6)$$

小臂的拉格朗日动力学方程为:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_2} = \tau_2 \quad (7)$$

机器人的大臂由电机直接驱动, 小臂的运行则依赖电机带动弹性传动钢带, 钢带将转矩传递给小臂刻体, 则机器人系统的刚度矩阵可简化为:

$$K = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \quad (8)$$

整理为标准形式, 则晶圆输送机器人的系统的动力学模型为:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{12} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

5. 机械臂的逆动力学控制仿真

基于逆动力学模型, 选择控制输入为 $\tau = D(q)y + C(q, \dot{q})\dot{q} + K(q)$, 由机械臂逆动力学方程可得, $\ddot{q} = y$ 为了使闭环系统稳定并实现对期望轨迹的跟踪, 引入期望关节轨迹 $q_d(t)$, 定义位置和速度误差分别为 $e = q - q_d$, $\dot{e} = \dot{q} - \dot{q}_d$ 。

稳定的控制率 y 可以选择为

$$y = -K_p q - K_d \dot{q} + r \quad (10)$$

式中, 参数 K_p 和 K_d 为对角阵, 可以选择为 $K_p = \text{diag}(\omega_1^2, \omega_2^2)$, $K_d = \text{diag}(2\omega_1, 2\omega_2)$, r 为与期望轨迹相关的前馈项。选择跟踪轨迹 r 为:

$$r = \ddot{q}_d + K_p q_d + K_d \dot{q}_d \quad (11)$$

则逆动力学控制率就是

$$\ddot{q} = -K_p q - K_d \dot{q} + \ddot{q}_d + K_p q_d + K_d \dot{q}_d \quad (12)$$

将式(12)整理为误差形式, 机器人的闭环动力学就是

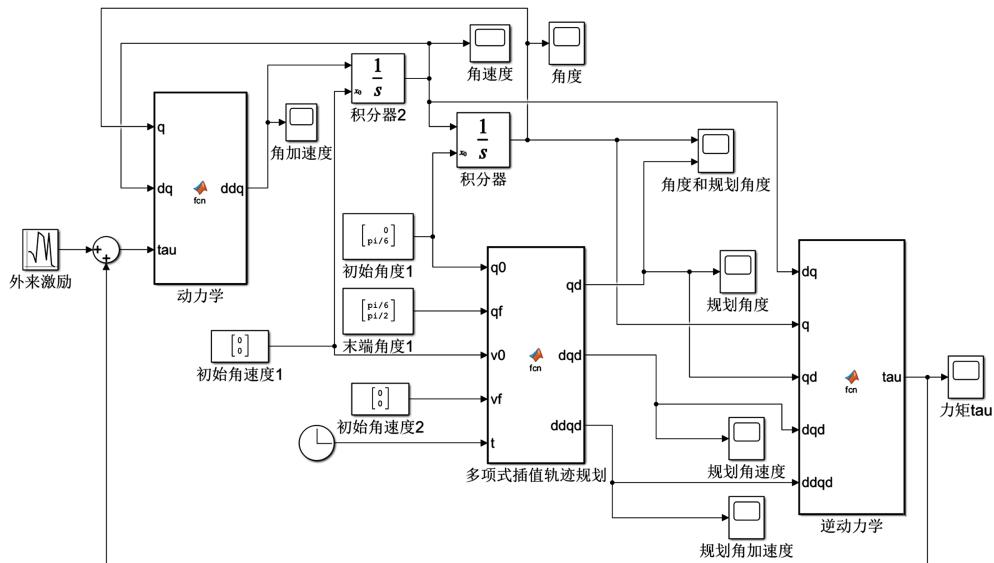
$$\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e = 0 \quad (13)$$

为了验证该控制率的跟踪性能, 基于 Simulink 搭建机械臂的仿真平台, 将 S 型曲线的轨迹参数输入到仿真平台中, 运行仿真可得到机械臂模拟运行轨迹, 仿真平台的结构如图 6 和图 7 所示。Simulink 是 MATLAB 的仿真平台, 可以进行系统建模仿真以及综合分析等, 本研究采用 MATLAB Function 自定义函数模块, 基于建立晶圆机械臂的逆动力学仿真控制系统。



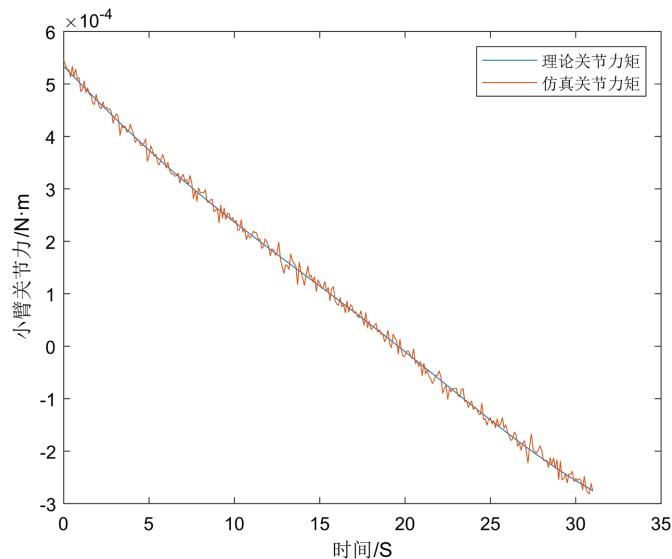
Figure 6. Simulation system flowchart for the robotic arm

图 6. 机械臂仿真系统流程图

**Figure 7.** Simulink design of the robotic arm simulation system**图 7.** 机械臂仿真系统的 Simulink 设计

由图的仿真结果可知,本文轨迹规划的结果不仅在位移、速度、加速度层面实现了平稳过渡,而且在更高阶的跃度抖振指标上也具备较好的可控性和可实现性,能够在确保时间较短的前提下显著降低末端振动能量指标,为减小晶圆搬运过程中的残余振动和提高运行稳定性提供了有力支撑。

仿真结果表明,由于小臂依靠柔性钢带传输力矩,因此不可避免地引起了末端的小幅振荡,如图 8 所示,但这些波动的幅值被限制在了 10^{-4} N·m 量级内,且对机械臂的估计未造成显著影响,证明轨迹规划方法和刚柔耦合控制策略也成功抑制了由柔性传动引起的振动放大。同时,如图 9 所示,大臂的理论力矩和仿真关节力矩几乎高度重合,该结果与大臂采用电机 - 轴套 - 关节的驱动方案特性一致,该传动方案能够有效降低大臂在高频率重复运动中的磨损与疲劳损伤,有利于降低维护成本,进一步提升机器人整机可靠性和寿命。

**Figure 8.** Theoretical and simulated joint torque of the forearm**图 8.** 小臂的理论关节力矩与仿真关节力矩

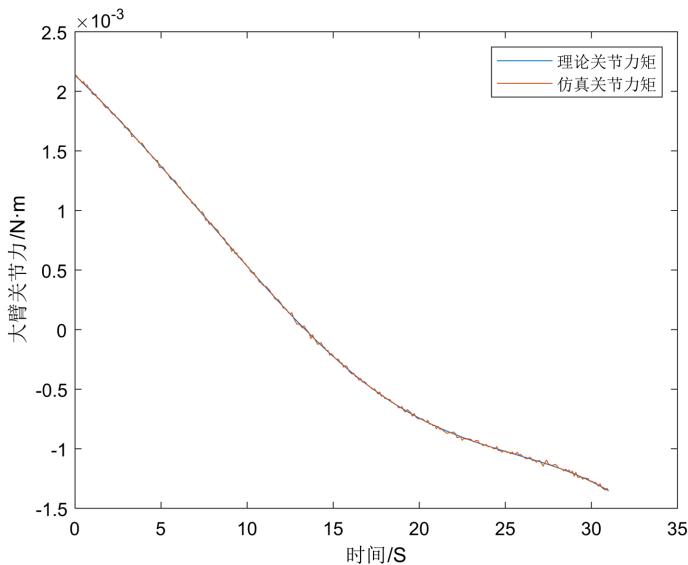


Figure 9. Comparison between theoretical and simulated joint torques of the boom
图 9. 大臂的理论关节力矩与仿真关节力矩

6. 结论

本文以自由度晶圆搬运机械臂为研究对象,围绕传动方案选型、动力学建模及逆动力学控制进行了研究,并通过 Simulink 仿真验证了所提方法的有效性,主要结论如下:

- 1) 钢带传动具有质量轻、截面小、启动负载低的优势,更加适用于晶圆搬运作业。
- 2) 采用 Robotic Toolbox 对机械臂模型进行了可达工作空间分析,为机械臂的运行提供了参考依据。
- 3) 基于拉格朗日方法建立了机械臂的动力学模型,在此基础上设计逆动力学控制律,并搭建了 Simulink 逆动力学仿真平台。仿真结果表明,在引入外界干扰后,小臂的关节力矩振荡幅值基本保持在 0.1 N·m 内,大臂理论关节力矩与仿真结果基本一致,验证了所建动力学模型及控制律的准确性和可行性。

参考文献

- [1] 冯国楠, 沈锦璐, 李建慧, 等. 全球半导体光刻胶行业现状及发展分析[J]. 中国集成电路, 2025, 34(5): 10-14.
- [2] 闫继宏, 石培沛, 张新彬, 等. 软体机械臂仿生机理、驱动及建模控制研究发展综述[J]. 机械工程学报, 2018, 54(15): 1-14.
- [3] Dong, Z. and Lin, Y. (2020) Ultra-Thin Wafer Technology and Applications: A Review. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **105**, Article 104681. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.104681>
- [4] Oberhans, S., Heiss, W. and Pietsch, G.J. (2025) Crystal Damage and Surface Morphology in Industrial Diamond Wire Slicing of 300 mm Monocrystalline Silicon Wafers for Microelectronic Devices. *Advanced Materials Technologies*, **10**, Article 2401432. <https://doi.org/10.1002/admt.202401432>
- [5] 孟利园, 宣丽英, 李西军. ICP 刻蚀设备顶针的功能分析和优化设计[J]. 电子工业专用设备, 2025, 54(5): 1-6+35.
- [6] 张鹏, 陈惠贤, 裴应驰, 等. 柔性医用机械臂末端空间定位误差建模与分析[J]. 甘肃科学学报, 2022, 34(5): 18-25.
- [7] 段纯, 顾建华. 基于逆动力学的机械臂鲁棒位置控制方法的设计[J]. 中国工程机械学报, 2020, 18(3): 242-247.
- [8] Yang, C. and Banb, L. (2021) Vibration Control of Piezoelectric Flexible Manipulator Based on Machine Vision and Improved PID. 2021 IEEE International Conference on Power Electronics, Computer Applications (ICPECA), Shenyang, 22-24 January 2021, 886-888. <https://doi.org/10.1109/icpeca51329.2021.9362620>
- [9] 张泽峰, 徐方, 杜振军, 等. 直驱型真空机械手运动规划与柔顺控制方法[J]. 机械设计与制造, 2024(10): 339-344.
- [10] 孙浩翔, 王笑, 宋汉文. 基于模型预测的冗余机械臂逆运动学关节极限规避[J]. 动力学与控制学报, 2025, 23(10): 45-52.

-
- [11] 唐炫铭, 全伟才, 刘博, 等. 多关节绳驱机械臂动力学响应分析[J]. 机械制造与自动化, 2025, 54(4): 224-230+310.
 - [12] 赵静, 潘龙, 陆宁云, 等. 基于固定时间干扰观测器的空中机器人非奇异终端滑模控制[J/OL]. 航空学报, 2025: 1-16. <https://link.cnki.net/urlid/11.1929.V.20251110.1600.003>, 2025-12-31.
 - [13] 毛建, 孙小康, 陆玉叶, 等. 基于非奇异快速终端滑模的线驱连续型机械臂固定时间阻抗控制[J]. 南京理工大学学报, 2025, 49(5): 557-566.
 - [14] 钱东海, 王新峰, 赵伟, 等. 基于旋量理论和 Paden-Kahan 子问题的 6 自由度机器人逆解算法[J]. 机械工程学报, 2009(9): 72-76+81.