

分类号: TH113

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2210110124



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 机器人磨削视觉引导轨迹规划及恒力
控制策略研究

论 文 作 者 严志川

指 导 教 师 刘玉飞 副教授

学 科 (专 业) 机 械 工 程

研 究 方 向 机器人动力学与控制

论文提交日期: 2024 年 6 月 6 日

分类号：TH113

学校代码：10363

密 级：公开

学 号：2210110124

安徽工程大学

机器人磨削视觉引导轨迹规划及恒力控制策略研究

RESEARCH ON VISUSL GUIDED TRAJECTORY
PLANNINGG AND CONSTANT FORCE CONTROL
STRATEGY FOR ROBOT GRINDING

学生姓名：严志川

指导教师：刘玉飞（副教授）

专 业：机械工程

研究方向：机器人动力学与控制

答辩时间：2024 年 5 月 27 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：

严志川

日期：2024 年 6 月 6 日

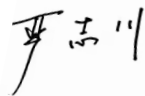
安徽工程大学学位论文授权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名： 

指导教师签名： 

日期： 2024 年 6 月 6 日

日期： 2024 年 6 月 6 日

机器人磨削视觉引导轨迹规划及恒力控制策略研究

摘 要

机器人磨削在工业领域具有广泛的应用前景。机器人本体低刚度振动以及系统标定误差严重影响机器人的作业精度，适应工件轮廓特征的机器人轨迹及恒力控制是机器人稳定磨削需要解决的关键问题之一。本文开展基于视觉引导的机器人磨削轨迹规划和恒力控制策略研究，实现机器人磨削视觉引导轨迹误差实时补偿及恒力控制。本文主要的研究内容如下：

（1）基于视觉引导的机器人磨削轨迹规划及控制策略。针对视觉引导机器人磨削系统构成，建立整体系统的运动学模型和坐标转换关系；通过视觉系统获取工件轨迹图像，根据特征点进行机器人磨削轨迹规划；针对机器人本体振动以及系统标定误差问题，通过视觉相机实时观测并反馈机器人磨削过程的末端轨迹坐标，设计基于模糊 PID 控制器的机器人磨削视觉引导轨迹控制策略；搭建虚拟样机联合仿真模型并进行联合仿真实验，验证机器人磨削视觉引导轨迹控制策略的有效性。

（2）柔性关节机器人振动耦合特性及控制策略。考虑关节柔性耦合引起的机器人末端振动问题，研究柔性关节机器人振动耦合特性及控制策略。建立机器人柔性关节动力学模型，根据关节输出转角和末端轨迹，揭示机器人关节及末端振动的机理，分析连续轨迹

下机器人关节及末端振动特性；在此基础上，开展基于机器人轨迹规划的振动控制研究，设计基于 PI 控制器的机器人末端振动控制策略；搭建柔性关节机器人振动控制虚拟样机联合仿真模型并进行联合仿真实验，验证柔性关节机器人振动控制策略的有效性。

（3）振动耦合下机器人磨削恒力控制策略。针对机器人磨削过程存在的磨削力波动问题，基于设计研制的气动伺服磨削装置，设计基于滑模变结构控制器的机器人磨削恒力控制策略，搭建了机器人磨削恒力控制虚拟样机联合仿真模型并进行联合仿真实验，验证机器人磨削恒力控制策略的有效性。

（4）机器人磨削实验测试及分析验证。搭建机器人磨削实验平台，完成实验系统硬件及软件设计，开展机器人磨削视觉引导轨迹控制实验和恒力控制实验，验证理论模型和仿真分析结果。

关键词： 机器人磨削，视觉引导，轨迹规划，振动控制，恒力控制

RESEARCH ON VISUSL GUIDED TRAJECTORY PLANNINGG AND CONSTANT FORCE CONTROL STRATEGY FOR ROBOT GRINDING

ABSTRACT

Robot grinding has a wide application prospect in the industrial field. Low stiffness vibration of robot body and system calibration error seriously affect the working accuracy of robot. Robot trajectory and constant force control adapted to workpiece contour characteristics are one of the key problems to be solved in robot stable grinding. In this paper, the trajectory planning and constant force control strategy of robot grinding based on visual guidance are studied, and the real-time error compensation and constant force control of robot grinding visual guidance are realized. The main research contents of this paper are as follows:

(1) Robot grinding trajectory planning and control strategy based on visual guidance. Aiming at the composition of the robot grinding system, the kinematics model and coordinate transformation relationship of the whole system are established. The trajectory image of workpiece is obtained by the vision system, and the trajectory planning of robot grinding is carried out according to the feature points. In order to solve the problem of robot body vibration and system calibration error, the vision camera was used to observe and feedback the end trajectory coordinates of robot grinding process in real time, and a vision guided trajectory control strategy based on fuzzy PID controller was designed. The co-simulation model of virtual prototype was built and the co-simulation experiment was carried out to verify the effectiveness of the robot grinding vision guided trajectory control strategy.

(2) Vibration coupling characteristics and control strategies of flexible joint robots.

Considering the robot end vibration caused by joint flexible coupling, the vibration coupling characteristics and control strategy of flexible joint robot are studied. The dynamic model of robot flexible joint was established, and the vibration mechanism of robot joint and end was revealed according to the output Angle of joint and end trajectory, and the vibration characteristics of robot joint and end were analyzed under continuous trajectory. On this basis, the vibration control based on robot trajectory planning is studied, and the robot end vibration control strategy based on PI controller is designed. The joint simulation model of virtual prototype for vibration control of flexible joint robot is built and the joint simulation experiment is carried out to verify the effectiveness of the vibration control strategy of flexible joint robot.

(3) Constant force control strategy for robot grinding under vibration coupling. Aiming at the problem of grinding force fluctuation in robot grinding process, a robot grinding constant force control strategy based on sliding mode variable structure controller was designed based on a pneumatic servo grinding device designed and developed. A virtual prototype co-simulation model of robot grinding constant force control was built and co-simulation experiments were conducted to verify the effectiveness of the robot grinding constant force control strategy.

(4) Experimental test and analysis verification of robot grinding. The robot grinding experiment platform was built, the hardware and software of the experiment system were designed, the robot grinding visual guidance trajectory control experiment and constant force control experiment were carried out, and the theoretical model and simulation analysis results were verified.

KEY WORDS: Robot grinding, visual guidance, trajectory planning, vibration control, constant force control

目录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	8
1.1 课题来源.....	8
1.2 课题研究背景及意义.....	8
1.3 国内外研究现状.....	9
1.3.1 视觉引导工业机器人轨迹规划.....	9
1.3.2 工业机器人振动控制.....	10
1.3.3 工业机器人磨削恒力控制.....	11
1.4 本文主要研究内容.....	12
1.5 本章小结.....	14
第 2 章 基于视觉引导的机器人磨削轨迹规划及控制策略.....	15
2.1 机器人运动学分析.....	15
2.1.1 位姿描述方法.....	16
2.1.2 正运动学分析.....	17
2.1.3 逆运动学分析.....	21
2.1.4 仿真验证.....	26
2.2 整体系统坐标系建立.....	29
2.2.1 视觉系统模型.....	29
2.3 视觉引导机器人轨迹控制策略.....	33
2.3.1 视觉引导机器人轨迹控制策略原理.....	33
2.3.2 模糊 PID 控制器设计	34
2.4 联合仿真分析.....	37
2.4.1 联合仿真模型建立.....	37
2.4.2 结果分析.....	38
2.5 本章小结.....	40

第 3 章 柔性关节机器人振动耦合特性及控制策略.....	41
3.1 柔性关节动力学模型.....	41
3.2 柔性关节振动特性.....	42
3.3 基于 PI 控制器的振动控制策略	45
3.4 联合仿真分析.....	46
3.4.1 虚拟样机模型建立及参数设置.....	46
3.4.2 联合仿真模型.....	49
3.4.3 结果分析.....	50
3.5 本章小结.....	52
第 4 章 振动耦合下机器人磨削恒力控制策略.....	53
4.1 磨削末端装置气动系统动力学模型.....	54
4.1.1 气缸流量连续性方程.....	54
4.1.2 气动伺服阀质量流量方程.....	55
4.1.3 气动系统气缸力平衡方程.....	57
4.2 磨削恒力控制策略.....	59
4.2.1 滑模变结构控制器.....	59
4.2.2 磨削恒力控制模型.....	61
4.3 联合仿真分析.....	61
4.4 本章小结.....	64
第 5 章 实验研究.....	65
5.1 机器人磨削视觉引导轨迹控制实验.....	65
5.1.1 实验系统搭建.....	65
5.1.2 实验系统硬件设计.....	66
5.1.3 实验系统软件设计.....	69
5.1.4 机器人磨削视觉引导轨迹控制实验测试结果.....	75
5.2 弹性构件机器人磨削恒力控制实验.....	79
5.2.1 实验系统设计.....	79
5.2.2 弹性构件机器人磨削恒力控制实验测试结果.....	80

5.3 本章小结.....	83
第 6 章 结论与展望.....	84
6.1 结论.....	84
6.2 展望.....	84
参考文献.....	86
攻读学位期间发表的学术论文目录.....	92
致 谢.....	93

第1章 绪论

1.1 课题来源

本课题来源于国家自然科学基金项目“弹性薄壁件机器人钻削系统多维振动耦合机理及主动柔顺控制研究”（项目号：51805001）的延伸内容，旨在对机器人磨削视觉引导轨迹规划及恒力控制策略研究。

1.2 课题研究背景及意义

在“中国制造 2025”的跨国新时代背景下，机器人技术成为了工业化的核心，并且已成为推动制造业进一步发展的关键因素。习近平总书记也曾指出，机器人技术是我国创新领域的关键^[1]。当前时代下，机器人技术被越来越多的应用于各种制造领域，与传统工艺人工手动进行设计与生产比较起来，运用机器人技术的情况下可以有着更好的效率、精确度、安全、智能化等等优点^[2-3]，很多工业用于制造的场景都运用到了机器人技术，加快转型使得产业线更加自动智能化，对于我国的工业发展会起到了极大的促进作用。

随着机器人技术的发展，工业机器人被越来越多地应用于打磨、焊接等制造加工领域，本身具有柔性化程度高和低人力成本等优势，也有利于实现绿色化智能制造^[4]，如图 1-1 所示。



图 1-1 机器人磨削加工

对于这些典型的机器人集成应用，其中对弹性构件的机器人磨削方面，因为其本身刚度低、挠度大，在磨削加工时极易产生变形和颤振的特性，以及传统磨削加工过程中的精度误差大、过程繁琐等问题，也预示着对此类零件运用传统手段进行生产加工也愈发的不适合。

现有的机器人轨迹控制方法主要有示教编程^[6]和离线编程^{[7]-[8]}，如图 1-2。其中，示教编程这种方法，一般是在对应机器人示教器中对机器人将要运行的作业轨迹点进行现场设定，由于人为操作和机器人本身误差等原因，难以实现高精度的轨迹再现，尤其在复杂作业任务时，严重限制了焊接效率和质量^[9]。而运用离线编程的方法时，并不需要类似示教编程的模式对机器人的行进轨迹进行在线编程，所以在复杂作业环境具有明显的优势。现阶段，离线编程方法可以划分为基于计算机辅助设计和基于视觉的编程方法^[10]，其中，基于计算机辅助设计的离线编程方法，非常依赖机器人和工件的三维模型的精度以及准确度，在实际工作中，当工件位置与原始位置存在偏差或干扰因素时，将影响作业精度^{[11]-[12]}。



图 1-2 示教编程与离线编程

在对弹性构件进行机器人磨削加工时，单靠传统的轨迹控制方法会导致磨削轨迹作业的精度较低，相较于利用视觉引导进行轨迹控制，后者不仅可以高精度识别轨迹还能自动生成磨削作业程序，而磨削过程中，磨削工具与加工工件接触时会产生力的交互引起振动，影响磨削主轴的加工稳定性以及加工质量。

因此，如何使工业机器人适应工件表面轮廓特征进行恒力磨削是需要解决的关键问题，本课题开展基于视觉引导的机器人磨削轨迹规划和恒力控制策略研究，以实现机器人磨削视觉引导轨迹误差实时补偿及恒力控制。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 视觉引导工业机器人轨迹规划

近年来，机器视觉技术在轨迹规划和位姿检测方面得到广泛关注^{[13]-[15]}，基于视觉引导的机器人轨迹控制方法是通过视觉传感器采集轮廓图像，通过图像处理获取机器人目标轨迹数据，降低了对机器人和工件三维模型以及相对位置

的依赖^{[16]-[17]}。Bedaka^[18]通过融合三维视觉系统获取工件模型的相对位置，设计了一种新型的自动离线编程系统。WANG 等^[19]针对工业机器人多层多道焊缝纠偏问题，设计一种基于视觉传感的焊缝纠偏控制系统。Geng^[20]提出了一种基于三维视觉的机器人焊接路径规划方法，实现了中厚板结构件机器人焊接的自动焊缝提取和路径规划。

机器人连续作业过程的轨迹精度对作业质量具有重要影响^{[21]-[22]}。由于机器人本体的低刚度特征，机器人在作业过程中极易产生残余振动，机器人连续作业过程的实际轨迹与理想轨迹存在偏差，这将严重影响作业精度和质量^{[23]-[25]}。而且，机器人在作业运动过程中的刚度等性能参数随着姿态变化具有时变特征^{[26]-[27]}，现有研究主要是通过基于姿态优化的刚度增强和参数辨识提高机器人本体的定位精度，以补偿机器人作业的轨迹误差^{[28]-[30]}。针对工业机器人不可忽略的连杆和关节柔性问题，Chen^[31]提出一种基于刚柔耦合误差模型和全位姿测量方法的工业机器人非运动学标定方法。Gao^[32]提出了一种基于 BP 神经网络和粒子群优化算法的工业机器人误差模型，实现了运动参数误差的最优变量补偿和工业机器人定位精度的提高。为了提高铣削机器人的加工精度，Lin^[33]提出了一种以轮廓误差为优化指标的铣削机器人位姿优化方法。Luo^[34]针对复杂曲面机器人磨削问题，在建立典型工业机器人运动学误差模型的基础上，提出了一种新的运动学参数标定方法，提高机器人的绝对定位精度。可以看出，机器人的轨迹规划是机器人集成应用的关键问题 and 研究热点，通常都是针对单次行进展开研究，而对于轨迹规划误差的实时补偿研究还较少。

1.3.2 工业机器人振动控制

现阶段，工业机器人被广泛应用于搬运、焊接和磨削等工业领域，机器人在连续作业过程中的动态特性和轨迹精度对作业质量具有重要影响^{[35]-[36]}。工业机器人关节主要由伺服电机和减速器组成，其中减速器通常存在柔性元件，关节的柔性降低了机器人的整体刚度，导致机器人在动态作业过程中极易产生残余振动，这严重影响机器人的动态作业精度。因此，为了提高机器人的轨迹精度，需要在考虑关节柔性的情况下研究机器人的振动控制问题。

现有的研究，一方面是针对工业机器人柔性关节的振动控制问题。Chen^[37]

提出了一种自适应控制与最优控制相结合的混合控制方法,实现了柔性关节机器人振动的有效抑制。pham^[38]提出了一种两阶段状态反馈控制器,实现了对柔性关节机器人振动产生运动学误差的有效抑制。另有学者从柔性关节机器人的动力学角度入手,Datouo^[39]提出了一种基于自适应模糊的滤波算法,实现了在有限时间内对柔性关节工业机器人跟踪误差的补偿。Kim^[40]提出了一种基于多变量双时间尺度的滑模控制方法,实现了对柔性关节机器人残余连杆振动的抑制以及跟踪性能的提升。Zaare^[41]提出一种基于电压的滑模控制方法,实现了对柔性关节机器人所存在结构和非结构不确定性的良好控制。Huang^[42]提出了一种基于自适应模糊补偿的状态反馈控制方法,实现了对柔性关节机器人振动拟合误差的减小。

另一方面,可以通过姿态优化对具有时变特征的刚度等性能参数,进行刚度增强和参数辨识从而提高机器人本体的定位精度。对此,Gang^[43]提出了一种机器人基于刚度增强的姿势优化算法,实现了加工精度有效提高。Lu^[44]提出一种力前馈位置反馈的复合控制方法,实现了在外负载下的刚度补偿并能较高精度进行轨迹跟踪。Ma^[45]提出一种串联机械臂关节空间刚度最优路径求解方法,实现了运动精度的提高以及对变形和颤振的抑制。Guo^[46]提出了一种基于刚度最大化的姿态优化补偿模型,实现了定位精度的提高。另一方面,工业机器人轨迹精度降低导致的末端偏差,对此,Hu^[47]提出了一种组合鲁棒控制和自适应控制方法,实现了机器人在未知扰动影响下保持稳定。Gao^[48]提出一种基于机器人运动学标定进行空间误差补偿末端姿态的方法,实现了机器人轨迹精度的提高。Zhou^[49]提出了一种基于增量学习的机器人末端误差自适应补偿的方法,实现了轨迹跟踪性能的进一步提高。Geng^[50]提出了一种基于三维视觉的机器人焊接路径规划方法,实现了中厚板结构件机器人焊接的自动焊缝提取和路径规划。可以看出,对于工业机器人振动控制通常都是建立误差模型补偿末端姿态提高轨迹精度,而针对关节力矩驱动来对工业机器人的柔性关节进行振动控制研究还较少。

1.3.3 工业机器人磨削恒力控制

恒力控制是为了工业机器人在进行磨削作业时,磨削末端装置在与工件接

触后作用力大小的均匀，还可以避免工业机器人和磨削执行器收到过大的挤压力等发生过载问题使其损坏。在磨削作业中施加恒力控制可以保持磨削力度的一致性，从而保证磨削精度。Xiao M 等^[51]提出了一种基于 RBF 神经网络模型的机器人恒力控制算法，得到机器人实际接触力与理论接触力的误差值，以此来使得机器人速度达到收敛。Chen F 等^[52]提出了一种基于磨削接触力控制方法，能够适应机构曲率变化并且使得接触力恒定。李晓炜等^[53]提出了一种基于被磨削材料的恒力去除深度模型，针对砂带磨削机器人恒力磨削有较好的精度。张铁等^[54]提出了一种基于模糊自整定 PID 的力控制磨削方法，可以减小磨削系统的法向磨削力波动，提高力控制精度。贾林等^[54]提出了一种基于非奇异终端滑模的磨削力控制方法，利用指数趋近律对抖振进行削弱，提高了机器人磨削控制系统的鲁棒性和精度。刘真等^[56]提出了一种基于干扰估计器和系统在线逼近模型的控制磨削力稳定的 Smith 预估控制器，对外界强干扰的抑制作用明显，控制过程中磨削力波动的幅度也很小。张洪瑶等^[57]提出了一种基于模糊 PID 的力/位混合主动力柔顺控制，根据实际接触力与参考力的差值对离线编程轨迹进行在线修正，实现恒力控制。徐童^[58]等提出了一种基于模糊 PID 的磨削力控制方法，对于凹面凸轮磨床复合磨削加工过程中提高了加工精度并对磨削力进行良好控制。可以看出，现阶段对于工业机器人进行磨削恒力控制主要实现的方法是通过基于算法控制器来实现，而对于机器人磨削末端装置和磨削末端恒力控制算法进行结合设计的报道还较少。

1.4 本文主要研究内容

本文基于从三个方面对国内外研究现状的论述，以及对存在的问题进行分析后，将对机器人磨削视觉引导轨迹规划及恒力控制问题进行研究，主要在以下几个方面开展研究工作：

第一章：绪论。结合机器人磨削视觉引导轨迹规划及恒力控制系统存在的问题，介绍课题研究背景与意义，分析视觉引导工业机器人轨迹规划、工业机器人振动控制以及磨削恒力控制的研究现状。

第二章：基于视觉引导机器人磨削轨迹规划及控制策略。首先基于 DH 参数法使用 Matlab/Robotics Toolbox 工具箱建立机器人运动学模型，并基于小孔成

像原理与视觉相机坐标系相关联；然后利用 UG 建立六自由度机器人等效模型，导入 Adams 得到虚拟样机联合仿真模型，并给定作业的路径点进行轨迹规划并与视觉引导分析误差特性；最后设计模糊 PID 控制器代替传统 PID 控制器进行轨迹控制误差校正，利用 Matlab/Simulink 与 Adams 搭建虚拟样机联合仿真模型，在不同轨迹下开展了联合仿真实验，实现机器人轨迹规划及控制，验证基于视觉引导机器人磨削轨迹规划及控制策略的有效性。

第三章：柔性关节机器人振动耦合特性及控制策略。基于机器人运动学模型进行考虑关节柔性对末端轨迹影响的振动耦合特性分析；然后基于 PI 控制器设计振动控制策略，利用 Matlab/Simulink 与 Adams 搭建虚拟样机联合仿真模型，在不同轨迹下开展了联合仿真实验，实现机器人运动伺服控制，验证柔性关节机器人振动耦合特性及控制策略的有效性。

第四章：振动耦合下机器人磨削恒力控制策略。首先设计研制机器人磨削末端执行器；然后在磨削末端装置气动系统动力学理论分析的基础上，基于滑模变结构控制的原理，设计磨削恒力控制系统；最后基于 Matlab/Simulink 与 Adams 搭建虚拟样机联合仿真模型，在不同条件下开展联合仿真实验，实现磨削的恒力控制，验证振动耦合下机器人磨削恒力控制策略的有效性。

第五章：实验研究。首先对机器人磨削实验平台进行搭建，对实验平台中的硬件设备进行选型，以及上位机程序进行设计；最后开展机器人磨削视觉引导轨迹控制实验以及弹性构件机器人磨削恒力控制实验，验证机器人磨削视觉引导轨迹规划及恒力控制策略的有效性。

第六章：结论与展望。将对本文的研究内容进行概括，研究结果进行总结，并对课题的后续研究进行展望。

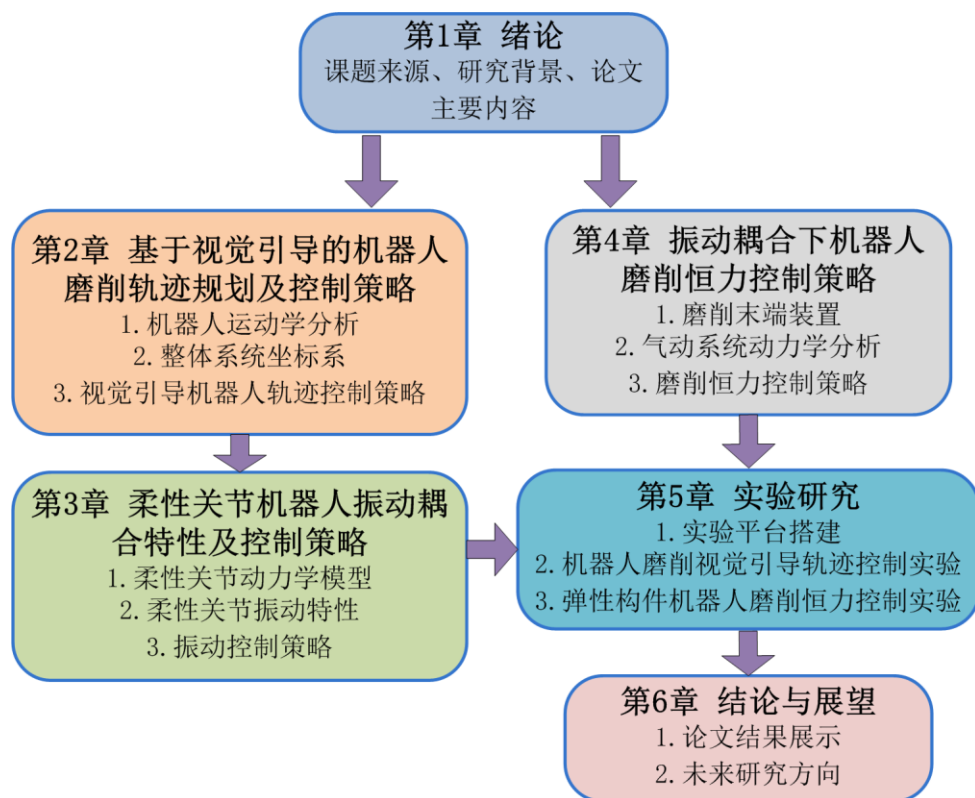


图 1-3 研究内容框架

1.5 本章小结

结合现阶段针对机器人磨削视觉引导轨迹规划及恒力控制所存在的问题，介绍了课题研究背景及意义，对工业机器人视觉引导、振动控制以及磨削恒力控制研究现状进行分析，基于现有研究的不足提出本文主要的研究内容。

第2章 基于视觉引导的机器人磨削轨迹规划及控制策略

视觉检测技术通过视觉相机拍摄图像，对图像进行检测并提取将信息传递利用，通过视觉测量技术处理图像后，获得各种需要的参数值^[59]，可以进行大范围自动并且高精度的数据采集，基于视觉测量技术的硬件设备，能够具备在线检测、实时分析、实时控制的能力^[60]。本章将基于机器视觉引导，设计机器人磨削轨迹规划及控制策略。首先通过建立机器人系统正逆运动学模型，对机器人的位姿进行描述，并且确定机器人关节空间到机器人末端实际位姿的变换关系；建立视觉系统模型，确定机器人坐标系与视觉坐标系之间的关系，并建立整体系统坐标系；然后进一步分析视觉引导下机器人系统轨迹规划的误差特性，从视觉位姿测量原理出发，设计基于模糊 PID 控制器的视觉引导轨迹控制策略；之后基于 Matlab/Simulink 与 Adams 软件，搭建视觉引导轨迹控制虚拟样机联合仿真模型；最后进行虚拟样机联合仿真，验证基于视觉引导的机器人磨削轨迹规划及控制策略的有效性。

2.1 机器人运动学分析

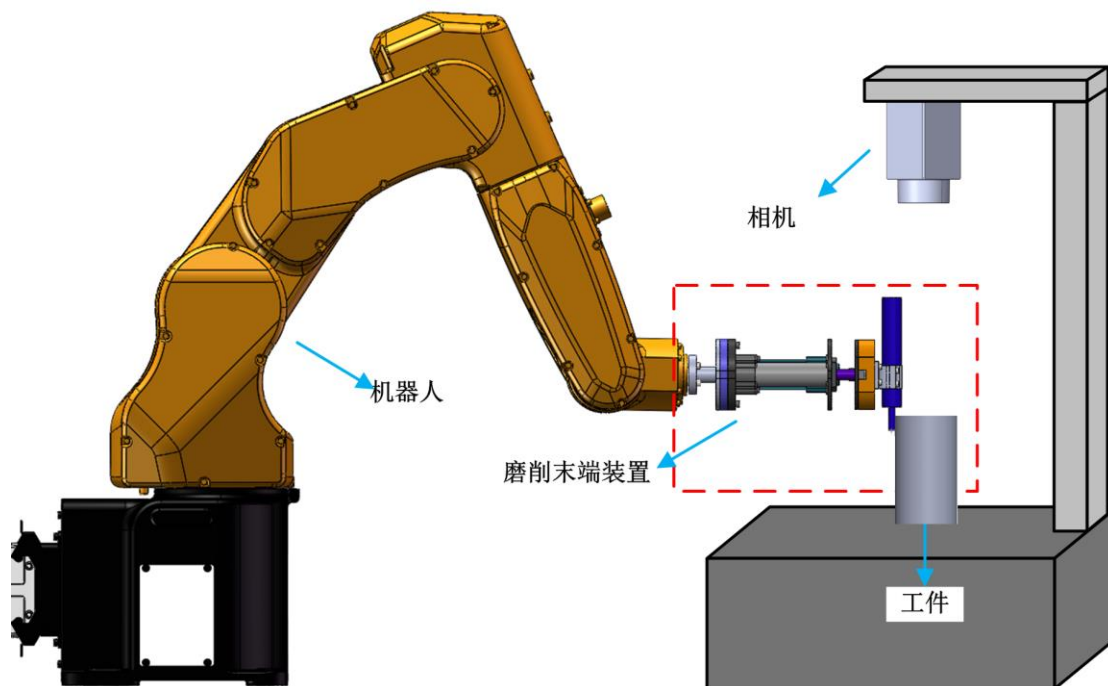


图 2-1 基于视觉引导的机器人磨削系统示意图

机器人的运动学分析包括正向运动学和逆向运动学。建立正向运动学模型

后，可以将六关节的角度设为输入变量，通过正向运动学输出机器人末端执行器实际位姿；而建立逆向运动学模型则相反，可以将机器人末端执行器位姿设为输入变量，通过逆向运动学模型可输出六关节的实际角度。本文使用的是改进型 DH 参数建模法，对机器人运动学进行分析并对其模型进行建立，实现机器人关节空间变量到笛卡尔空间实际位姿的相互变换^[61]。

2.1.1 位姿描述方法

通常笛卡尔空间中的机器人末端有 6 个自由度，描述其位姿时，可以用三个方向矢量以及三个位置矢量来表示。首先将世界坐标系的原点坐标设定于机器人基座（与机器人基坐标系重合），作为其他坐标系的位置描述，其不随姿态变化而变化。如图 2-2 所示，表示工具坐标系 O_b 在基坐标系 O_w 下的描述方法。建立基坐标系与工具坐标系关系 ${}^w_B P$ ，其表示工具坐标系原点相对于基坐标系原点的位置矢量，如式(2-1)。

$${}^w_B P = [p_x \quad p_y \quad p_z]^T \quad (2-1)$$

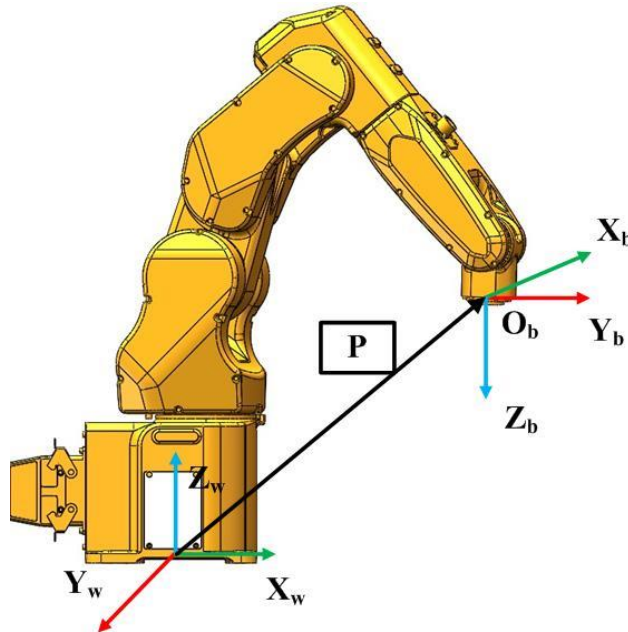


图 2-2 机器人末端位姿的确定

式中 P_x, P_y, P_z 代表工具坐标系原点相对于基坐标系的三轴位置矢量。工具坐标系 X_b, Y_b, Z_b 的三轴单位矢量方向与基坐标系 X_w, Y_w, Z_w 关系可利用旋转矩阵 ${}^w_B R$ 表示，如式(2-2)。

$${}^W_B R = [n \quad o \quad a] = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

其中 n, o, a 用来表示工具坐标系相对于基坐标系的三个轴的单位矢量。位置矢量再加上旋转矩阵就可以用来描述工具坐标系相对基坐标系的位置和姿态，称作齐次变换矩阵 ${}^W_B T$ ，如式(2-3)。

$${}^W_B T = \begin{bmatrix} {}^W_B R & {}^W_B P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

2.1.2 正运动学分析

通常机器人正向运动学分析的过程是在每个连杆关节处固定一个关节坐标系 $O_{i(l-6)}$ ，从基坐标系开始找到彼此相邻各个关节坐标系间的位姿变换关系，加以整合即可得到工具坐标系在基坐标系下的描述矩阵。如图 2-3 所示，从 X 、 Y 、 Z 三轴分别分析，以机器人的 $i-1$ 连杆为例，建立连杆坐标系 O_{i-1} 。 Z_{i-1} 坐标轴沿 $i-1$ 关节的轴线方向； X_{i-1} 轴沿 Z_{i-1} 与 Z_i 的公垂线，且背离 Z_{i-1} 轴方向； Y_{i-1} 轴根据右手法则确定。

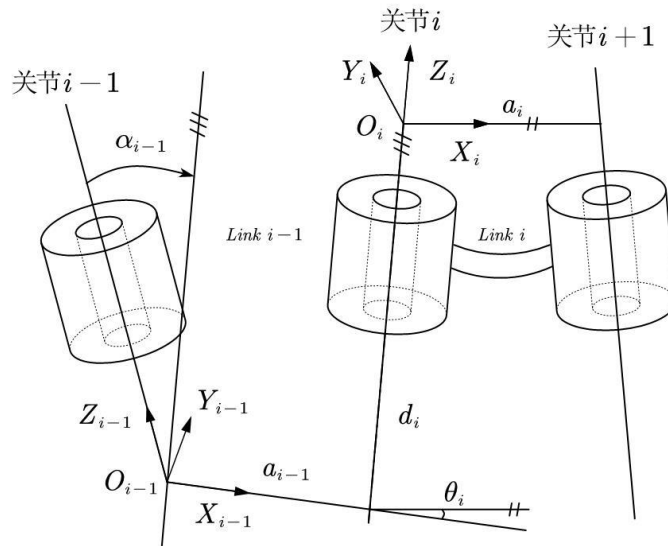


图 2-3 改进型 D-H 坐标系建立示意图

根据上述建立连杆坐标系的方法，其中我们希望建立坐标系 O_{i-1} 相对于坐

标系 O_i 的变换，即 ${}^{i-1}_iT$ 是从坐标系 O_{i-1} 变换到 O_i 的变换矩阵。接下来分别定义四个连杆参数，两个用来描述连杆自身几何尺寸，其他用来表示与相邻连杆之间的相对位置关系，具体为：

连杆转角 θ_i ：为绕 Z_i 从 X_{i-1} 轴与 X_i 轴之间的夹角，右手法则确定正方向；

连杆距离 d_i ：为 Z_i 轴上 X_{i-1} 轴与 X_i 轴之间的距离，移动方向确定正方向；

连杆扭角 α_i ：为绕 X_i 轴从 Z_i 轴与 Z_{i+1} 轴之间的夹角，右手法则确定正方向；

连杆长度 a_i ：为 X_i 轴上 Z_i 轴与 Z_{i+1} 轴之间的距离，移动方向确定正方向；

使得每一个坐标系 O_{i-1} 都可以通过 4 次相对运动变换而变换到坐标系 O_i ，如式(2-4)，通过以下矩阵连乘计算出变换矩阵 ${}^{i-1}_iT$ 。

$$\begin{aligned} {}^{i-1}_iT &= R_X(\alpha_{i-1})D_X(\alpha_{i-1})R_Z(\theta_i)D_Z(d_i) \\ &= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & \alpha_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-4)$$

式中 R_Z 与 R_X 表示绕 Z 与 X 旋转， D_Z 与 D_X 表示沿 Z 与 X 轴平移变换， c 为 $\cos$ 的缩写， s 为 $\sin$ 的缩写。

将各个连杆坐标系变换矩阵相乘，即可得到工具坐标系与基坐标系之间的变换矩阵 ${}^0_nT$ ，如式(2-5)。

$${}^0_nT = \prod_{i=1}^n {}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

如图 2-4 所示，建立六自由度机器人运动学模型， Z_w 轴沿着纸的方向垂直向上， X_w 轴垂直于 Z_w 轴， Y_w 轴方向由右手螺旋规则决定。另外分别建立机器人各个旋转关节的关节坐标系，且 Z_i 轴都指向机器人的末端关节。

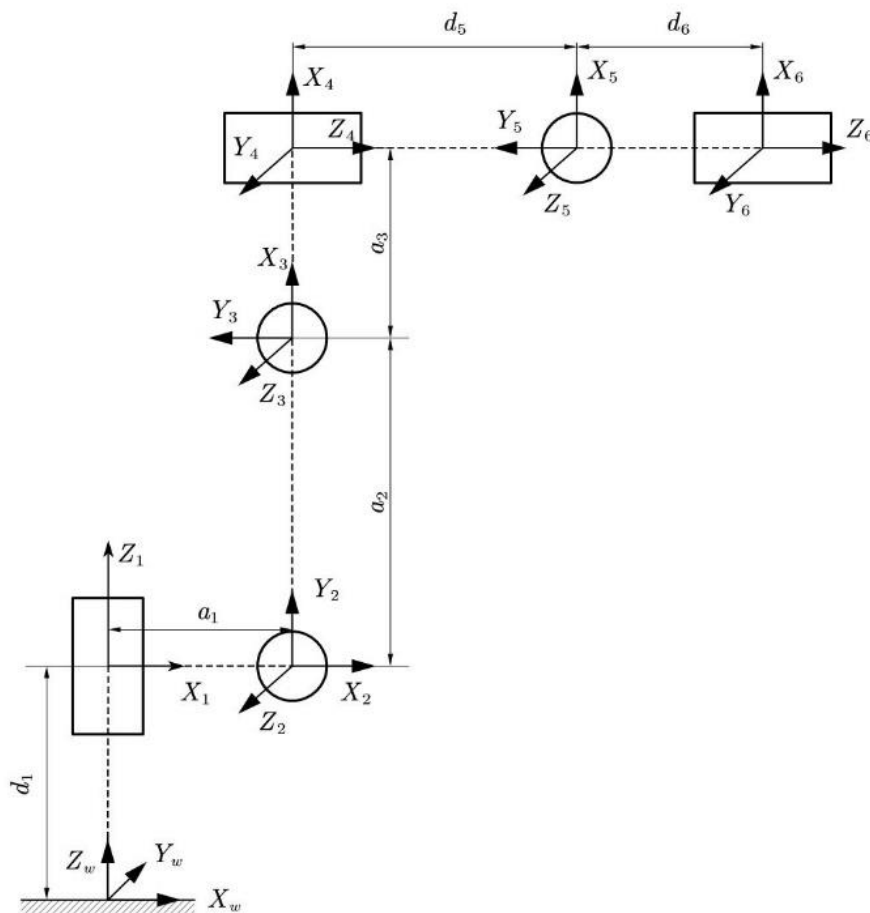


图 2-4 埃夫特机器人关节坐标系分布

本文选取机器人型号为埃夫特公司 ER3-600，建立的机器人运动学模型 DH 参数如下表 2-1。

表 2-1 埃夫特机器人 DH 连杆参数表

	θ_i (连杆转角)	d_i (连杆距离)	a_{i-1} (连杆长度)	α_{i-1} (连杆扭角)
关节 1	θ_1	422	0	0
关节 2	θ_2	0	195	$\pi/2$
关节 3	θ_3	0	680	0
关节 4	θ_4	744.5	175	$\pi/2$
关节 5	θ_5	0	0	$-\pi/2$
关节 6	θ_6	117.5	0	$\pi/2$

将表 2-1 中 DH 参数带入式(2-4)推导得到各个相邻连杆之间的变换矩阵：

$$\begin{aligned}
 {}^w_1T &= \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^1_2T = \begin{bmatrix} c(\theta_2 + \pi/2) & -s(\theta_2 + \pi/2) & 0 & \alpha_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s(\theta_2 + \pi/2) & c(\theta_2 + \pi/2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^2_3T &= \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & \alpha_2 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^3_4T = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & \alpha_3 \\ 0 & 0 & -1 & -d_4 \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^4_5T &= \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -s\theta_5 & -c\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^5_6T = \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -d_6 \\ s\theta_6 & c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (2-6)$$

再通过式(2-5)计算齐次变换矩阵 ${}^w_6T$ 用来表示工具坐标系在基坐标系下的位置和姿态。

$${}^w_6T = {}^w_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T = \begin{bmatrix} n & o & a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

其中：

$$\begin{aligned}
 n_x &= \left(s\theta_6 (c\theta_4 s\theta_1 + c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 s\theta_4 + c\theta_1 c\theta_3 s\theta_2 s\theta_4) - c\theta_6 \times \right. \\
 &\quad \left. (c(\theta_2 + \theta_3) c\theta_1 s\theta_5 - c\theta_5 s\theta_1 s\theta_4 + c\theta_1 c\theta_2 c\theta_4 c\theta_5 s\theta_3 + c\theta_1 c\theta_3 c\theta_4 c\theta_5 s\theta_2) \right) \\
 n_y &= \left(s\theta_6 (c\theta_2 s\theta_1 s\theta_3 s\theta_4 - c\theta_1 c\theta_4 + c\theta_3 s\theta_1 s\theta_2 s\theta_4) - c\theta_6 \times \right. \\
 &\quad \left. (c(\theta_2 + \theta_3) s\theta_1 s\theta_5 + c\theta_5 c\theta_1 s\theta_4 + c\theta_2 c\theta_4 c\theta_5 s\theta_1 s\theta_3 + c\theta_3 c\theta_4 c\theta_5 s\theta_1 s\theta_2) \right) \\
 n_z &= c(\theta_2 + \theta_3) c\theta_4 c\theta_5 c\theta_6 - s(\theta_2 + \theta_3) c\theta_6 s\theta_5 - c(\theta_2 + \theta_3) s\theta_4 s\theta_6
 \end{aligned} \quad (2-8)$$

$$\begin{aligned}
 o_x &= \left(s\theta_6 (c\theta_4 s\theta_1 + c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 s\theta_4 + c\theta_1 c\theta_3 s\theta_2 s\theta_4) + s\theta_6 \times \right. \\
 &\quad \left. (c(\theta_2 + \theta_3) c\theta_1 s\theta_5 - c\theta_5 s\theta_1 s\theta_4 + c\theta_1 c\theta_2 c\theta_4 c\theta_5 s\theta_3 + c\theta_1 c\theta_3 c\theta_4 c\theta_5 s\theta_2) \right) \\
 o_y &= \left(s\theta_6 (c\theta_2 s\theta_1 s\theta_3 s\theta_4 - c\theta_1 c\theta_4 + c\theta_3 s\theta_1 s\theta_2 s\theta_4) + s\theta_6 \times \right. \\
 &\quad \left. (c(\theta_2 + \theta_3) s\theta_1 s\theta_5 + c\theta_5 c\theta_1 s\theta_4 + c\theta_2 c\theta_4 c\theta_5 s\theta_1 s\theta_3 + c\theta_3 c\theta_4 c\theta_5 s\theta_1 s\theta_2) \right) \\
 o_z &= s(\theta_2 + \theta_3) s\theta_5 s\theta_6 - c(\theta_2 + \theta_3) c\theta_6 s\theta_4 - c(\theta_2 + \theta_3) c\theta_4 c\theta_5 s\theta_6
 \end{aligned} \quad (2-9)$$

$$\begin{aligned}
 a_x &= c(\theta_2 + \theta_3) c\theta_1 c\theta_5 - s\theta_5 (c\theta_1 c\theta_2 c\theta_4 s\theta_3 - s\theta_1 s\theta_4 + c\theta_1 c\theta_3 c\theta_4 s\theta_2); \\
 a_y &= c(\theta_2 + \theta_3) c\theta_5 s\theta_1 - s\theta_5 (c\theta_2 c\theta_4 s\theta_1 s\theta_3 + c\theta_1 s\theta_4 + c\theta_3 c\theta_4 s\theta_1 s\theta_2); \\
 a_z &= s(\theta_2 + \theta_3) c\theta_5 + c(\theta_2 + \theta_3) c\theta_4 s\theta_5
 \end{aligned} \quad (2-10)$$

$$\begin{aligned}
 p_x &= \begin{pmatrix} a_1 c \theta_1 + d_4 c(\theta_2 + \theta_3) c \theta_1 - a_3 s(\theta_2 + \theta_3) c \theta_1 - a_2 c \theta_1 s \theta_2 + d_6 s \theta_1 s \theta_4 s \theta_5 \\ + d_6 c(\theta_2 + \theta_3) c \theta_1 c \theta_5 - d_6 c \theta_1 c \theta_2 c \theta_4 s \theta_3 s \theta_5 - d_6 c \theta_1 c \theta_3 c \theta_4 s \theta_2 s \theta_5 \end{pmatrix} \\
 p_y &= \begin{pmatrix} a_1 s \theta_1 - a_2 s \theta_1 s \theta_2 + d_4 c \theta_2 c \theta_3 s \theta_1 - a_3 c \theta_2 s \theta_1 s \theta_3 - a_3 c \theta_3 s \theta_1 s \theta_2 \\ - d_6 c \theta_1 s \theta_4 s \theta_5 - d_4 s \theta_1 s \theta_2 s \theta_3 + d_6 c \theta_2 c \theta_3 c \theta_5 s \theta_1 - d_6 c \theta_5 s \theta_1 s \theta_2 s \theta_3 \\ - d_6 c \theta_2 c \theta_4 s \theta_1 s \theta_3 s \theta_5 - d_6 c \theta_3 c \theta_4 s \theta_1 s \theta_2 s \theta_5 \end{pmatrix} \\
 p_z &= \begin{pmatrix} d_1 + a_3 c(\theta_2 + \theta_3) + d_4 s(\theta_2 + \theta_3) + a_2 s \theta_2 + \frac{d_6 c(\theta_2 + \theta_3) s(\theta_4 + \theta_5)}{2} \\ + d_6 s(\theta_2 + \theta_3) c \theta_5 - \frac{d_6 c(\theta_2 + \theta_3) s(\theta_4 - \theta_5)}{2} \end{pmatrix}
 \end{aligned} \quad (2-11)$$

至此，得到机器人关节变量到末端执行器位姿的变换方程。

2.1.3 逆运动学分析

机器人系统的逆向运动学相当于正向运动学的逆过程，由已知工具坐标系相对于基坐标系的期望位置和姿态，计算一系列满足期望要求的关节角，使得工具坐标系位于基坐标系的特定位姿，此为笛卡尔坐标系到关节空间的逆变换。

一般来说，逆运动学包括三大特性：(1)解可能不存在。即机器人具有一定的工作区域，当末端位置在工作区域之外时，解不存在；(2)解的多重性。即解反三角函数造成具有多组解，需要经过剔除剩下与实际情况对应的解；(3)求解方法的多样性。即逆运动学求解的方法一般分为封闭解法和数值解法，本文使用的是封闭解法中目前一种系统化的分离变量法。下文为推导由已知位姿 ${}^w_6T$ 到各关节所需角度 θ_i 的计算过程。

根据公式(2-7)的位姿描述。矩阵变换将两边分别左乘以矩阵 ${}^1_2T^{-1} {}^w_1T^{-1}$ ，右乘以矩阵 ${}^5_6T^{-1}$ ，我们可以得到如下形式：

$${}^1_2T^{-1} {}^w_1T^{-1} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^5_6T^{-1} = {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T \quad (2-12)$$

方程的右边可以得到如下矩阵：

$$\begin{bmatrix} c \theta_3 c \theta_4 c \theta_5 - s \theta_3 s \theta_5 & -c \theta_5 s \theta_3 - c \theta_3 c \theta_4 s \theta_5 & -c \theta_3 s \theta_4 & a_2 + a_3 c \theta_3 + d_4 s \theta_3 \\ c \theta_3 s \theta_5 + c \theta_4 c \theta_5 s \theta_3 & c \theta_3 c \theta_5 - c \theta_4 s \theta_3 s \theta_5 & -s \theta_3 s \theta_4 & a_3 s \theta_3 - d_4 c \theta_3 \\ c \theta_5 s \theta_4 & -s \theta_4 s \theta_5 & c \theta_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

方程的左边可以得到如下：

$$r_{11} = \begin{pmatrix} n_z c\theta_2 c\theta_6 + o_z c\theta_2 s\theta_6 - n_x c\theta_1 c\theta_6 s\theta_2 \\ -n_y c\theta_6 s\theta_1 s\theta_2 + o_x c\theta_1 s\theta_2 s\theta_6 + o_y s\theta_1 s\theta_2 s\theta_6 \end{pmatrix} \quad (2-14)$$

$$r_{21} = \begin{pmatrix} -n_z c\theta_6 s\theta_2 + o_z s\theta_2 s\theta_6 - n_x c\theta_1 c\theta_2 c\theta_6 \\ -n_y c\theta_2 c\theta_6 s\theta_1 + o_x c\theta_1 c\theta_2 s\theta_6 + o_y c\theta_2 s\theta_1 s\theta_6 \end{pmatrix} \quad (2-15)$$

$$r_{31} = n_x c\theta_6 s\theta_1 - n_y c\theta_1 c\theta_6 - o_x s\theta_1 s\theta_6 + o_y c\theta_1 s\theta_6 \quad (2-16)$$

$$r_{41} = 0 \quad (2-17)$$

$$r_{12} = a_x c\theta_1 s\theta_2 - a_z c\theta_2 + a_y s\theta_1 s\theta_2 \quad (2-18)$$

$$r_{22} = a_x c\theta_1 c\theta_2 + a_z s\theta_2 + a_y c\theta_2 s\theta_1 \quad (2-19)$$

$$r_{32} = a_y c\theta_1 - a_x s\theta_1 \quad (2-20)$$

$$r_{42} = 0 \quad (2-21)$$

$$r_{13} = \begin{pmatrix} n_z c\theta_2 s\theta_6 + o_z c\theta_2 c\theta_6 - n_x c\theta_1 s\theta_2 s\theta_6 \\ -n_y s\theta_1 s\theta_2 s\theta_6 - o_x c\theta_1 c\theta_6 s\theta_2 - o_y c\theta_6 s\theta_1 s\theta_2 \end{pmatrix} \quad (2-22)$$

$$r_{23} = \begin{pmatrix} -n_z s\theta_2 s\theta_6 - o_z c\theta_2 c\theta_6 - n_x c\theta_1 c\theta_2 s\theta_6 \\ -n_y c\theta_2 s\theta_1 s\theta_6 - o_x c\theta_1 c\theta_6 s\theta_2 - o_y c\theta_2 c\theta_6 s\theta_1 \end{pmatrix} \quad (2-23)$$

$$r_{33} = n_x s\theta_1 s\theta_6 - n_y c\theta_1 s\theta_6 + o_x s\theta_1 c\theta_6 - o_y c\theta_1 c\theta_6 \quad (2-24)$$

$$r_{43} = 0 \quad (2-25)$$

$$r_{14} = \begin{pmatrix} p_z c\theta_2 - d_1 c\theta_2 + a_1 s\theta_2 - p_x c\theta_1 s\theta_2 - p_y s\theta_1 s\theta_2 \\ -a_z d_6 c\theta_2 + a_x d_6 c\theta_1 s\theta_2 + a_y d_6 s\theta_1 s\theta_2 \end{pmatrix} \quad (2-26)$$

$$r_{24} = \begin{pmatrix} -p_z s\theta_2 + d_1 s\theta_2 + a_1 c\theta_2 - p_x c\theta_1 c\theta_2 \\ -p_y s\theta_1 s\theta_2 + a_z d_6 s\theta_2 + a_x d_6 c\theta_1 c\theta_2 + a_y d_6 c\theta_2 s\theta_1 \end{pmatrix} \quad (2-27)$$

$$r_{34} = p_x s\theta_1 - p_y c\theta_1 - a_x d_6 s\theta_1 + a_y d_6 c\theta_1 \quad (2-28)$$

$$r_{44} = 1 \quad (2-29)$$

求解关节角 θ_1 观察两矩阵，对比两矩阵中的第3行第4列元素，建立一元一次方程后获得 θ_1 的值：

$$p_x s\theta_1 - p_y c\theta_1 - a_x d_6 s\theta_1 + a_y d_6 c\theta_1 = 0 \quad (2-30)$$

化简：

$$-(p_x - a_x d_6) s\theta_1 + (p_y - a_y d_6) c\theta_1 = 0 \quad (2-31)$$

则可以得到：

$$\theta_1 = a \tan 2(p_y - a_y d_6, p_x - a_x d_6) \quad (2-32)$$

求解关节角 θ_3 观察两矩阵，对比两矩阵中的第1行第4列元素和第2行第4列元素，建立二元一次方程组后发现在关节角 θ_1 已知的情况下，方程组中存在 θ_3, θ_2 两个未知量。通过消元法，即可求解得到 θ_3 的值。

$$\begin{pmatrix} p_z c\theta_2 - d_1 c\theta_2 + a_1 s\theta_2 - p_x c\theta_1 s\theta_2 - p_y s\theta_1 s\theta_2 \\ -a_z d_6 c\theta_2 + a_x d_6 c\theta_1 s\theta_2 + a_y d_6 s\theta_1 s\theta_2 \end{pmatrix} = a_2 + a_3 c\theta_3 + d_4 s\theta_3 \quad (2-33)$$

对方程组中的两个方程分别平方后相加，可以将未知量 θ_2 进行消元。则有：

$$a_2 d_4 s\theta_3 + a_2 a_3 c\theta_3 = k \quad (2-34)$$

其中 k 为关于 θ_1 的定值。

$$k = \frac{\begin{pmatrix} p_x^2 c\theta_1^2 - 2d_1 p_z - p_y^2 c\theta_1^2 + a_1^2 + d_1^2 + p_y^2 + p_z^2 + a_z^2 d_6^2 + a_y^2 d_6^2 - \\ 2a_1 p_x c\theta_1 - 2a_1 p_y s\theta_1 + a_x^2 d_6^2 c\theta_1^2 - a_y^2 d_6^2 c\theta_1^2 + p_x p_y s(2\theta_1) + 2a_z d_1 d_6 \\ - 2a_y d_6 p_y - 2a_z d_6 p_z + a_x a_y d_6^2 s(2\theta_1) + 2a_1 a_x d_6 c\theta_1 + 2a_1 a_y d_6 s\theta_1 - 2a_x d_6 p_x c\theta_1^2 \\ + 2a_y d_6 p_y c\theta_1^2 - a_x d_6 p_y s(2\theta_1) - a_y d_6 p_x s(2\theta_1) - a_2^2 + a_3^2 + d_4^2 \end{pmatrix}}{2}$$

为求解这种形式方程，可进行三角恒等变换，则有：

$$\begin{aligned} a_2 d_4 &= \rho c\varphi \\ a_2 a_3 &= \rho s\varphi \end{aligned} \quad (2-35)$$

式中：

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{(a_2 a_3)^2 + (a_2 d_4)^2} \\ \varphi &= a \tan 2(a_2 a_3, a_2 d_4) \end{aligned} \quad (2-36)$$

将式(2-34)代入式(2-35)得：

$$s\theta_3 c\varphi + c\theta_3 s\varphi = \frac{k}{\rho} \quad (2-37)$$

由差角公式得：

$$\begin{aligned} s(\varphi + \theta_3) &= \frac{k}{\rho} \\ c(\varphi + \theta_3) &= \pm \sqrt{1 - \frac{k^2}{\rho^2}} \end{aligned} \quad (2-38)$$

则：

$$\varphi + \theta_3 = a \tan 2 \left(k, \pm \sqrt{(a_2 a_3)^2 + (a_2 d_4)^2 - k^2} \right) \quad (2-39)$$

最后可以得到 θ_3 的解：

$$\theta_3 = a \tan 2 \left(k, \pm \sqrt{(a_2 a_3)^2 + (a_2 d_4)^2 - k^2} \right) - a \tan 2(a_2 a_3, a_2 d_4) \quad (2-40)$$

注意到式中的正负号，则 θ_3 有两种解。

求解关节角 θ_2 观察两矩阵，对比两矩阵中的第 1 行第 4 列元素，建立一元一次方程后发现在关节角 θ_1, θ_3 已知的情况下，方程中只存在未知量 θ_2 ，则可求得其值。列式：

$$\begin{pmatrix} p_z c\theta_2 - d_1 c\theta_2 + a_1 s\theta_2 - p_x c\theta_1 s\theta_2 - p_y s\theta_1 s\theta_2 \\ -a_z d_6 c\theta_2 + a_x d_6 c\theta_1 s\theta_2 + a_y d_6 s\theta_1 s\theta_2 \end{pmatrix} = a_2 + a_3 c\theta_3 + d_4 s\theta_3 \quad (2-41)$$

式可变为：

$$\begin{pmatrix} c\theta_2 (p_z - d_1 - a_z d_6) \\ +s\theta_2 (a_1 - p_x c\theta_1 - p_y s\theta_1 + a_x d_6 c\theta_1 + a_y d_6 s\theta_1) \end{pmatrix} = a_2 + a_3 c\theta_3 + d_4 s\theta_3 \quad (2-42)$$

同理可三角变换求解得：

$$\theta_2 = a \tan 2 \left(a_2 + a_3 c\theta_3 + d_4 s\theta_3, \pm \sqrt{(p_z - d_1 - a_z d_6)^2 - (a_2 + a_3 c\theta_3 + d_4 s\theta_3)^2} \right) \times \sqrt{(a_1 - p_x c\theta_1 - p_y s\theta_1 + a_x d_6 c\theta_1 + a_y d_6 s\theta_1)^2} \quad (2-43)$$

注意到式中的正负号，且 θ_3 有两种解，则 θ_2 有四种解。

求解关节角 θ_5 观察两矩阵，对比两矩阵中的第 1 行第 2 列和第 2 行第 2 列元素，建立方程后发现在关节角 θ_1, θ_2 已知的情况下，方程中只存在未知量 θ_5 ，则可求得其值。列式：

$$a_x c\theta_1 s\theta_2 - a_z c\theta_2 + a_y s\theta_1 s\theta_2 = -c\theta_5 s\theta_3 - c\theta_3 c\theta_4 s\theta_5 \quad (2-44)$$

$$a_x c\theta_1 c\theta_2 + a_z s\theta_2 + a_y c\theta_2 s\theta_1 = c\theta_3 c\theta_5 - c\theta_4 s\theta_3 s\theta_5 \quad (2-45)$$

式(2-44)乘上 $\cos\theta_3$ ，式(2-45)乘上 $\sin\theta_3$ 然后相加：

$$\begin{pmatrix} s\theta_3(a_x c\theta_1 c\theta_2 + a_z s\theta_2 + a_y c\theta_2 s\theta_1) \\ +c\theta_3(a_x c\theta_1 s\theta_2 - a_z c\theta_2 + a_y s\theta_1 s\theta_2) \end{pmatrix} = -c\theta_4 s\theta_5 \quad (2-46)$$

观察第 3 行第 2 列元素：

$$a_y c\theta_1 - a_x s\theta_1 = -s\theta_4 s\theta_5 \quad (2-47)$$

由上式联立可得：

$$\theta_5 = a \tan 2 \begin{pmatrix} \pm \sqrt{\frac{s\theta_3(a_x c\theta_1 c\theta_2 + a_z s\theta_2 + a_y c\theta_2 s\theta_1) + c\theta_3(a_x c\theta_1 s\theta_2 - a_z c\theta_2 + a_y s\theta_1 s\theta_2)}{+(a_y c\theta_1 - a_x s\theta_1)^2}} \\ -s\theta_3(a_x c\theta_1 c\theta_2 + a_z s\theta_2 + a_y c\theta_2 s\theta_1) \\ -c\theta_3(a_x c\theta_1 s\theta_2 - a_z c\theta_2 + a_y s\theta_1 s\theta_2) \end{pmatrix} \quad (2-48)$$

注意到式中的正负号，且 θ_3, θ_2 各有两种解，则 θ_5 有八种解。

求解关节角 θ_4 观察两矩阵，对比两矩阵中的第 3 行第 2 列元素，建立方程后发现关节角 θ_1 已知的情况下，方程中 θ_5, θ_4 乘积为定值，则可知 θ_5, θ_4 值一一对应。可得：

$$\theta_4 = a \tan 2 \begin{pmatrix} -(a_y c\theta_1 - a_x s\theta_1), \\ -s\theta_3(a_x c\theta_1 c\theta_2 + a_z s\theta_2 + a_y c\theta_2 s\theta_1) \\ -c\theta_3(a_x c\theta_1 s\theta_2 - a_z c\theta_2 + a_y s\theta_1 s\theta_2) \end{pmatrix} \quad (2-49)$$

θ_5 一共有八种解，则 θ_4 也有八种解。

求解关节角 θ_6 观察两矩阵，对比两矩阵中的第 3 行第 1 列和第 3 行第 3 列元素，建立方程后发现关节角 θ_1, θ_4 已知的情况下，方程中只存在未知量 θ_6 ，则可求得其值。列式可得：

$$n_x c\theta_6 s\theta_1 - n_y c\theta_1 c\theta_6 - o_x s\theta_1 s\theta_6 + o_y c\theta_1 s\theta_6 = c\theta_5 s\theta_4 \quad (2-50)$$

$$n_x s\theta_1 s\theta_6 - n_y c\theta_1 s\theta_6 + o_x s\theta_1 c\theta_6 - o_y c\theta_1 c\theta_6 = c\theta_4 \quad (2-51)$$

整理：

$$c\theta_6(n_x s\theta_1 - n_y c\theta_1) - s\theta_6(o_x s\theta_1 - o_y c\theta_1) = c\theta_5 s\theta_4 \quad (2-52)$$

$$s\theta_6(n_x s\theta_1 - n_y c\theta_1) + c\theta_6(o_x s\theta_1 - o_y c\theta_1) = c\theta_4 \quad (2-53)$$

则由上式三角变换可得：

$$\theta_6 = \arctan 2 \left(\frac{c\theta_6(n_x s\theta_1 - n_y c\theta_1) - c\theta_5 s\theta_4(o_x s\theta_1 - o_y c\theta_1)}{c\theta_6(n_x s\theta_1 - n_y c\theta_1) + c\theta_5 s\theta_4(o_x s\theta_1 - o_y c\theta_1)} \right) \quad (2-54)$$

注意到式中有正负号，且 θ_4 有四种解，则 θ_6 有八种解。

至此，通过运动学解析法将逆向运动学六个关节所有求解结果均已求出。

2.1.4 仿真验证

上述内容对机器人的正逆运动学进行了分析，本小节将对上述求解方法的正确性利用 Matlab 进行理论仿真，来对机器人的正、逆运动学模型加以验证。

首先需要建立机器人的仿真模型。对本文选型的埃夫特 ER-600 型六自由度机器人利用机器人工具箱(Robotics Toolbox)进行模型建立。根据上文表 2-1 中的机器人 DH 参数，调用 Link 以及 SerialLink 对机器人仿真模型的各个关节参数进行设置，最后调用 robot.teach 将三维模型进行展示，并更直观的调教机器人各关节角度值，如图 2-5。

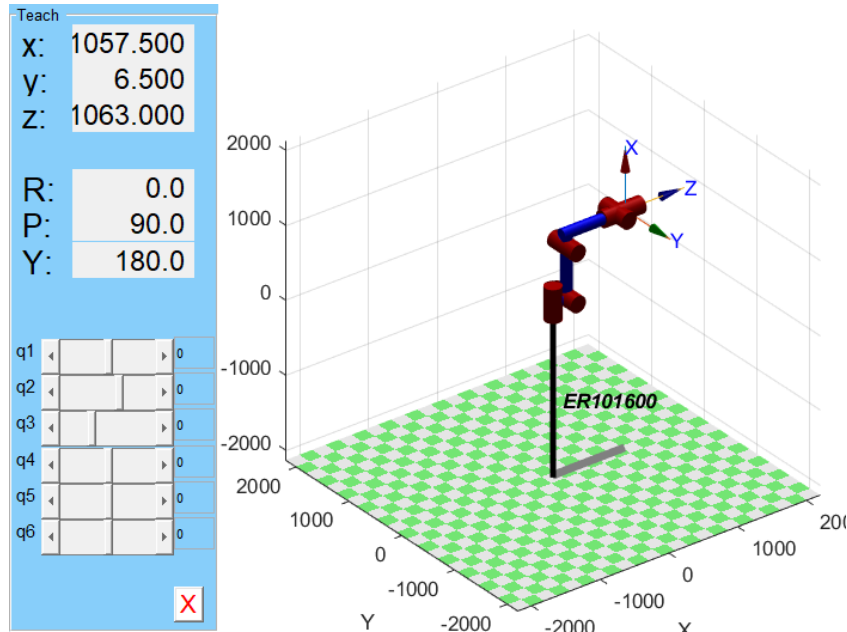


图 2-5 Matlab 机器人三维模型

接下来利用三次多项式插值法对正逆运动学模型进行轨迹规划验证。这其中轨迹规划方面为了实现关节的平稳运动，需要机器人的六个关节在轨迹规划

运动的过程中，都能满足关于轨迹函数 $\theta(t)$ 的约束条件，此时至少需要：起始点与终止点的位置约束以及速度约束。

$$\begin{cases} \theta(0)=a_0=\theta_0 \\ \theta(t_f)=a_0+a_1t_f+a_2t_f^2+a_3t_f^3 \\ \dot{\theta}(0)=a_1=0 \\ \dot{\theta}(t_f)=a_1+2a_2t_f+3a_3t_f^2=0 \end{cases} \quad (2-55)$$

式中 t_f 为终止时刻， θ_0 为起始关节角度， a_0, a_1, a_2, a_3 为三次多项式系数。

通过上述轨迹规划得到机器人末端的理论运行轨迹后，将其离散得到若干关于时间的轨迹点。之后就可以利用 Matlab 进行轨迹规划理论仿真，验证正、逆运动学的有效性，机器人工具箱画出机械臂的运动图像，红色线条代表运动轨迹，如图 2-6。

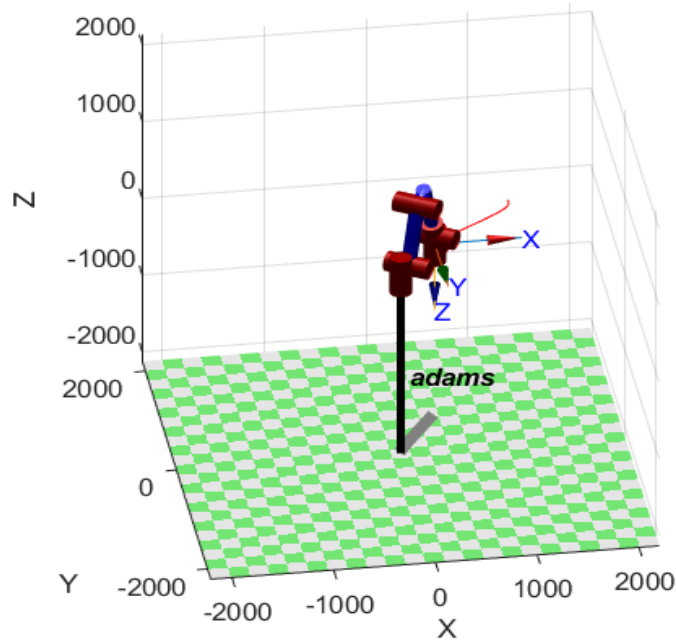


图 2-6 轨迹规划验证

绘制末端 X 、 Y 、 Z 位移对比图 2-7，关节角度角位移对比图 2-8，验证了所正逆运动学模型的正确性。

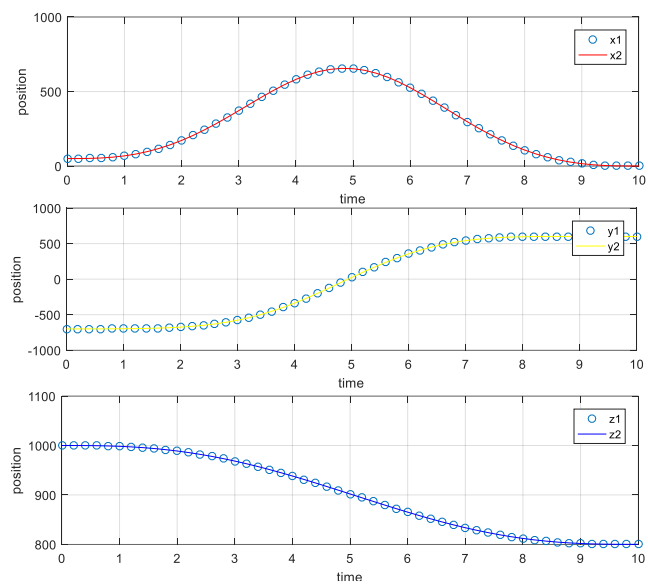


图 2-7 X、Y、Z 位移对比图

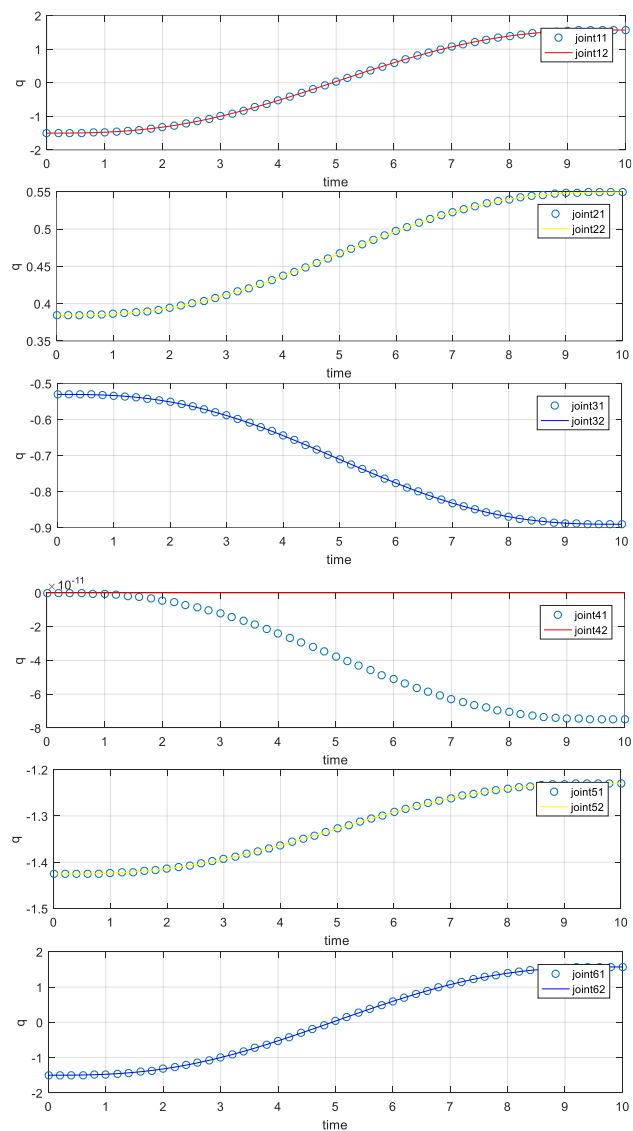


图 2-8 关节角度角位移对比图

2.2 整体系统坐标系建立

本节将基于单目视觉相机安装在作业平面上方，建立视觉引导机器人系统，首先利用小孔成像原理建立视觉系统模型，在上节机器人运动学模型基础上确定视觉系统和机器人系统坐标系之间的变换关系，进而建立整体系统坐标系。

2.2.1 视觉系统模型

视觉坐标系的标定是视觉引导可以实现前提，影响着视觉定位和测量的精度。本文通过建立小孔成像模型来表示视觉相机。小孔成像模型是指物体的光线通过视觉相机光轴中心点投射到成像平面上。模型共包含四个坐标系，像素坐标系 O_{uv} ，世界坐标系，视觉相机坐标系 O_c ，如图 2-9。

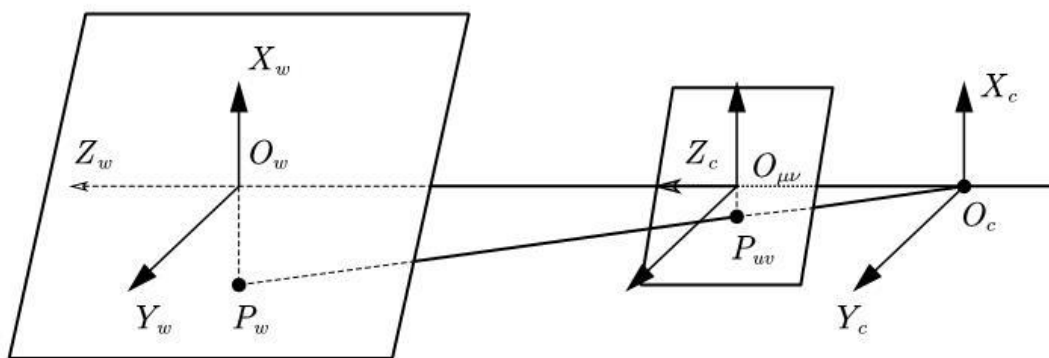


图 2-9 小孔成像模型图

像素坐标系、图像坐标系都为二维坐标系。像素坐标系的横坐标 u 和纵坐标 v 分别表示像素所在行和列，图像坐标系原点为像素坐标系的中点，设为 (u_0, v_0) 。两坐标系关系如图 2-10。

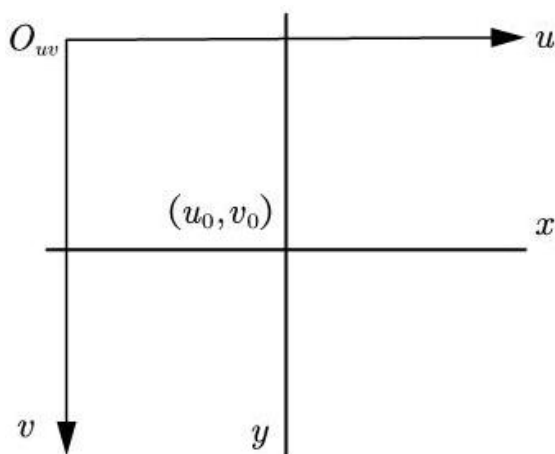


图 2-10 像素坐标系与图像坐标系关系图

可以得出像素坐标系及图像坐标系的坐标关系公式：

$$\begin{cases} u = \frac{x}{dx} + u_0 \\ v = \frac{y}{dy} + v_0 \end{cases} \quad (2-56)$$

dx 与 dy 表示每个像素在图像坐标系的横轴 x 和纵轴 y 表示的物理尺寸，将上式其写成齐次坐标形式即为：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-57)$$

视觉相机坐标系原点为镜头的光心，如图 2-9， $X_c Y_c$ 平面方向与图像坐标系平行， Z_c 方向为视觉相机的光轴并与图像坐标系所在平面垂直，其中 $O_{uv}-O_c$ 的距离为视觉相机的焦距 f 。则根据比例计算得图像坐标系中，设任意一点 $P(x,y)$ 投影到视觉相机坐标系与 X_c 、 Y_c 关系为

$$\begin{cases} x = \frac{fx_c}{Z_c} \\ y = \frac{fy_c}{Z_c} \end{cases} \quad (2-58)$$

将视觉相机坐标系与图像坐标系关系用齐次坐标形式表示为

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-59)$$

视觉相机坐标系可以通过世界坐标系经过平移和旋转后得出，则两者关系可以用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-60)$$

其中 R 表示旋转矩阵 $R_x R_y R_z$ ， T 表示平移矩阵 $[t_x \ t_y \ t_z]^T$ 。

结合上述其他坐标系之间关系可推导出世界坐标系与像素坐标系关系公式，

并建立视觉系统模型如图 2-11。

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-61)$$

式中 Z_c 为比例系数，根据上式可得内参，包含着视觉相机的各种属性，即像元尺寸、焦距等固有属性。设其为 M_1 ，表达式为

$$M_1 = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-62)$$

可得外参，包含着是视觉相机坐标系和世界坐标系之间的旋转平移关系。设其为 M_2 ，表达式为

$$M_2 = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-63)$$

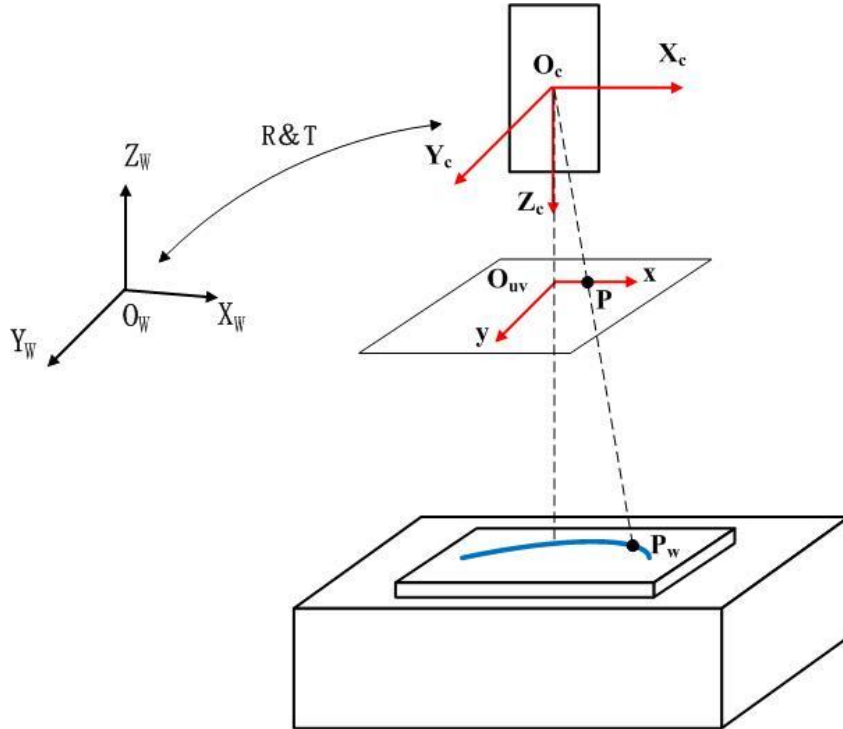


图 2-11 视觉系统模型

为了本章设计的基于视觉引导的机器人磨削轨迹规划及控制策略的实现，首先需要建立整体系统坐标系模型，如图 2-12 所示，整体系统坐标系模型共有五个坐标系，分别是世界（基）坐标系 O_W 、视觉相机坐标系 O_C 、用户坐标系 O_O 、工具坐标系 O_B 以及图像坐标系(x-y)，其中用户坐标系是对工件所在工作台进行定义的一个直角坐标系，可通过世界坐标系进行变换得到。

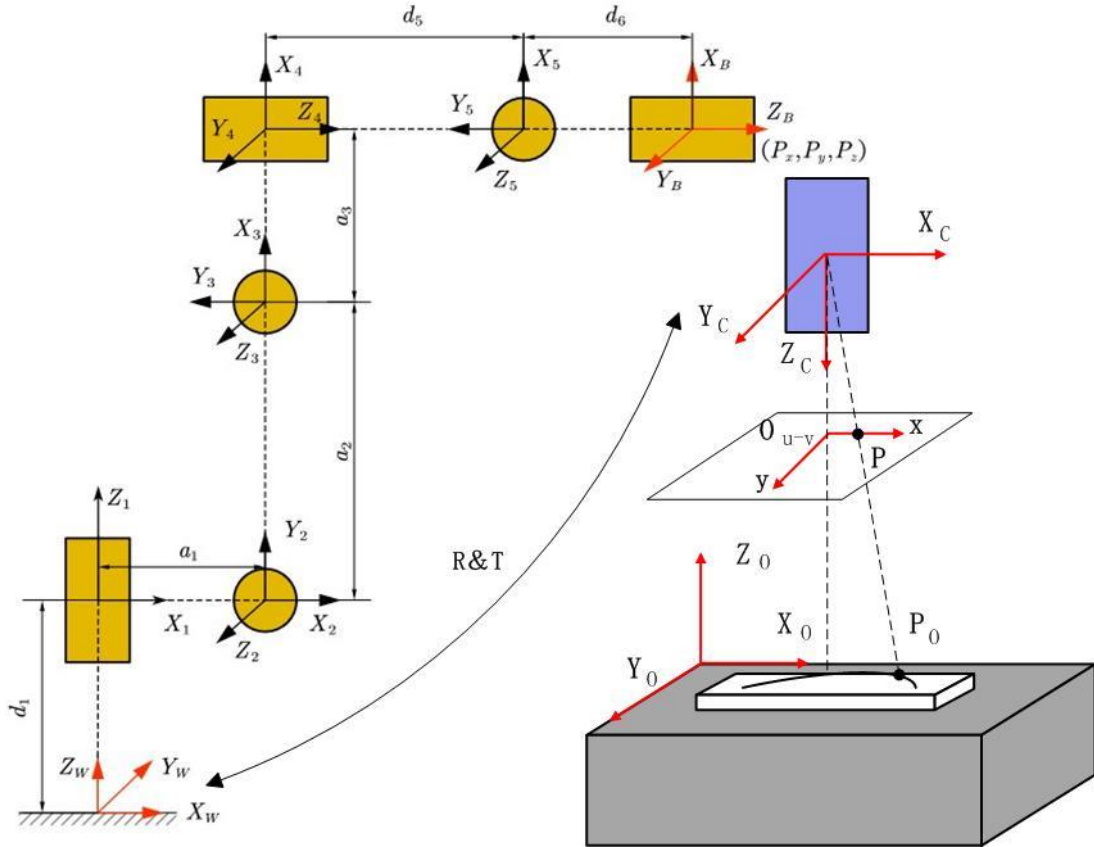


图 2-12 整体系统坐标系模型

根据式(2-7)(2-61)，将机器人运动学模型与视觉系统模型结合得到图像坐标系与工具坐标系之间的变换矩阵

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-64)$$

至此，由式(2-64)，即可将视觉系统得到的工件轨迹特征坐标 $[x \ y \ 1]^T$ 转换为机器人工具坐标系下 $[P_x \ P_y \ P_z]$ ，并基于此进行关于视觉引导机器人轨迹控制策略的虚拟样机联合仿真。

2.3 视觉引导机器人轨迹控制策略

大多运用于磨削加工系统的机器人的各个机构中，由机器人的制造、控制系统和环境变化带来的误差，最终都会随着运动的传递至机器人末端执行器，导致磨削加工产生误差^[62]。为了校正常规磨削作业中存在的误差问题，在此提出视觉引导机器人轨迹控制策略。针对机器人在常规磨削作业过程中末端坐标与理论轨迹存在的误差问题，设计基于模糊 PID 控制器的视觉引导机器人轨迹控制模型来对误差校正控制。

2.3.1 视觉引导机器人轨迹控制策略原理

机器人末端实际输出轨迹与理论轨迹存在一定的误差。如图 2-13 所示，将机器人实际轨迹与理论轨迹的偏差记作 $e(t)$ ， k 时刻轨迹点的误差记作 $e(k)$ ，构造误差函数可以表示为

$$e(k) = \sqrt{(P_x - x)^2 + (P_y - y)^2 + (P_z - z)^2} \quad (2-65)$$

其中， $X_0=[x \ y \ z]^T$ 为机器人理论轨迹点坐标， $[P_x \ P_y \ P_z]$ 为机器人末端实际轨迹点坐标。

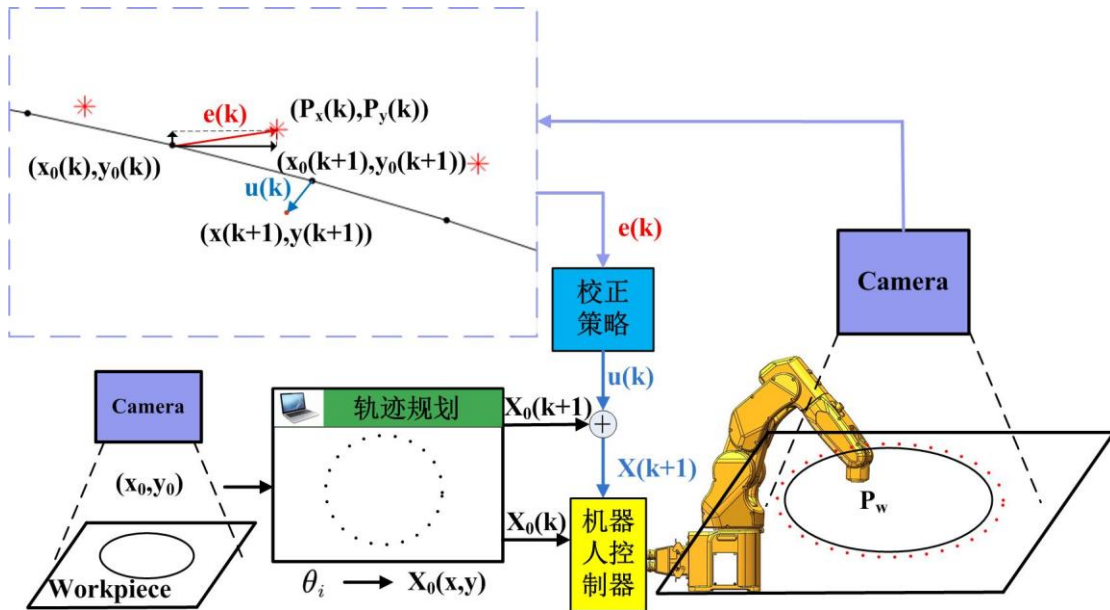


图 2-13 视觉引导机器人轨迹控制流程

在图 2-13 中，视觉相机对工件进行识别轨迹特征点 (x_0, y_0, z_0) 后通过数据传输入上位机进行轨迹规划得到理论轨迹 $X_0(x, y, z)$ ，在引导机器人运动过程中，通过视觉系统反馈 k 时刻机器人末端轨迹点的实际坐标 $P_w(P_x \ P_y \ P_z)$ ，根据视觉相机

反馈的末端轨迹误差 $e(k)$ ，由模糊 PID 控制器计算校正调节量 $e(k)$ ，得到 $k+1$ 时刻机器人轨迹坐标 $X(k+1)$ 并发送给机器人控制器，从而实现机器人轨迹误差实时校正的目的。机器人轨迹误差校正方程可以表示为

$$X(k+1) = X_0(k+1) + U(k) \quad (2-66)$$

式中： $X=[x \ y \ z]^T$ 为调节轨迹点， $X_0=[x \ y \ z]^T$ 为理论轨迹点， $U=[u_x \ u_y \ u_z]^T$ 为校正调节量。

2.3.2 模糊 PID 控制器设计

接下来在 Matlab/Simulink 中设计模糊 PID 控制器达到机器人轨迹误差校正的目的。传统 PID 控制算法参数集通常在系统运行期间保持不变，对其控制具有一定的局限性。而模糊控制是基于模糊数学思想和理论，从行为上模仿人的推理和决策过程的一种智能控制方法。

传统 PID 控制器适用于数据波动的上下范围不是很大的被控系统，在模拟控制系统中，控制器最常用的控制规律就是 PID 控制，其中 PID 的基本常规控制规律如下所示：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2-67)$$

而通常模糊控制包含四个部分：模糊化、模糊规则和解模糊，其工作原理是根据给定的模糊规则进行模糊推理，最后对模糊参数进行解模糊，输出 PID 控制参数，模糊控制器结构如图 2-14 所示。

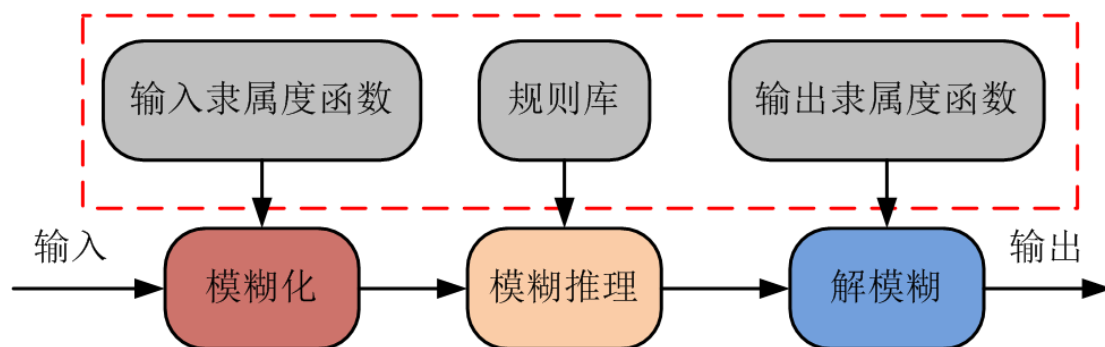


图 2-14 模糊控制器结构图

在 Matlab 中通过设计模糊控制模块来调整传统 PID 控制器的 K_p, K_i, K_d 参数，其中 $u(t)$ 指代 PID 输出； K_p 指代比例系数； K_i 指代积分系数； K_d 指代微分系数，

之后设置 $e, \Delta e, K_p, K_i, K_d$ 的模糊语言变量为 (NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB)，根据机器人系统的特性， $e, \Delta e$ 的输入范围为区间 $[-2, 2]$ 。设计模糊推理系统规则如表 2-2。选择 Z 型隶属度函数，图 2-15 为模糊规则得出的 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 输出曲面，图 2-16 为基于模糊 PID 控制器的视觉引导机器人轨迹控制模型。

K_p, K_i, K_d		Δe						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	PB/NB/ PS	PB/NB/NS	PM/NM/ NB	PM/NM/NB	PS/NS/ NB	Z/Z/NM	Z/Z/PS
	NM	PB/NB/ PS	PB/NB/NS	PM/NM/ NB	PS/NS/NM	PS/NS/ NM	Z/Z/NS	NS/Z/Z
	NS	PM/NB/ Z	PM/NM/N S	PM/NS/ NM	PS/NS/NM	Z/Z/NS	NS/PS/NS	NS/PS/Z
	ZO	PM/NM /Z	PM/NM/N S	PS/NS/N S	Z/Z/NS	NS/PS/ NS	NM/PM/NS	NM/PM/ Z
	PS	PS/NM/ Z	PS/NS/Z	Z/Z/Z	NS/PS/Z	NS/PS/ Z	NM/PM/Z	NM/PB/ Z
	PM	PS/Z/P B	Z/Z/PS	NS/PS/P S	NM/PS/PS	NM/PM /PS	NM/PB/PS	NB/PB/P B
	PB	Z/Z/PB	Z/Z/PM	NM/PS/ PM	NM/PM/P M	NM/PM /PS	NB/PB/PS	NB/PB/P B

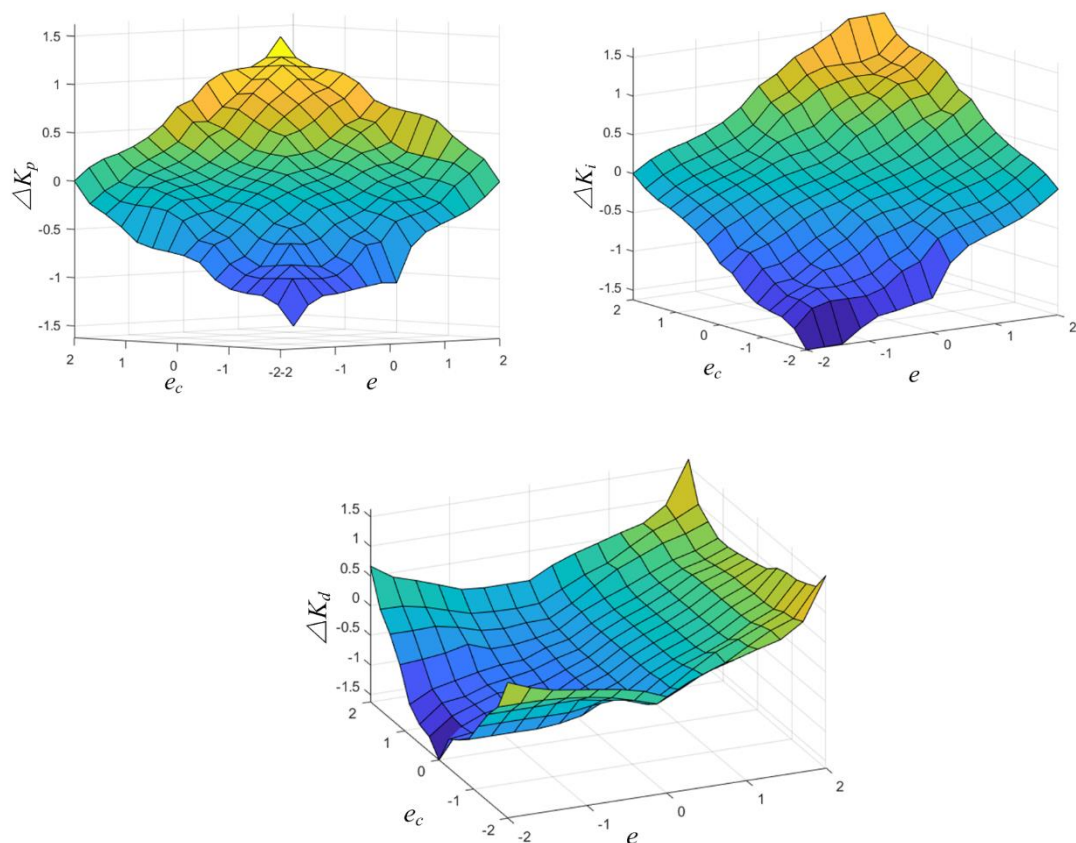


图 2-15 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的输入输出关系图

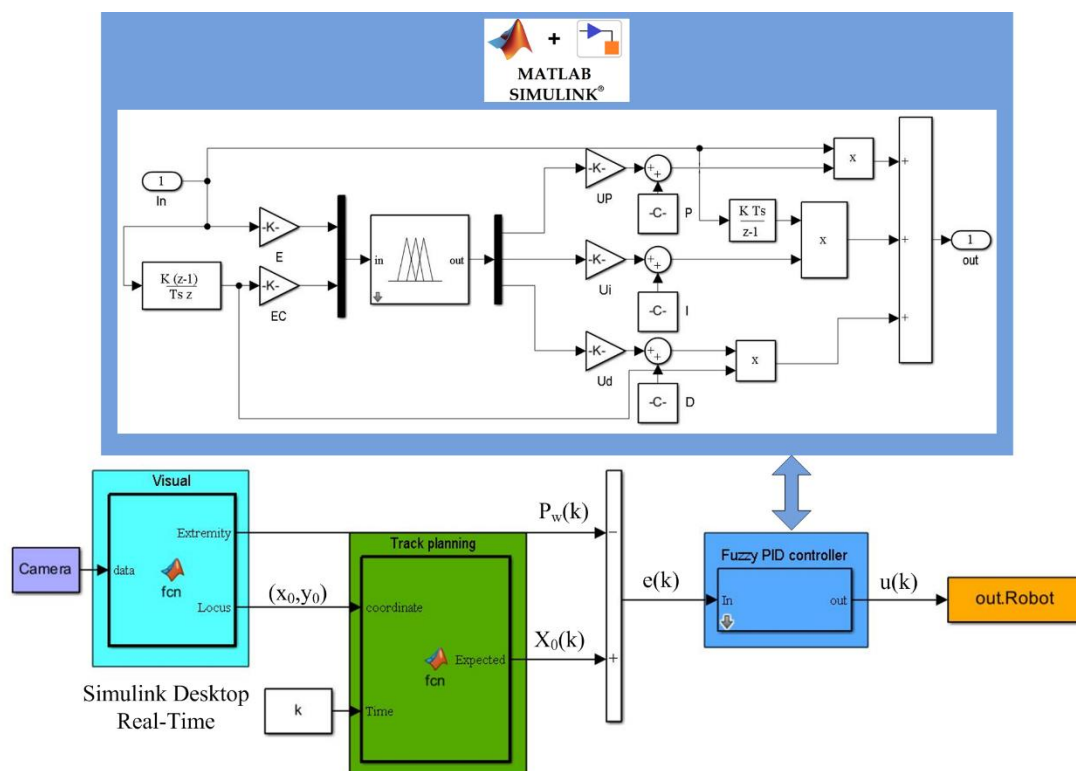


图 2-16 视觉引导机器人轨迹控制模型

如图 2-16，主要包括视觉轨迹获取模块，轨迹规划模块和误差校正模块。通过视觉相机识别，视觉轨迹获取模块可得到工件轨迹特征点坐标 (x_0, y_0, z_0) ，将坐标信息传输入轨迹规划模块，在 k 时刻，输出的理论轨迹 $X_0(k)$ 引导机器人运动过程中，利用视觉轨迹获取模块反馈机器人末端轨迹点的实际坐标 $P_w(k)$ ，将计算的末端轨迹误差 $e(k)$ ，输入误差校正模块实时得到下一时刻的校正调节量 $u(k)$ ，从而达到实时校正的目的。

2.4 联合仿真分析

2.4.1 联合仿真模型建立

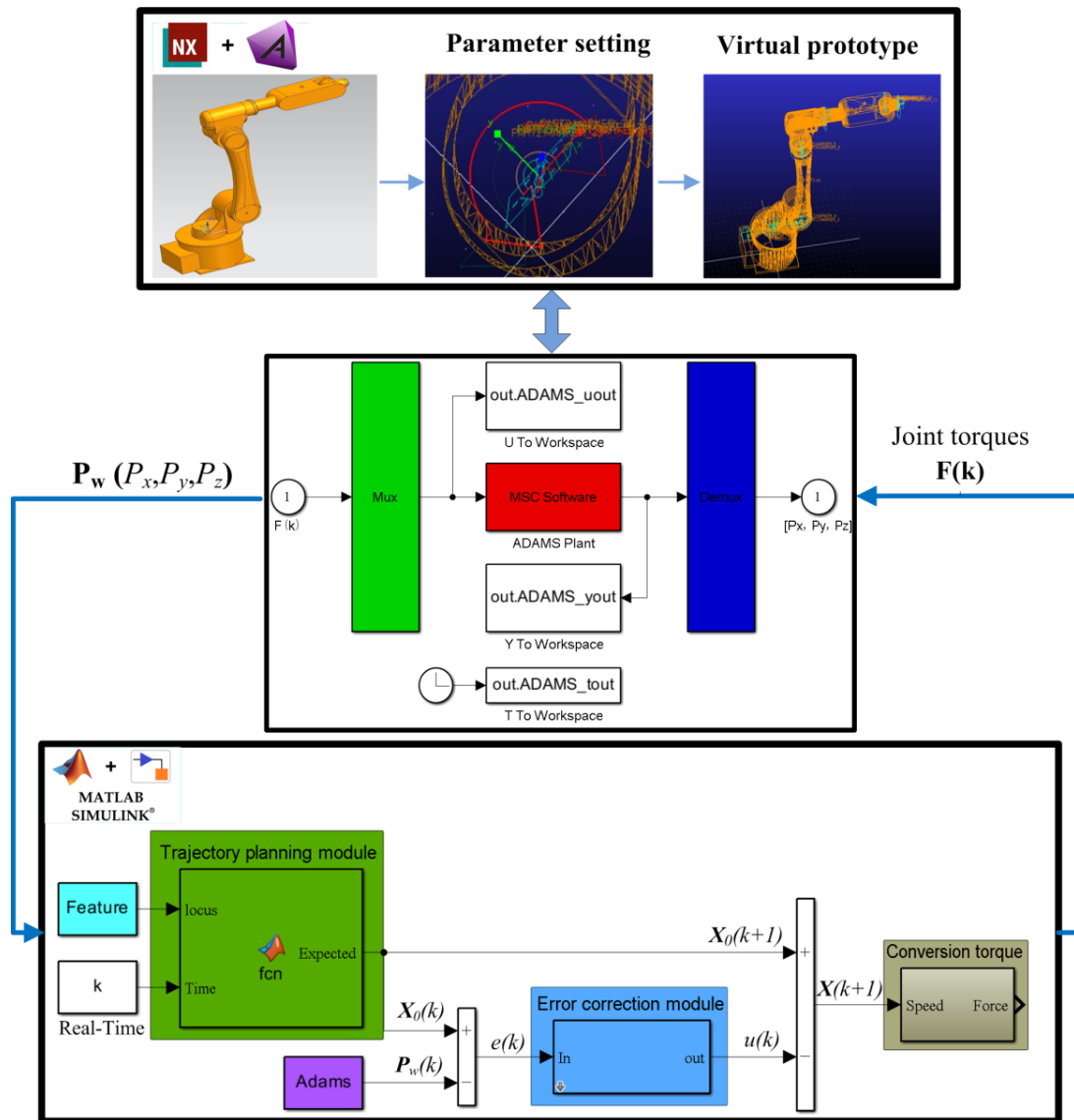


图 2-17 视觉引导机器人轨迹控制虚拟样机联合仿真模型

如图 2-17 所示, 将机器人的三维模型导入 Adams 软件, 对机器人的关节处进行刚度值、力矩值、驱动等的设置, 基于 Adams 软件搭建机器人虚拟样机模型, 结合 Matlab/Simulink 中设计的轨迹控制模型, 搭建视觉引导机器人轨迹控制虚拟样机联合仿真模型。本文选取的机器人 DH 参数如表 2-1 所示, 各关节的刚度值如表 3-1 所示。在虚拟样机联合仿真模型中, 机器人虚拟样机的输入为关节力矩 $F(k)$, 输出为机械臂末端坐标 $P_w(P_x P_y P_z)$ 。

2.4.2 结果分析

在进行虚拟样机联合仿真时, 设置机器人运动轨迹分别为直线轨迹、矩形轨迹和圆形轨迹。如图 2-18, 图 2-19, 图 2-20 所示为误差校正前后机器人末端轨迹对比。可以看出, 无误差校正的机器人轨迹与理论轨迹之间存在明显的误差, 而融合视觉引导机器人轨迹规划及控制策略的机器人末端轨迹精度明显提高。

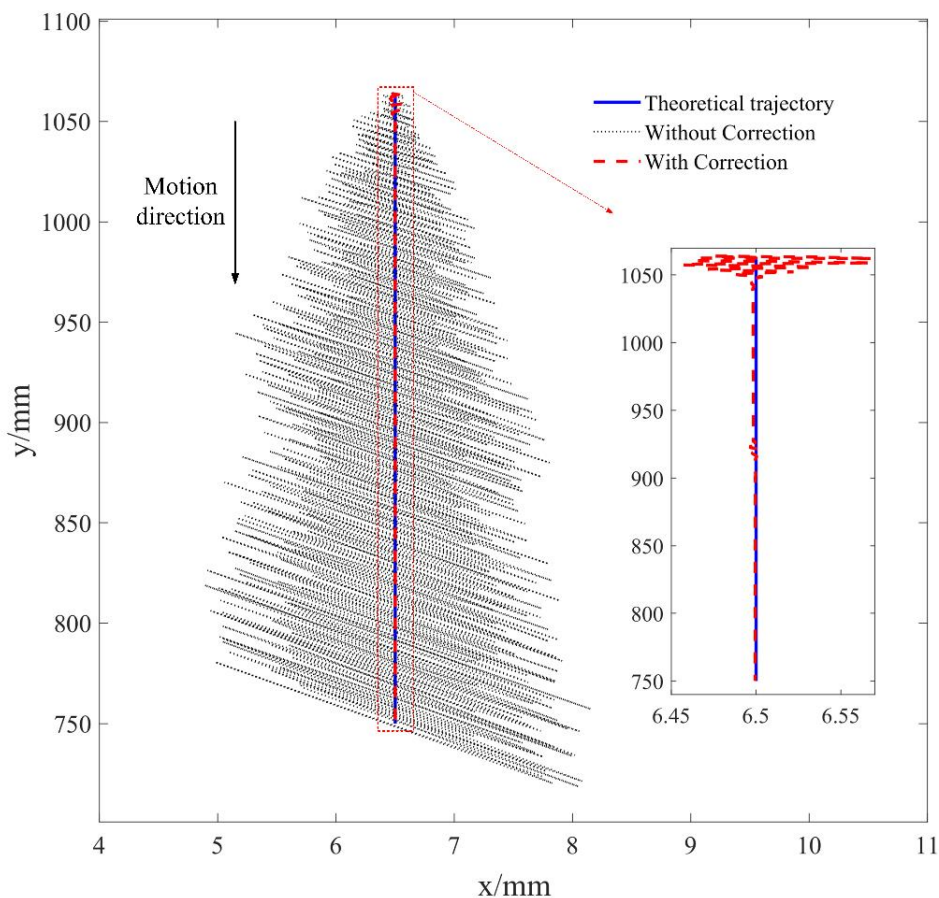


图 2-18 机器人直线轨迹实时误差修正联合仿真结果

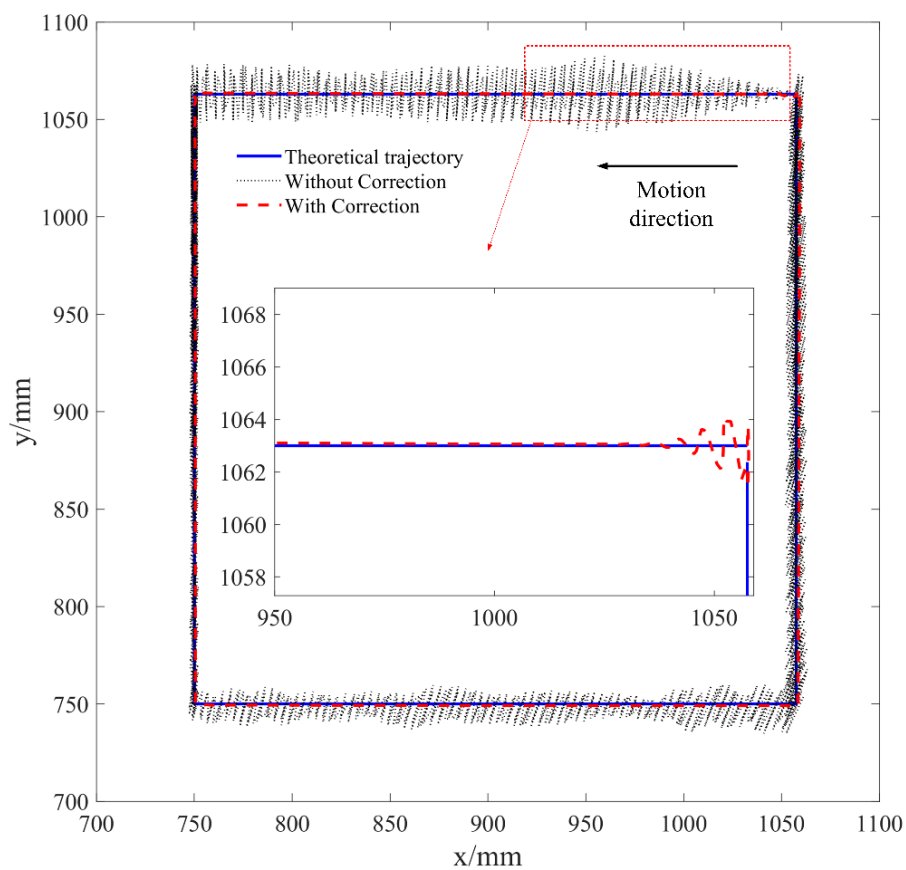


图 2-19 机器人矩形轨迹实时误差修正联合仿真结果

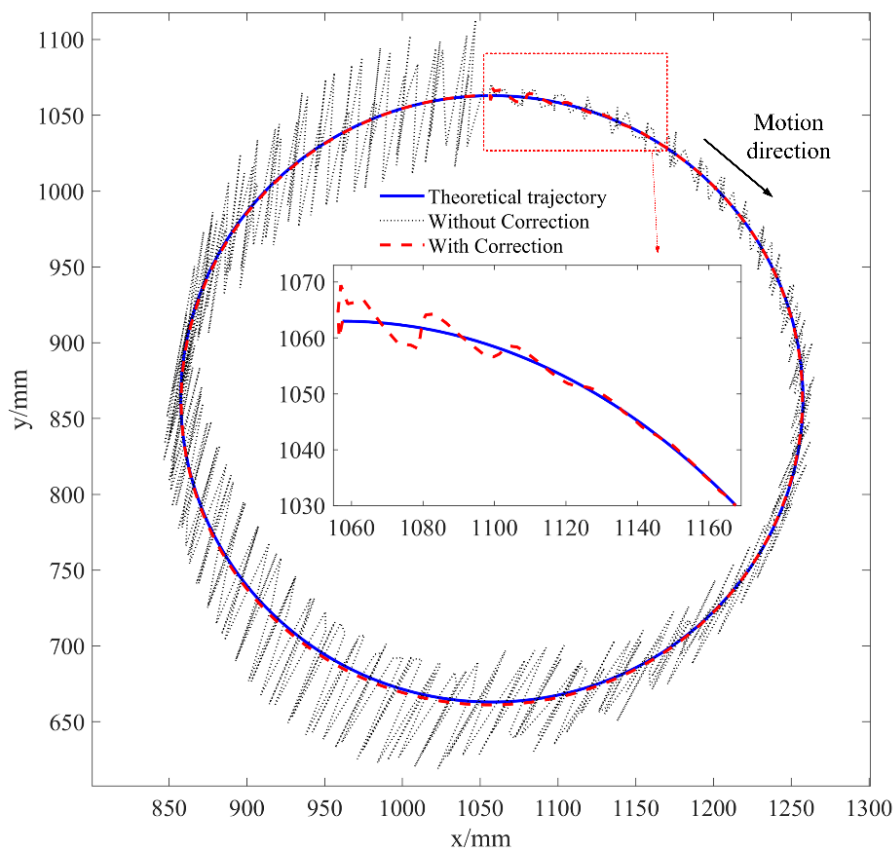


图 2-20 机器人圆形轨迹实时误差修正联合仿真结果

2.5 本章小结

本章开展了基于视觉引导的机器人磨削轨迹规划及控制策略的研究，首先对六轴工业机器人建立了位姿描述，分析了正逆运动学，以此搭建了整体系统坐标系模型，并设计了基于模糊 PID 控制器的视觉引导机器人轨迹控制模型，之后基于 Matlab/Simulink 与 Adams 软件搭建了视觉引导机器人轨迹控制虚拟样机联合仿真模型，开展了虚拟样机联合仿真分析，联合仿真结果表明视觉引导机器人轨迹控制策略能够提高末端位姿的精度，验证了基于视觉引导的机器人磨削轨迹规划及控制策略的有效性。

第3章 柔性关节机器人振动耦合特性及控制策略

工业机器人的串联式开链结构和关节柔性容易激发本体的残余振动，残余振动控制是工业机器人保证机器人作业轨迹精度需要解决的关键问题之一。工业机器人关节主要由伺服电机和减速器组成，其中减速器通常存在柔性元件，关节的柔性降低了机器人的整体刚度，导致机器人在动态作业过程中极易产生残余振动，这严重影响机器人的动态作业精度^[63]。因此，为了提高机器人的轨迹精度，需要在考虑关节柔性的情况下研究机器人的振动控制问题。

本章考虑工业机器人关节的柔性因素，将机器人轨迹规划与末端振动控制相结合，研究柔性关节工业机器人连续轨迹下的动力学特性和振动控制，为机器人磨削轨迹下机器人本体的振动控制提供基础。具体地，首先建立了柔性关节动力学模型，根据关节输出转角和末端轨迹，分析了连续轨迹下柔性关节对工业机器人的振动耦合特性；然后在此基础上，设计了基于 PI 控制器的振动控制策略；之后基于 Matlab/Simulink 与 Adams 软件搭建柔性关节机器人虚拟样机联合仿真模型，最后开展虚拟样机联合仿真，验证柔性关节机器人的振动耦合特性正确性和振动控制策略有效性。

3.1 柔性关节动力学模型

如图 3-1，通常机器人的关节是由伺服电机和 RV 减速器组成，考虑柔性关节的影响，并建立机器人的柔性关节动力学模型。此时机器人末端轨迹与关节存在的关系为

$$P_x = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = f(q_{0i}) \quad (3-1)$$

式中， q_{0i} 表示电动机的转角，即通过运动学逆解和轨迹规划确定的机器人关节的理论角度。

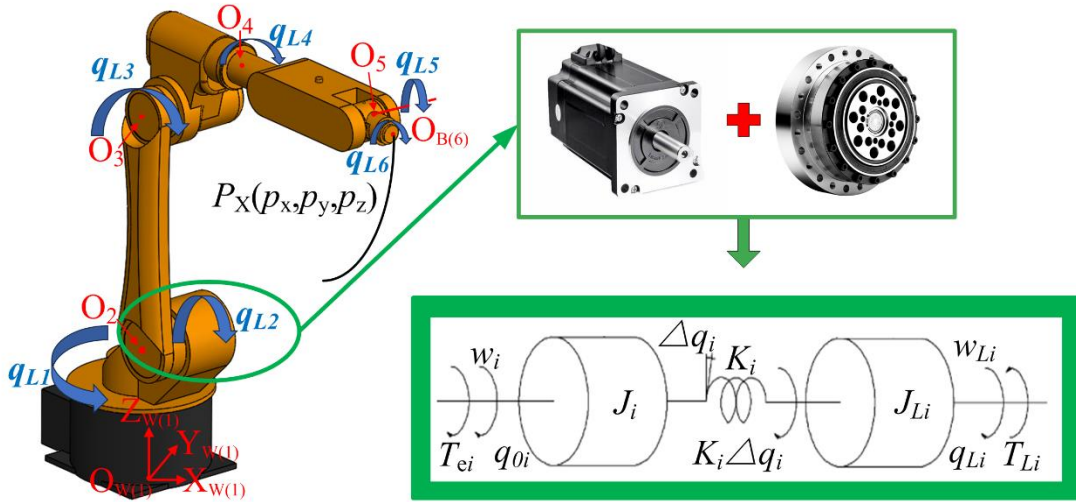


图 3-1 柔性关节动力学模型

为了分析给定的作业轨迹下柔性关节机器人的振动特性，根据图 3-1 所示的机器人柔性关节的动力学模型，建立机器人柔性关节的动力学方程为

$$\begin{cases} J_i \ddot{q}_{0i} = T_{ei} - \frac{T_{si}}{j} \\ J_{Li} \ddot{q}_{Li} = T_{si} - T_{Li} \end{cases} \quad (3-2)$$

式中， J_i 表示电动机的转动惯量， J_{Li} 表示柔性关节负载侧的转动惯量， T_{ei} 表示电动机的电磁转矩和转动惯量， T_{Li} 表示柔性关节负载侧的负载转矩， T_{si} 为柔性关节产生的扭转激励， q_{Li} 表示柔性关节负载侧的转角， j 为柔性关节减速器的传动比。

柔性关节产生的扭转激励^[64]为

$$T_{si} = k_i \Delta q_i = k_i \left(\frac{q_{0i}}{j} - q_{Li} \right) \quad (3-3)$$

式中， k_i 为机器人柔性关节的传动刚度。

联立式(3-2)和式(3-3)可得，

$$J_{Li} \ddot{q}_{Li} + T_{Li} = k_i \left(\frac{q_{0i}}{j} - q_{Li} \right) \quad (3-4)$$

3.2 柔性关节振动特性

根据式(3-4)，可知机器人柔性关节负载侧的实际输出转角与柔性关节的传动刚度有关。本小节通过轨迹规划确定机器人柔性关节的运行轨迹，分析在特

定的作业轨迹，柔性关节机器人的振动耦合特性和末端轨迹振动特性。在 Matlab/simulink 中搭建柔性关节机器人振动耦合特性模型，如图 3-2 所示。

机器人传动系统中不同位置 a ， b 传动件的刚度折算公式为

$$K_{ab} = \frac{K_b}{i_{ab}^2} \quad (3-5)$$

通过本文选取的机器人型号，根据式(3-5)，将各个关节内部传动结构包括伺服电机、圆柱齿轮以及减速器在内的扭转刚度折算到对应关节的输出端。并设置各个关节等效刚度仿真参数如表 3-1 所示。

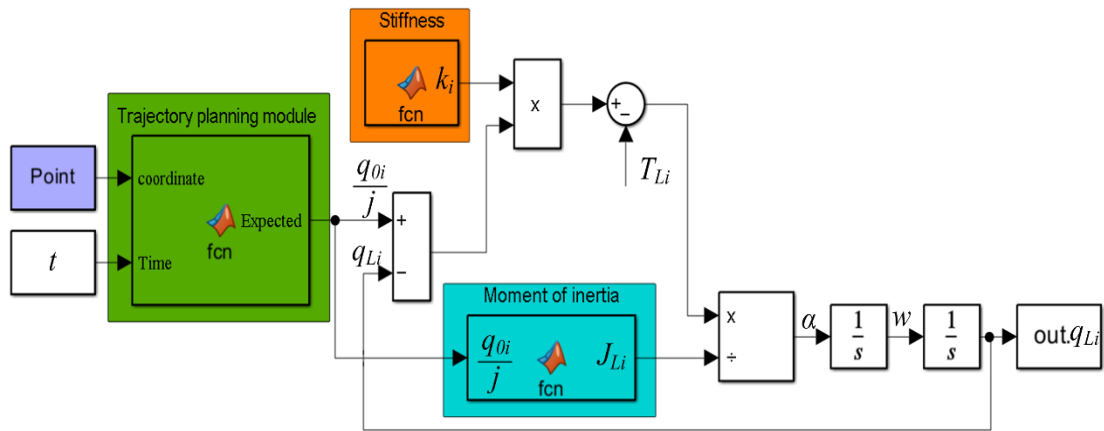


图 3-2 柔性关节机器人振动耦合特性模型

表 3-1 机器人的关节刚度

关节	刚度
1	1.178E+7
2	1.178E+7
3	6.474E+6
4	3.841E+5
5	2.214E+5
6	1.403E+5

在进行理论仿真时，首先根据期望的机器人末端作业轨迹进行轨迹规划，得到机器人关节的轨迹。考虑到机器人的末端轨迹主要由前三关节决定，仿真过程主要观测机器人前三关节的振动特性。设置机器人末端的期望轨迹为直线轨迹和圆形轨迹，如图 3-3 和图 3-4 所示为机器人关节转角和末端轨迹。可以看出，在关节柔性因素下，机器人各关节的实际输出转角和末端轨迹与理论结果存在明显差异，说明机器人关节的柔性对机器人的振动特性具有重要影响。

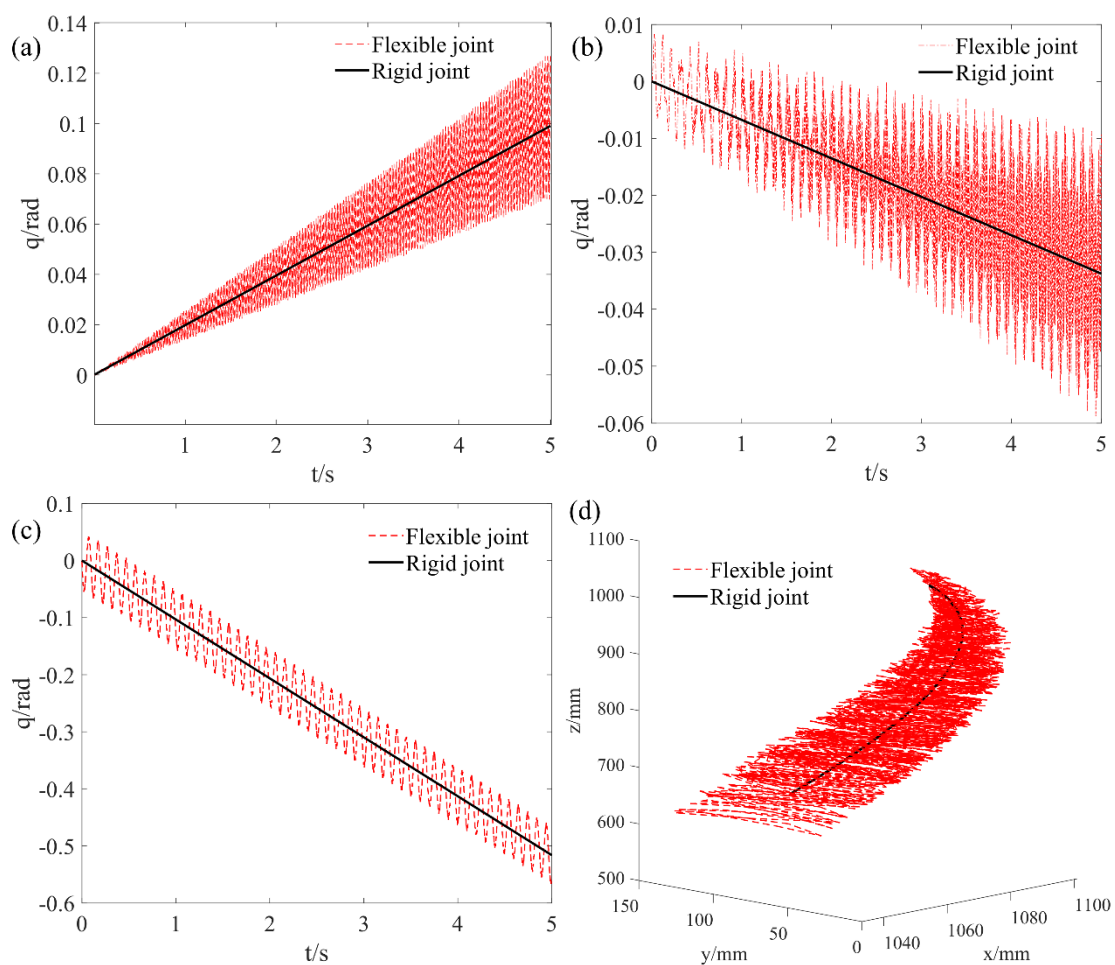
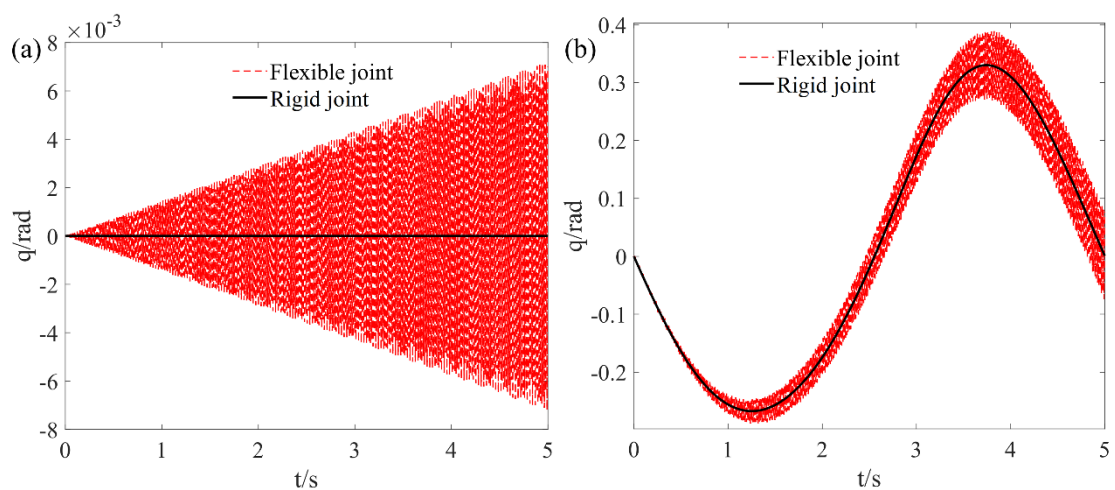


图 3-3 直线轨迹下柔性关节机器人振动耦合特性：(a)关节 1；(b)关节 2；(c)关节 3；(d)末端轨迹



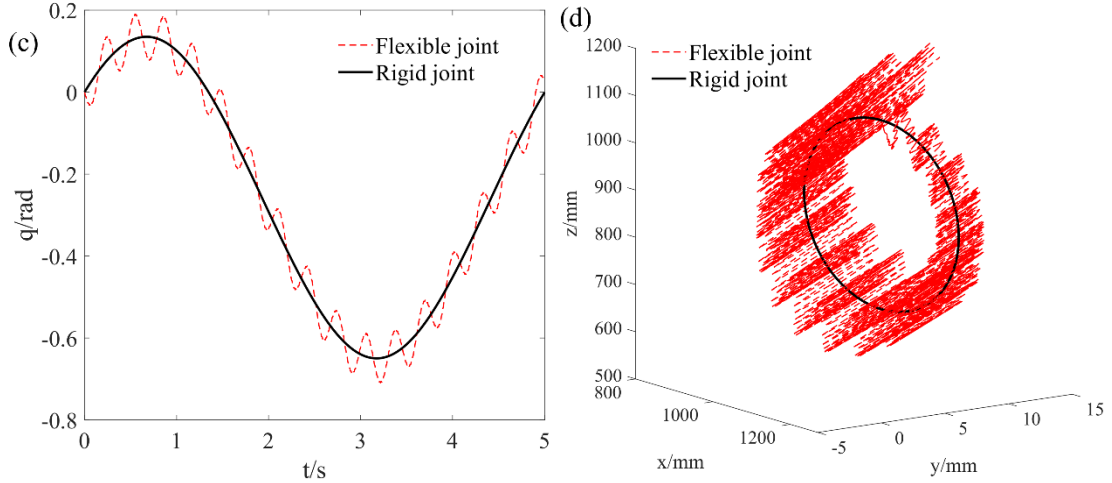


图 3-4 圆形轨迹下柔性关节机器人振动耦合特性: (a)关节 1; (b)关节 2; (c)关节 3; (d)末端轨迹

3.3 基于 PI 控制器的振动控制策略

根据柔性关节机器人的振动耦合特性分析可以看出, 关节柔性对机器人的动态特性具有重要影响, 关节输出转角和末端轨迹与理论轨迹存在一定的扰动误差。本节通过设计柔性关节机器人的振动控制策略, 通过关节控制实现机器人末端轨迹控制。

首先构造误差函数为

$$e(t) = w_0(t) - w_L(t) \quad (3-6)$$

式中, w_0 为关节的给定转速。 w_L 为关节的实际输出转速。

根据关节转速误差 $e(t)$ 调控机器人关节力矩, 可得

$$T_{ei} = xJ_e(t) + \frac{T_{si}}{j} \quad (3-7)$$

根据式(3-3)和式(3-6), 明显可基于 PI 控制原理将式(3-7)进一步改写得到

$$T_{ei} = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3-8)$$

式中, $K_p = xJ_i$, $K_i = \frac{k_i}{j}$ 。

根据式(3-8), 可设计基于 PI 控制器的柔性关节机器人振动控制策略, 如图 3-5。

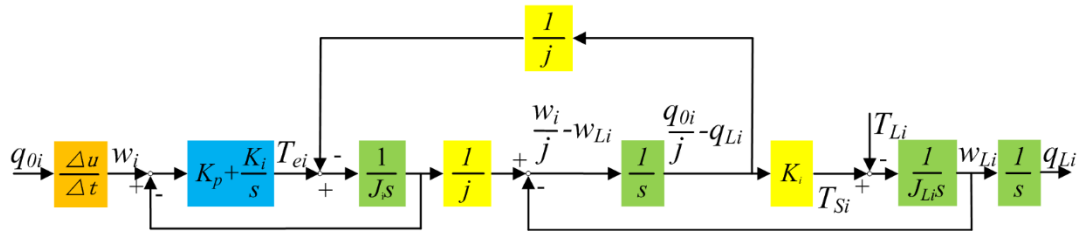


图 3-5 基于 PI 控制器的振动控制策略

3.4 联合仿真分析

3.4.1 虚拟样机模型建立及参数设置

本节将根据第二章机器人的运动学模型，通过 UG 建立机器人模型，之后在 Adams 中对 UG 导出的机器人系统模型 x_t 文件进行导入 bin 文件建立 Adams 模型。如图 3-6 所示。首先对机器人模型进行等效简化，将关节减速器等效成具有刚度阻尼特性的弹簧元件；关节驱动电机等效成具有扭转驱动力矩、转动惯量和阻尼系数的刚体，并且驱动力矩作用在该连杆电机位置。

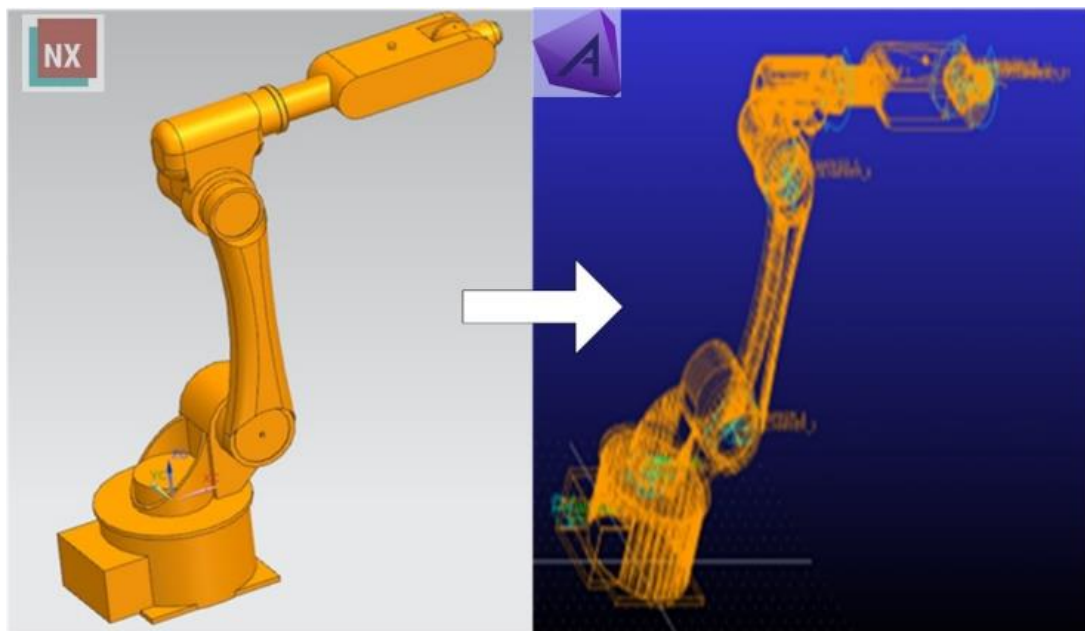


图 3-6 机器人模型转换

完成了 Adams 模型的建立后，在机器人的各个关节处添加约束类型以及构件，如表 3-2 所示。

表 3-2 机器人关节 ADAMS 简化模型约束类型

约束顺序	约束构件	约束类型
1	大地与机器人基座	固定约束
2	机器人基座与连杆 1	旋转约束
3	连杆 1 与连杆 2	旋转约束
4	连杆 2 与连杆 3	旋转约束
5	连杆 3 与连杆 4	旋转约束
6	连杆 4 与连杆 5	旋转约束
7	连杆 5 与连杆 6	旋转约束

为了搭建 Matlab/Simulink 与 Adams 的联合仿真模型，需要设置输入变量为从 Simulink 虚拟样机联合仿真模型输入到 Adams 的动力矩值、阻力矩值，输出变量为从 Adams 输出到 Simulink 虚拟样机联合仿真模型的机器人关节角位移值、角速度值，从而实现闭环控制，如表 3-3。

表 3-3 联合仿真模型输入输出变量表

变量类型	变量代表意义
输入变量	输入端驱动力矩 τ_d
	输入端阻力矩 τ_e
	关节输出转角 θ
输出变量	关节输出角速度 w
	机器人末端坐标 P_w

定义关节输出转角需要利用 AZ 函数进行定义；定义关节输出角速度需要利用 VZ 函数进行定义；定义机器人末端坐标位移需要分别对三坐标轴 P_w (x、y、z) 的输出信号进行设置，利用 DX、DY、DZ 函数定义 x、y、z 方向位移，然后在获取对象数据一栏选择相应的 to_marke 和 for_marke 点插入相应对象名称进行设置。之后将 Matlab/Simulink 与 Adams 联合仿真文件导出，如图 3-7。



图 3-7 Adams 导出联合仿真文件

利用 Matlab/Simulink 与 Adams 联合仿真，结合轨迹规划结果对建立的虚拟样机模型进行验证。验证思路是：通过轨迹规划得到机器人末端的理论运行轨迹，并将其离散得到若干关于时间的轨迹点，根据式(3-4)并进行计算当前关节所需关节力矩，分别进行联合仿真及理论仿真，如图 3-8。

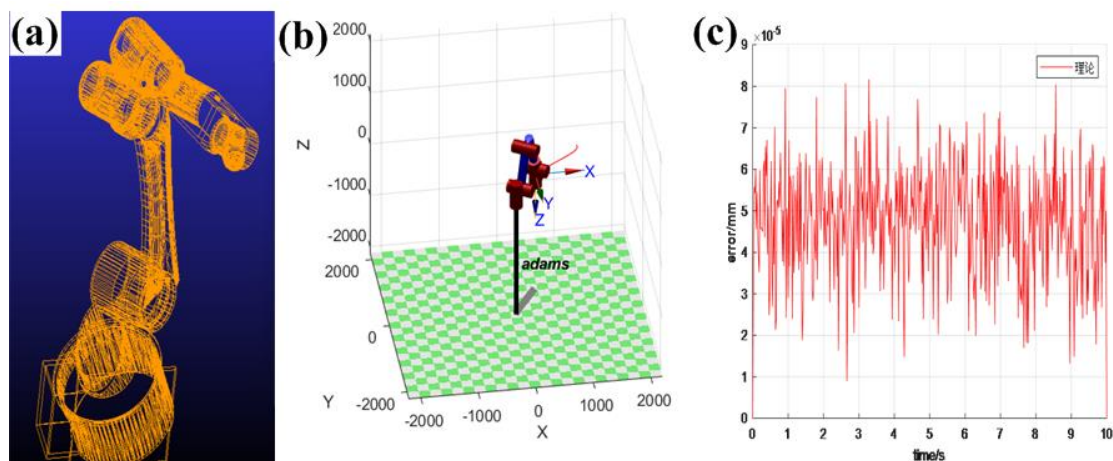


图 3-8 轨迹规划验证: (a)Adams 轨迹规划;(b)Matlab 轨迹规划;(c)误差对比曲线

导出两次仿真运行过程的轨迹点坐标(x,y,z)，根据误差计算式(2-66)，绘制误差对比，如图 3-8，可见误差小于 10×10^{-5} ，验证得到所建立的机器人虚拟样机模型正确。

3.4.2 联合仿真模型

由前文分析可以看出，机器人在进行轨迹规划运行时，因自身的柔性关节问题使得末端轨迹存在明显波动。以振动特性模型、振动控制策略和已验证虚拟样机模型为基础，搭建关节柔性耦合下机器人振动控制虚拟样机联合仿真模型，通过联合仿真验证振动控制策略的有效性，如图 3-9。

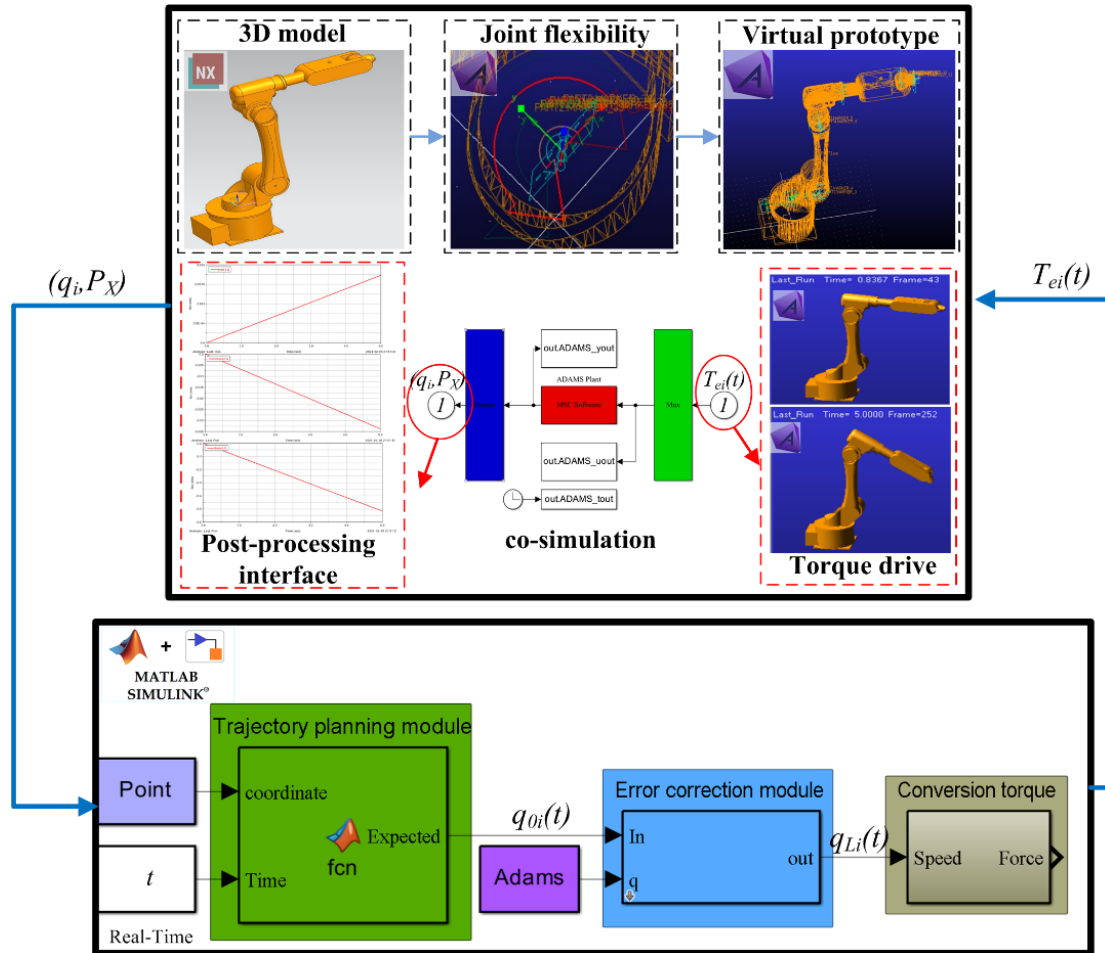


图 3-9 关节柔性耦合下机器人振动控制虚拟样机联合仿真流程

如上图，首先对期望轨迹进行轨迹规划并通过机器人关节力矩公式计算各个关节所需力矩大小输入 Adams 模型，然后通过 Matlab/Simulink 与 Adams 虚拟样机联合仿真将仿真输出角度值以及角速度值等反馈至 Matlab/Simulink 模型，根据上文所设计的基于 PI 控制器的振动控制策略，对输入力矩进行实时调控，以此来验证柔性关节下机器人的振动耦合特性以及所设计的振动控制策略的有效性。

3.4.3 结果分析

在联合仿真的过程中，设置机器人的末端期望轨迹为直线轨迹和圆形轨迹，机器人关节的输出转角和末端轨迹如图 3-10 和图 3-11 所示。可以看出，在直线轨迹和圆形轨迹下柔性关节机器人关节的输出转角和末端轨迹存在明显的波动，验证了振动耦合动力学特性分析结论。

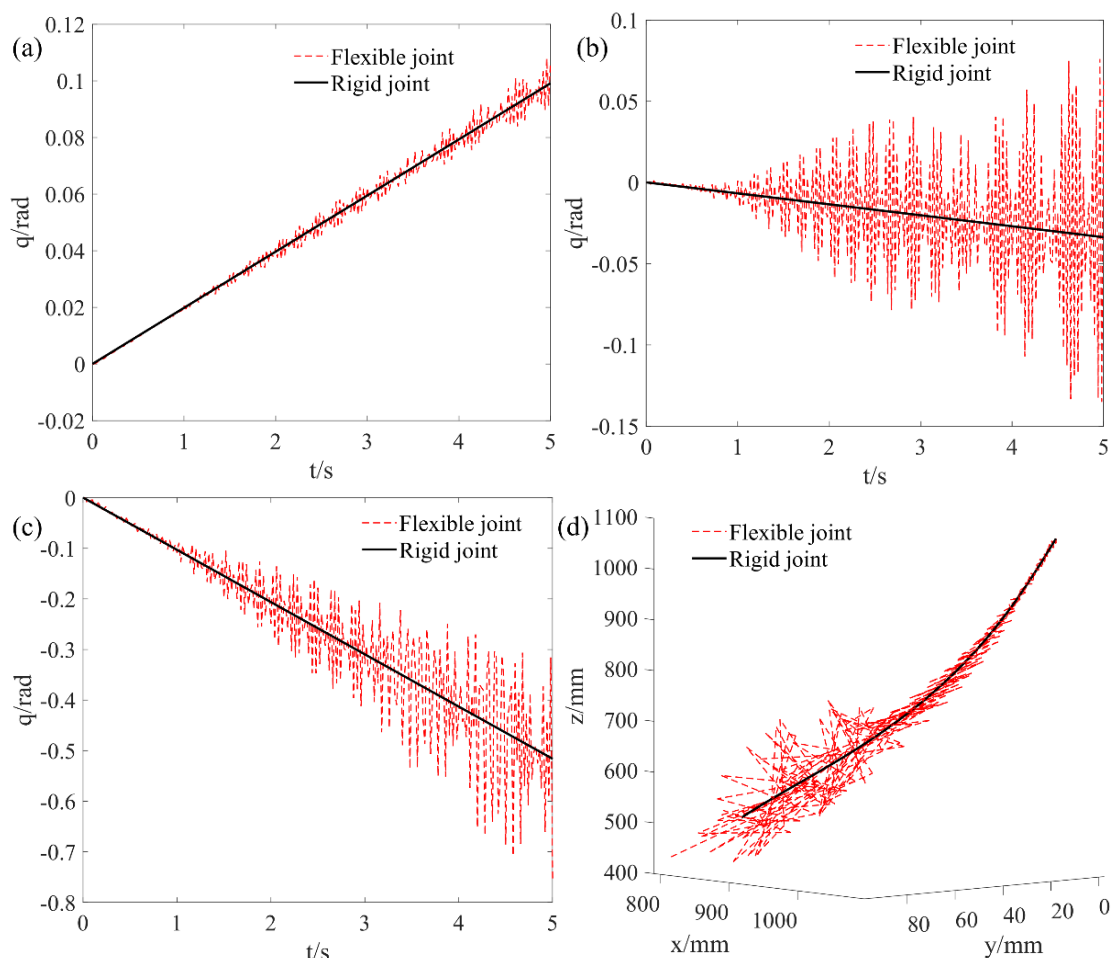
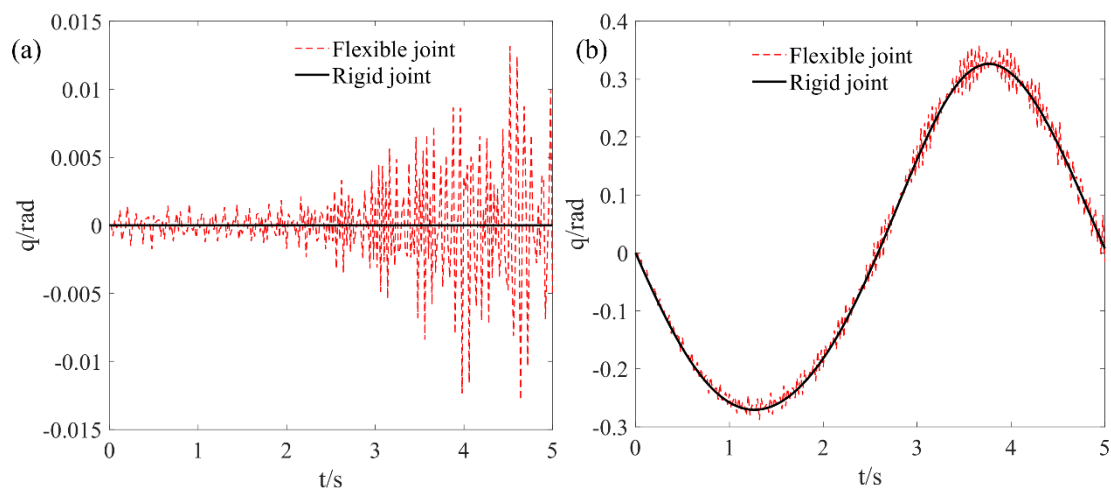


图 3-10 直线轨迹下联合仿真结果：(a) 关节 1；(b) 关节 2；(c) 关节 3；(d) 末端轨迹



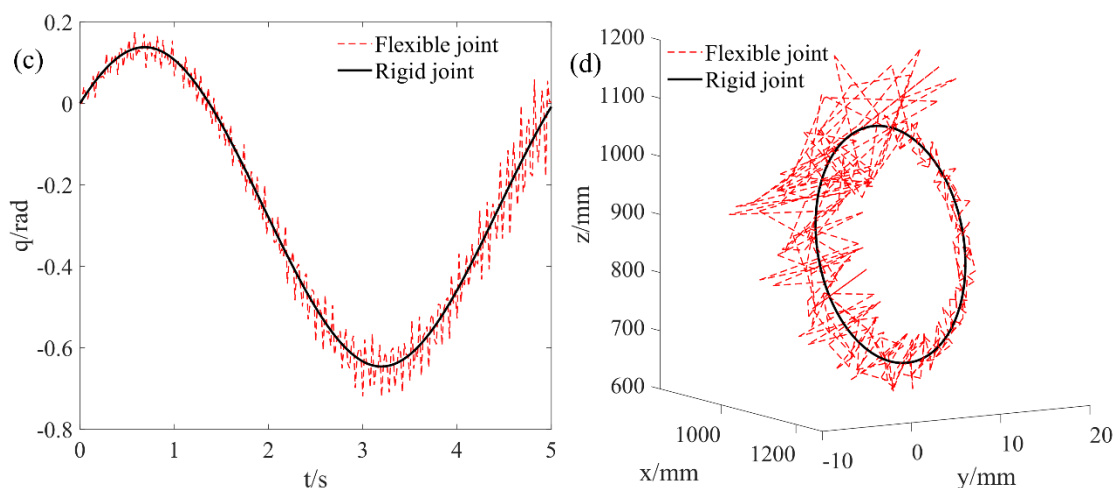


图 3-11 圆形轨迹下联合仿真结果：(a) 关节 1；(b) 关节 2；(c) 关节 3；(d) 末端轨迹

如图 3-12 与图 3-13 所示为柔性关节机器人振动控制轨迹特性。可以看出，设计的振动控制策略能够抑制机器人柔性关节产生的振动，机器人的关节和末端轨迹精度明显提高，能够有效跟踪理论轨迹，验证了关节柔性耦合下机器人振动控制策略的有效性。

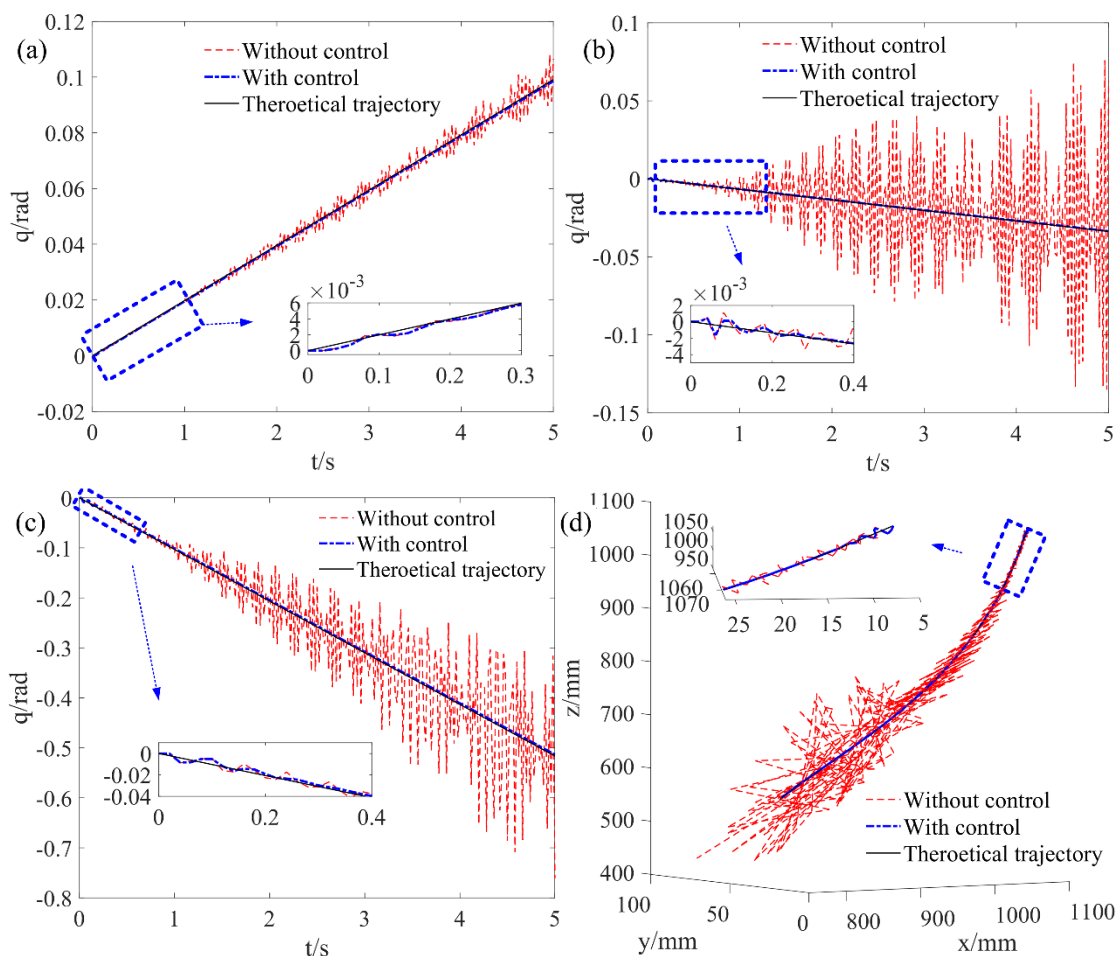


图 3-12 直线轨迹下振动控制联合仿真结果：(a) 关节 1；(b) 关节 2；(c) 关节 3；(d) 末端轨迹

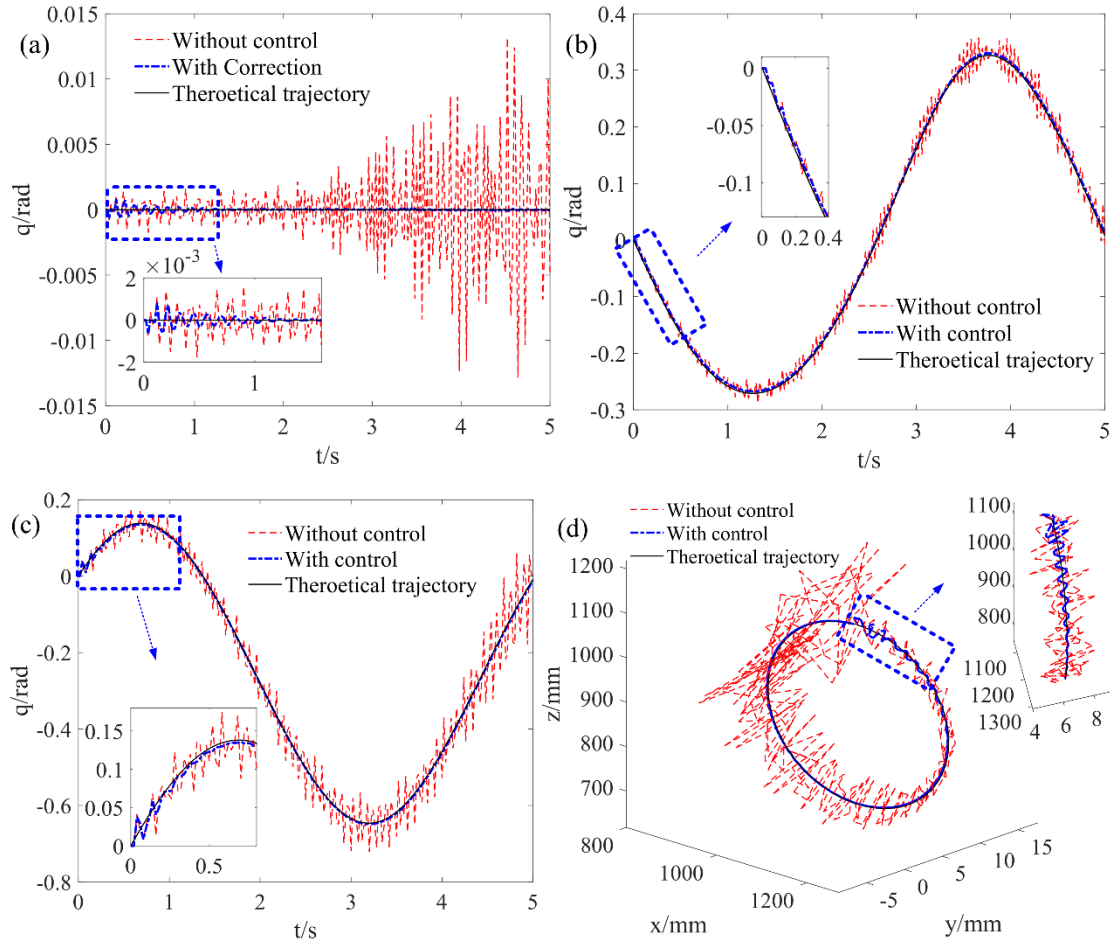


图 3-13 圆形轨迹下振动控制联合仿真结果：(a)关节 1；(b)关节 2；(c)关节 3；(d)末端轨迹

3.5 本章小结

本章将机器人轨迹规划与末端振动控制相结合，开展了柔性关节机器人振动耦合特性及控制策略研究，首先针对误差来源建立了柔性关节动力学模型，分析了直线和圆形轨迹下机器人关节和末端轨迹特性，结果表明关节柔性对机器人关节和末端轨迹具有明显的影响；之后设计了基于 PI 控制器的振动控制策略，基于 Matlab/Simulink 与 Adams 软件搭建了振动控制虚拟样机联合仿真模型，开展了虚拟样机联合仿真，联合仿真结果表明振动控制策略能够提高末端位姿的精度，验证了柔性关节机器人振动耦合特性分析结果的准确性和振动控制策略的有效性。

第4章 振动耦合下机器人磨削恒力控制策略

针对机器人磨削系统的本体振动以及系统标定误差问题，在视觉引导轨迹控制策略以及振动控制策略的基础上，本章进一步研究机器人磨削恒力控制问题。

如图4-1所示，本文设计的机器人磨削系统主要包括机器人、磨削装置和视觉系统组成。其中，磨削装置主要包括磨削主轴和气动伺服装置，磨削主轴可以控制调节主轴转速，气动伺服装置主要进行磨削过程的磨削力伺服控制。

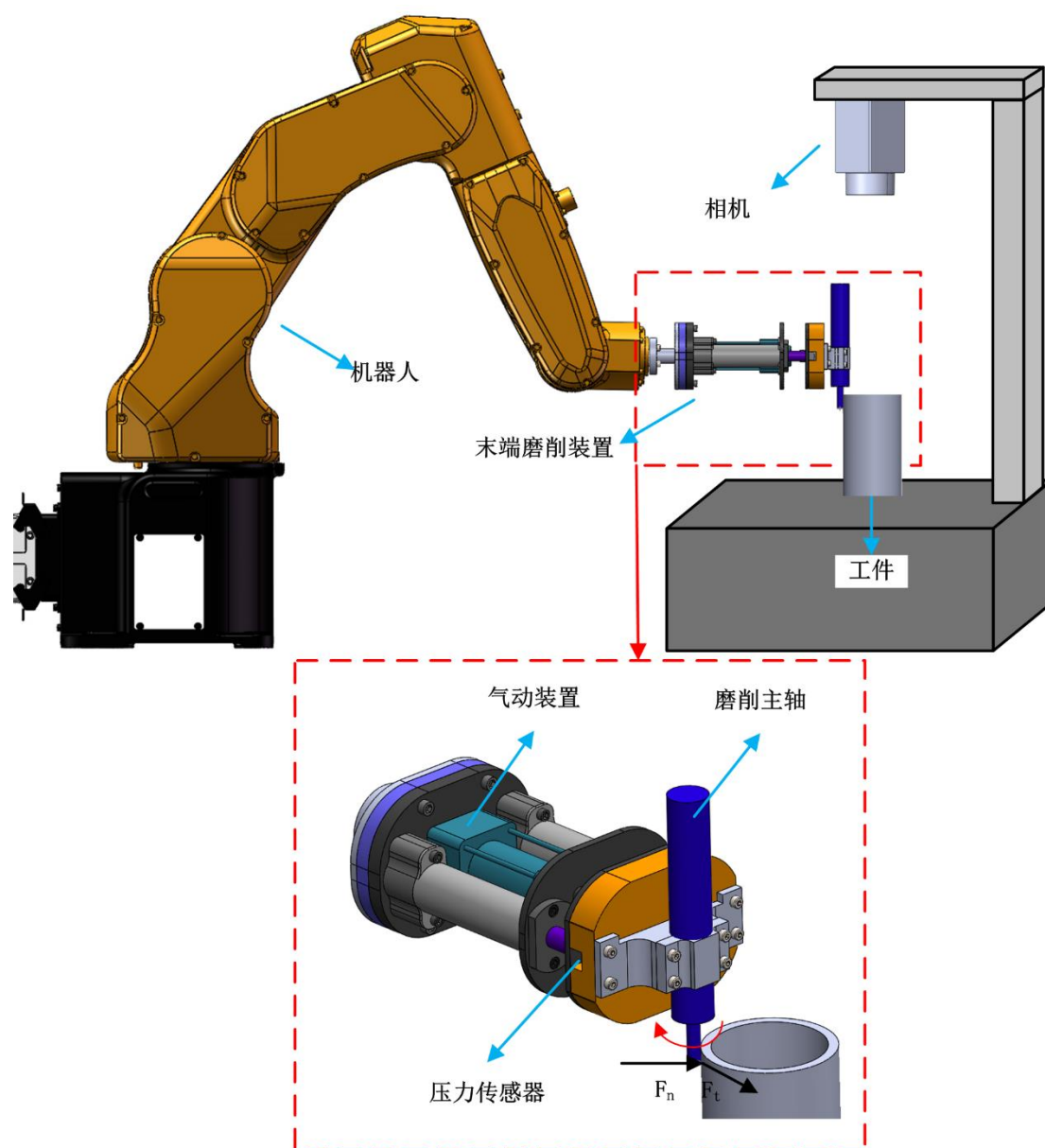


图 4-1 机器人磨削系统磨削装置示意图

4.1 磨削末端装置气动系统动力学模型

4.1.1 气缸流量连续性方程

接下来将对磨削末端装置的气动系统进行分析，假设气体为理想气体，则满足条件的状态方程为：

$$P = \rho RT = \frac{m}{V} RT \quad (4-1)$$

式中， P 为气体压力， V 为气体体积， m 为气体质量， R 为理想气体常数，对于普通空气取值 $287\text{N} \cdot \text{m}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ， T 为绝对温度。

由质量守恒定律，气缸内的气体质量流量与其质量变化率相等

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{dm_1}{dt} = \frac{d(\rho_1 V_1)}{dt} \\ q_2 &= \frac{dm_2}{dt} = \frac{d(\rho_2 V_2)}{dt} \end{aligned} \quad (4-2)$$

式中， q_1 为无杆侧气体质量流量， q_2 为有杆侧气体质量流量， m_1 为无杆侧气体质量， m_2 有杆侧气体质量， ρ_1 为无杆侧气体密度， ρ_2 为有杆侧气体密度。

将式(4-1)带入式(4-2)得

$$\begin{aligned} q_1 &= (P_1 \frac{dV_1}{dt} - \frac{P_1 V_1}{T_1} \frac{dT_1}{dt} + V_1 \frac{dP_1}{dt}) \frac{1}{RT} \\ q_2 &= (P_2 \frac{dV_2}{dt} - \frac{P_2 V_2}{T_2} \frac{dT_2}{dt} + V_2 \frac{dP_2}{dt}) \frac{1}{RT} \end{aligned} \quad (4-3)$$

式中， $\frac{dV_1}{dt}$ 、 $\frac{dV_2}{dt}$ 为无杆侧、有杆侧容积变化率， $\frac{dP_1}{dt}$ 、 $\frac{dP_2}{dt}$ 为无杆侧、有杆侧压力变化率， $\frac{dT_1}{dt}$ 、 $\frac{dT_2}{dt}$ 为无杆侧、有杆侧温度变化率， P_1 、 P_2 为无杆侧、有杆侧压力。

假设气体进出气缸时流经进放气孔口的时间很短，不计摩擦，则可以假设气缸在气体进出导致气压变化时，满足绝热过程，那么可以将气缸内的气体温度表示成

$$P_0^{k-1} T_0^{-k} = P^{k-1} T^{-k} \quad (4-4)$$

式中， T_0 为初始温度， k 气缸内介质比热容比，对于理想气体 $k=1.4$ 。

此时可以表示气缸内，气体温度 T 和初始温度 T_0 之间的关系为：

$$T = T_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (4-5)$$

两边分别进行求导：

$$\frac{dT}{dt} = T_0 \frac{k-1}{k} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{k}} \frac{1}{P_0} \frac{dP}{dt} \quad (4-6)$$

将其带入式(4-3)得：

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{1}{RT_0} \left(P_1 \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_1}{k} \frac{dP_1}{dt} \right) \\ q_2 &= \frac{1}{RT_0} \left(P_2 \frac{dV_2}{dt} + \frac{V_2}{k} \frac{dP_2}{dt} \right) \end{aligned} \quad (4-7)$$

因为机器人系统在进行磨削实验时，磨削末端装置仅保持水平位移磨削，此处不计竖直方向上的位移变化，得到缓冲气缸内部流量模型的表达式

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{1}{RT_0} \frac{V_1}{k} \frac{dP_1}{dt} \\ q_2 &= \frac{1}{RT_0} \frac{V_2}{k} \frac{dP_2}{dt} \end{aligned} \quad (4-8)$$

4.1.2 气动伺服阀质量流量方程

根据 Sanville 流量公式，表示比例阀口的质量一流量

$$q_3 = \mu A_t P_u \sqrt{\frac{2}{RT}} \phi \left(\frac{P_d}{P_u} \right) \quad (4-9)$$

$$q_3 = \begin{cases} A_t P_u \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{RT(k+1)}}, 0 < \frac{P_d}{P_u} < 0.528 \\ A_t P_u \sqrt{\frac{2k}{RT(k-1)}} \sqrt{\left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{\frac{k+1}{k}}}, 0.528 < \frac{P_d}{P_u} < 1 \end{cases} \quad (4-10)$$

式中， A_t 为阀门的质量-流量， P_u 为比例阀进气口绝对压力， P_d 为比例阀出气口绝对压力。

此时比例阀口

$$A_t = \omega x_v \quad (4-11)$$

式中， x_v 为阀芯的位移， w 为阀门面积梯度。

将式(4-11)带入式(4-9)得：

$$q_3 = \mu\pi D x_v P_u \sqrt{\frac{2}{RT}} \phi\left(\frac{P_d}{P_u}\right) \quad (4-12)$$

阀进出口的流量分别为：

$$\begin{aligned} q_1 &= \mu\pi D x_v P_0 \sqrt{\frac{2}{RT}} \phi\left(\frac{P_1}{P_0}\right) \\ q_2 &= \mu\pi D x_v P_2 \sqrt{\frac{2}{RT}} \phi\left(\frac{P_k}{P_2}\right) \end{aligned} \quad (4-13)$$

式中， P_0 为气源压力， P_1 为无杆侧气体压力， P_2 为有杆侧气体压力， P_k 为大气压。

比例阀阀芯位移与控制电压 u 的关系为

$$x_v = K_u u \quad (4-14)$$

式中， K_u 表示比例阀增益系数，将其带入式(4-13)

$$\begin{aligned} q_1 &= \mu\pi D K_u u P_0 \sqrt{\frac{2}{RT}} \phi\left(\frac{P_1}{P_0}\right) \\ q_2 &= \mu\pi D K_u u P_2 \sqrt{\frac{2}{RT}} \phi\left(\frac{P_k}{P_2}\right) \end{aligned} \quad (4-15)$$

采用模型线性化的方法对系统进行处理，式(4-12)改写为

$$q_3 = f(u, P) \quad (4-16)$$

在零点位置线性化有：

$$\begin{aligned} q_1 &= K_1 \Delta u - K_2 \Delta P_1 \\ q_2 &= K_3 \Delta u - K_4 \Delta P_2 \end{aligned} \quad (4-17)$$

$$\text{其中} \left\{ \begin{array}{l} K_1 = \frac{\partial q_1}{\partial u} \Big|_{\substack{u=0 \\ P_1=P_{10}}} = \mu\pi DK_u u P_0 \sqrt{\frac{2}{RT}} \sqrt{\frac{2k}{RT(k-1)}} \sqrt{\left(\frac{P_d}{P_u}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_d}{P_u}\right)^{\frac{k+1}{k}}} \\ K_2 = \frac{\partial q_1}{\partial P_1} \Big|_{\substack{u=0 \\ P_1=P_{10}}} = 0 \\ K_3 = \frac{\partial q_2}{\partial u} \Big|_{\substack{u=0 \\ P_2=P_{20}}} = \mu\pi DK_u u P_2 \sqrt{\frac{2}{RT}} \sqrt{\frac{2k}{RT(k-1)}} \sqrt{\left(\frac{P_d}{P_u}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_d}{P_u}\right)^{\frac{k+1}{k}}} \\ K_4 = \frac{\partial q_2}{\partial P_2} \Big|_{\substack{u=0 \\ P_2=P_{20}}} = 0 \end{array} \right. ,$$

P_{10} 、 P_{20} 为活塞平衡时无杆侧和有杆侧时的压力， Δu 为电压变化值， P_p 为气缸两室的压力变化， ΔP_1 为无杆侧压力变化， ΔP_2 为有杆侧压力变化。

分别对式(4-13)和式(4-15)进行拉普拉斯变换得：

$$Q_1(s) = \frac{1}{RT_0} \frac{V_1}{k} s P_1(s) \quad (4-18)$$

$$Q_2(s) = \frac{1}{RT_0} \frac{V_2}{k} s P_2(s)$$

$$\begin{aligned} Q_1(s) &= K_1 U(s) \\ Q_2(s) &= K_3 U(s) \end{aligned} \quad (4-19)$$

上述两式可得

$$\begin{aligned} \frac{P_1(s)}{U(s)} &= \frac{RT_0 k K_1}{V_1 s} \\ \frac{P_2(s)}{U(s)} &= \frac{RT_0 k K_3}{V_2 s} \end{aligned} \quad (4-20)$$

4.1.3 气动系统气缸力平衡方程

在气缸上侧进气口的压强为 P_1 且无杆侧面积为 A_1 ，下侧进气口的压强为 P_2 且无杆侧面积为 A_2 。如图 4-2，对磨削末端装置气缸内进行受力分析。

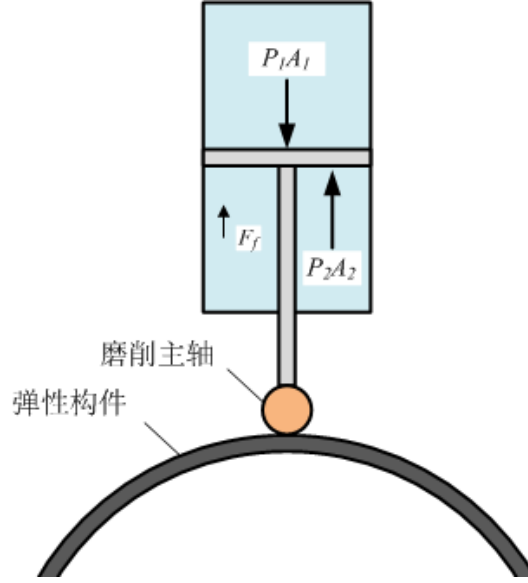


图 4-2 磨削末端装置气缸内受力分析图

根据牛顿第二定律，可以求得磨削末端装置气缸内压强平衡方程

$$P_1A_1 - P_2A_2 - F_p - F_f = M \frac{d^2y}{dt^2} + C_p \frac{dy}{dt} + K_p y \quad (4-21)$$

式中， M 为磨削末端装置各连接件的总质量之和， C_p 为气缸粘性阻尼系数， K_p 为气缸等效刚度， y 为气缸活塞位移， F_p 为气缸推力反作用力， F_f 为气缸活塞摩擦力。首先因为影响较小，对磨削末端装置气动系统气缸内，活塞与气缸内壁的摩擦力进行忽略，由此可以得出

$$P_1A_1 - F_p - P_2A_2 = M \frac{d^2y}{dt^2} + C_p \frac{dy}{dt} + K_p y \quad (4-22)$$

对式(4-22)进行拉普拉斯变换得：

$$P_1(s)A_1 - F_p(s) - P_2(s)A_2 = Ms^2Y(s) + C_p sY(s) + K_p Y(s) \quad (4-23)$$

令 $F_p(s)=0$ ，由式(4-20)可得气缸内活塞位移与控制电压的传递函数为：

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0}{a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s} \quad (4-24)$$

$$\text{其中：} \begin{cases} b_0 = RT_0kK_1A_1V_2 - RT_0kK_3A_2V_1 \\ a_1 = V_1K_pV_2 \\ a_2 = V_1C_pV_2 \\ a_3 = V_1MV_2 \end{cases}$$

令 $U(s)=0$ ，活塞位移与气缸推力的传递函数有：

$$\frac{Y(s)}{F_p(s)} = \frac{1}{Ms^2 + C_p s + K_p} \quad (4-25)$$

磨削末端装置的输入磨削力值等于气动系统的输出力值，则气缸压紧力与比例阀的控制电压之间的传递函数为

$$\frac{F_p(s)}{U(s)} = \frac{F_p(s)}{Y(s)} \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{(Ms^2 + C_p s + K_p)b_0}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s} \quad (4-26)$$

至此，得到磨削末端装置关于磨削力控的关系式。

4.2 磨削恒力控制策略

4.2.1 滑模变结构控制器

滑模变结构控制是一种特殊类型的变结构控制策略，是近年来广泛应用和发展的一种控制方法。滑模变结构控制策略与一般的控制策略的区别，就在于前者控制具有不连续性，当控制开始后，这种不连续性会使得系统结构呈现开关特性，这种特性会迫使系统在一定特性下沿着规定的状态轨迹作小幅度、高频率运动，即滑模运动。

假设状态空间中有系统为

$$\dot{x} = f(x) \quad (4-27)$$

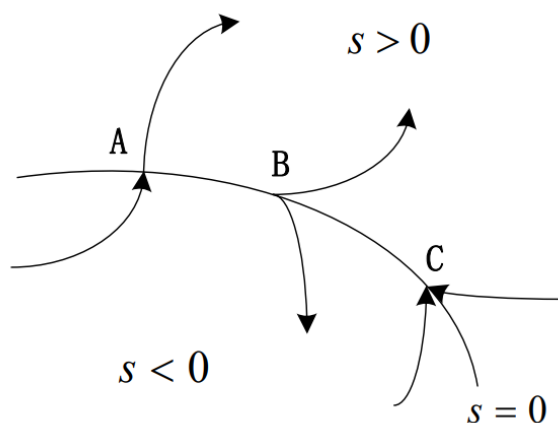


图 4-3 切换面三种点特性

假设有超曲面 $s(x)=s(x_1, x_2, \dots, x_n)=0$ ，如图 4-3。状态空间被 $s=0$ 进行分割为大于和小于两部分。再经过切换面的点的运动情况，有以下三种：

- (1) 系统运动点在(A)直接穿越切换面，称为通常点；
- (2) 系统运动点到达切换面时，向两边离开该点(B)，称为起始点；
- (3) 系统运动点到达切换面时，的两边趋向于切换面并在(C)到达切换面，称为终止点。

如果在切换面某一集合或者区域内，所有的点都是终止点趋向于切换面，那么一旦系统的运动点接近该区域时，就会被吸引并朝该区域进行运动。此时，该运动点都是终止点的区域就会被成为“滑模区”，并且系统的运动在区域中就称为“滑模运动”^[65]。

本节，我们基于给定的期望压紧力 F_d ，再考虑到磨削末端装置的气动系统传递函数模型，可以等效成二阶和延迟系统组合，所以将其中的二阶系统传递函数作为动力学方程用来设计滑模变结构控制器。

$$G(s) = \frac{F}{U} = \frac{a_3}{a_1 s^2 + a_2 s + 1} \quad (4-28)$$

$$a_1 \ddot{F} + a_2 \dot{F} + F = a_3 u \quad (4-29)$$

根据负反馈原理，误差为

$$e = F_d - F \quad (4-30)$$

$$\dot{e} = -\dot{F} \quad (4-31)$$

$$\ddot{e} = -\ddot{F} \quad (4-32)$$

结合上述各式可得

$$a_1 \ddot{e} + a_2 \dot{e} + e = F_d - a_3 u \quad (4-33)$$

由此设计滑动面如下

$$s = a_1 \dot{e} + a_2 e \quad (4-34)$$

考虑到滑模运动包括趋近和滑模两个过程。故本文采用指数趋近律来改善趋近运动的动态品质，则需要满足

$$\dot{s} = -\varepsilon \text{sign}(s) - ks, \quad \varepsilon > 0, \quad k > 0 \quad (4-35)$$

由此求解得到基于滑模变结构控制的控制指令为

$$u = \frac{F_d + \varepsilon \text{sign}(s) + ks - e}{a_3} \quad (4-36)$$

4.2.2 磨削恒力控制模型

按照上述构造的滑模变结构控制器控制指令，以及上节对磨削末端装置气动系统动力学建模分析的情况，在 Matlab/Simulink 软件中构造机器人磨削恒力控制系统仿真模型，如图 4-4。建模思路是：磨削末端装置输出的磨削力 F_{out} 会引起弹性构件振动，而如模型中，随之产生的弹性构件响应力会与期望力 F_d 叠加，磨削恒力控制需要将其反馈至前端与磨削末端装置输出的磨削力 F_{out} 求差得到恒力控制所需的误差 e 和误差变化率 e_c ，并按照上节基于滑模变结构控制的控制指令式(4-36)，设计滑模变结构控制器形成反馈闭环回路。

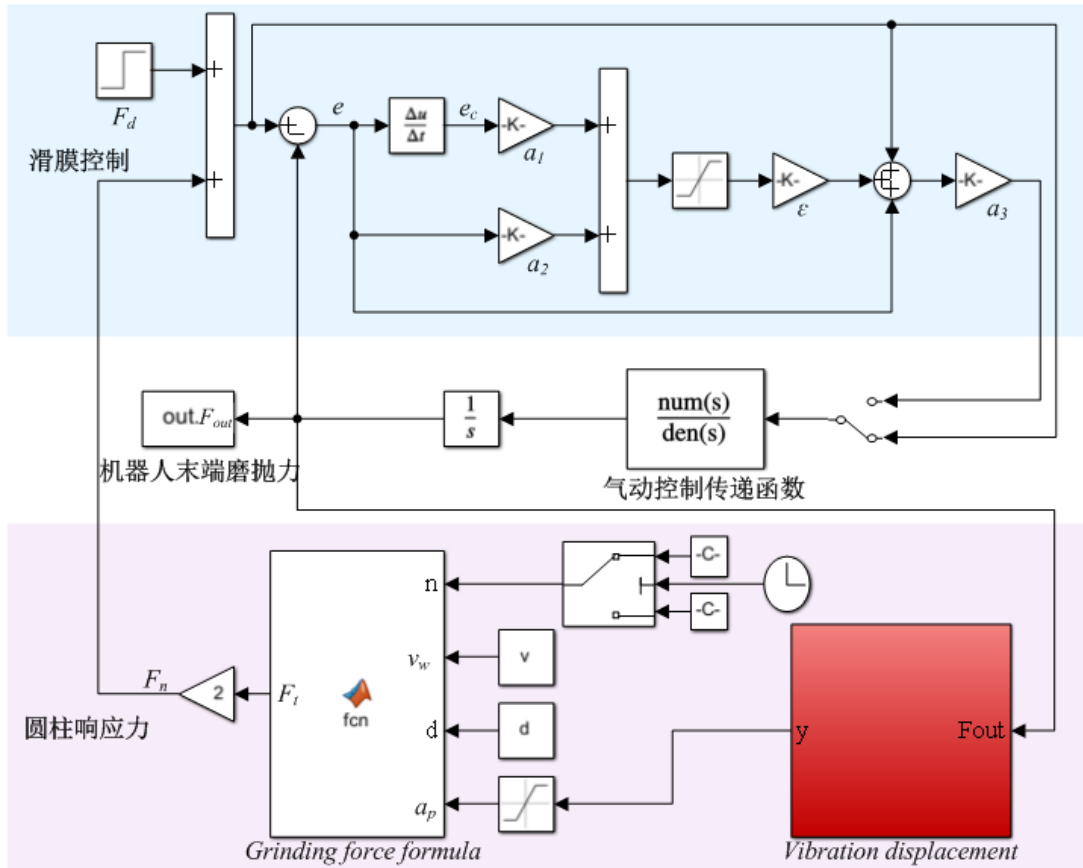


图 4-4 机器人磨削恒力控制系统仿真模型

4.3 联合仿真分析

由前面分析可以看出在磨削过程中主要是磨削主轴对弹性构件施加的磨削力造成工件振动使得输出力存在误差，为了进一步验证本文设计的磨削恒力控

制策略以及机器人磨削恒力控制仿真模型，在机器人进行磨削作业的过程中，对磨削主轴与弹性构件之间振动的问题的有效性，将利用 Matlab/Simulink 与 Adams 软件着重对磨削主轴与弹性构件接触部分进行搭建磨削恒力控制虚拟样机联合仿真模型，并进行联合仿真验证。

首先，将磨削末端装置的三维模型简化，用弹簧+无质量部件的形式来模拟磨削过程中产生的移动时变响应力。在 Adams 软件设置中，将圆柱工件进行柔性化表示弹性构件，弹性构件的底端利用固定副进行固定，磨削末端装置等效模型的最外侧无质量部件需要施加一个平面旋转副，使整个磨削末端装置等效模型能够沿着弹性圆柱构件外侧圆轮廓表面进行旋转磨削，而磨削末端装置等效模型的内侧无质量部件表示磨削主轴，其上需要施加一个沿着弹簧方向运动的平移副，使得磨削末端装置可以在施加一个法向磨削作用力 F_n 后进行模拟磨削进给，从而完成了机器人磨削恒力控制虚拟样机的建立。机器人磨削恒力控制虚拟样机联合仿真流程图如图 4-5。

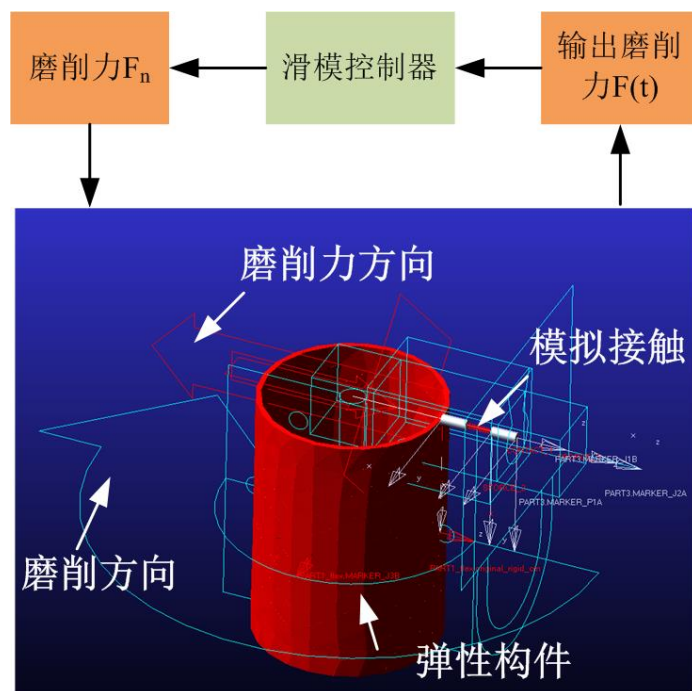


图 4-5 机器人磨削恒力控制虚拟样机联合仿真流程图

为了搭建 Matlab/Simulink 与 Adams 的联合仿真模型，需要设置 Adams 仿真模型中的输入与输出变量，从而实现 Adams 机器人仿真模型与 Simulink 控制程序之间的闭环控制。联合仿真需要输入变量从 Simulink 返回到 Adams 的磨削恒力控制模型，变量具体为磨削力矩值和绕圆柱工件磨削转速值，而需要输出变

量为从 Adams 输出到 Simulink 的磨削恒力控制模型磨削振动位移、输出磨削力矩值，将变量利用 Adams 中函数进行定义。之后在 Adams 软件 Control 模块导出联合仿真文件，回到 Matlab 软件运行 m 文件并调出 `adams_sub` 并嵌入联合仿真模型中，首先通过 Simulink 输入磨削力之后联合仿真从 Adams 软件进行计算后，将仿真模型的弹性构件振动位移，输出磨削力一并发送至 Simulink 完成反馈闭环控制，得到的机器人磨削恒力控制虚拟样机联合仿真模型，如图 4-6。

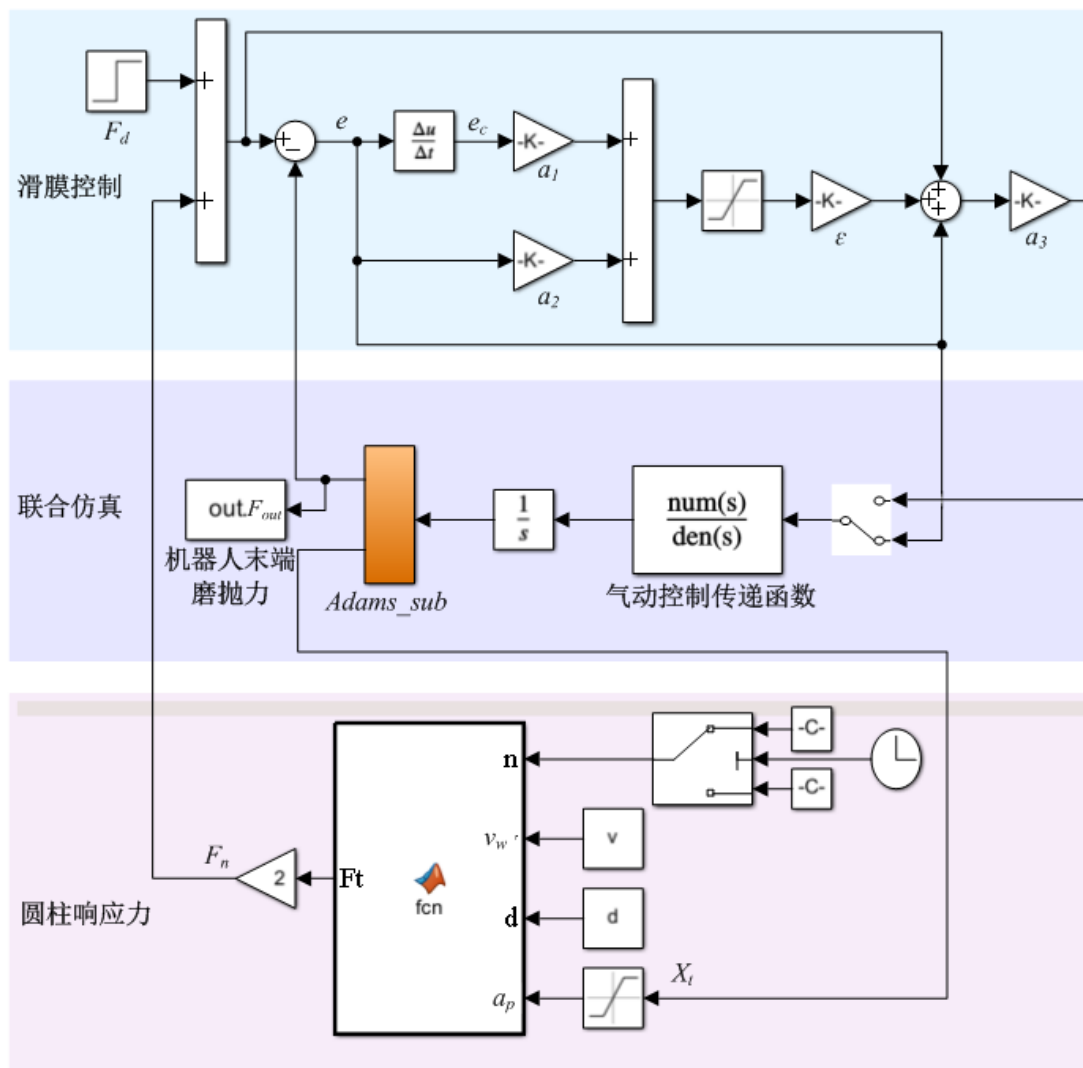


图 4-6 机器人磨削恒力控制虚拟样机联合仿真模型

如图 4-7 和图 4-8 为机器人磨削恒力控制系统虚拟样机联合仿真，在不同转速条件下以及不同期望力条件下，得到的恒力控制结果，可以看出，在未加控制时，磨削过程中磨削力在期望力上下波动很大，当采用滑模变结构控制器后，磨削力波动明显减小，说明所设计的算法能有效的控制磨削力波动，验证了本文设计的机器人磨削恒力控制算法的有效性。

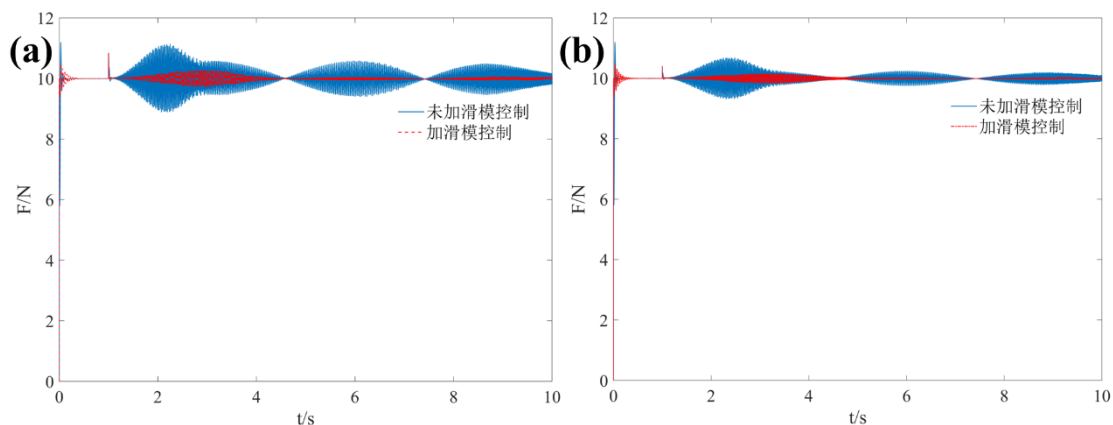


图 4-7 不同磨削主轴转速下机器人磨削恒力控制虚拟样机联合仿真结果: (a)2000 转/min;

(b)4000 转/min

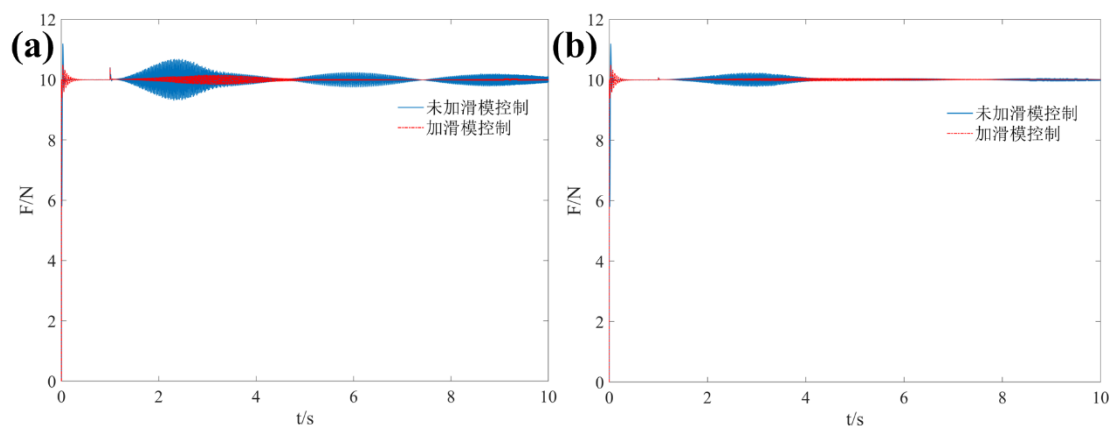


图 4-8 不同磨削进给速度下机器人磨削恒力控制虚拟样机联合仿真结果(a)0.2m/s; (b)0.1m/s

4.4 本章小结

本章开展了关于磨削末端装置的恒力控制研究，完成了磨削末端装置的设计，分析了磨削末端装置气动系统动力学特性；之后设计了基于滑模变结构控制器的机器人磨削恒力控制策略，搭建了基于 Matlab/Simulink 与 Adams 软件的磨削恒力控制虚拟样机联合仿真模型，开展了不同磨削主轴转速以及不同磨削进给速度的情况下的虚拟样机联合仿真，验证了振动耦合下机器人磨削恒力控制策略的有效性。

第5章 实验研究

根据前文对机器人磨削视觉引导轨迹规划及恒力控制策略的联合仿真结果可知，基于视觉引导可以提高机器人磨削的轨迹精度，与此同时，通过磨削末端装置气动伺服控制能够实现磨削力的恒力控制。本章搭建实验平台，对硬件设备的选型与加工，完成实验系统软件设计与调试并进行实验测试，验证本文提出的机器人磨削视觉引导轨迹规划及恒力控制策略的有效性。

5.1 机器人磨削视觉引导轨迹控制实验

5.1.1 实验系统搭建

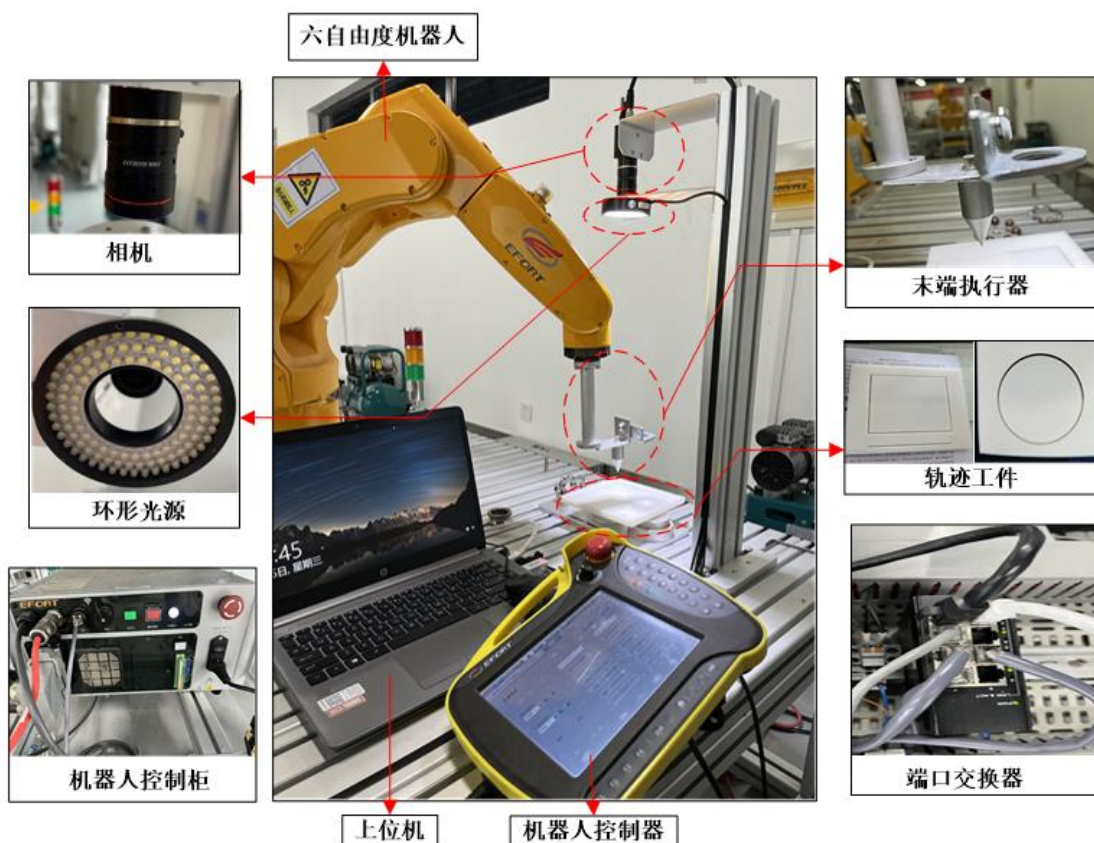


图 5-1 视觉引导轨迹控制实验系统组成

为了进一步验证本文提出的基于视觉引导的机器人磨削轨迹规划及控制策略，搭建实验系统进行实验测试验证。如图 5-1 所示，搭建的实验系统主要由机器人系统、视觉系统和工作台组成，其中，机器人系统包括工业机器人、示

教器、控制柜；视觉系统由视觉软件、相机（MV-CA032-10GC）、环形光源组成；实验选取的工件轨迹类型如图 5-2 所示。

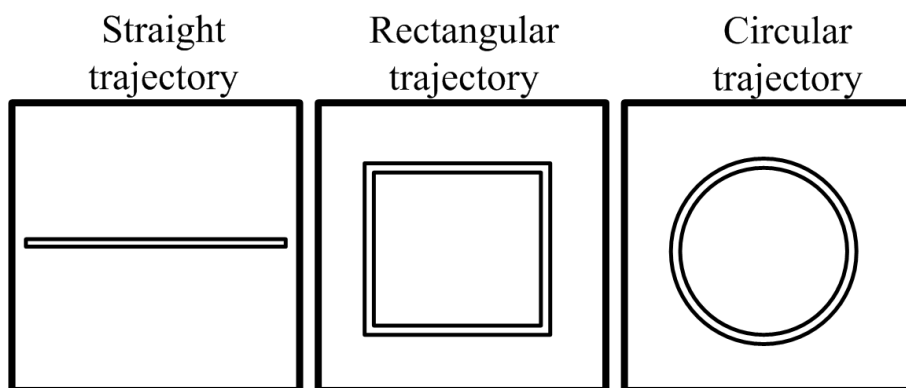


图 5-2 实验选取的工件轨迹类型

5.1.2 实验系统硬件设计

（1）埃夫特机器人：实验所用的六自由度机器人为埃夫特公司生产的型号为 ER3-600 的桌面型机器人，该机器人工作可达半径为 593mm 额定功率为 1KW，额定电压为 220V，最大负载为 3KG。此机器人可以在工作台上搭建视觉系统，并通过网线接口和示教器通过 TCPIP 与 PC 上位机软件进行通讯，将恒力控制磨削执行器通过法兰盘可以固定在机器人末端，符合实验要求。如图 5-4 所示为 ER-300 机器人和示教器以及控制箱。



图 5-3 ER-300 机器人、示教器及控制箱

（2）视觉相机环形光源

实验所用的视觉相机型号为海康公司 MV-CA032-10GC，以及配套的环形光源，如图 5-5 所示。MV-CA032-10GC 是一款采用千兆网接口的视觉相机。兼容

GigE Vision V2.0 协议及 GenICam 标准，拥有支持自动或手动调节增益、曝光时间、LUT、Gamma 校正等功能，具体参数如表 5-1，配套 MVS 软件。

表 5-1 MV-CA032-10GC 相机主要参数表

型号	MV-CA032-10GM
最大帧率	37.5 fps @2048 × 1536 Mono 8
像元尺寸	3.45 μm × 3.45 μm
靶面尺寸	1/1.8"
协议/标准	GigE Vision V2.0, GenICam



图 5-4 MV-CA032-10GC 视觉相机、环形光源以及 MVS 软件

(3) 压力传感器与模拟量信号放大器

压力传感器安装在磨削末端装置的气动部分后端，配套转换器可以将压力传感器采集到的磨削力电压信号进行放大，再利用数据线与数据采集卡进行连接，便于之后信号的处理与控制。压力传感器的型号为金诺环形 JHBM-4，传感器的力测量范围为 0~500 N，并且它的非线性误差仅 0.1%FS，配套的金诺 BSQ-3 模拟量信号转换器，其输出电压为 0~10V，如图 5-5 所示。

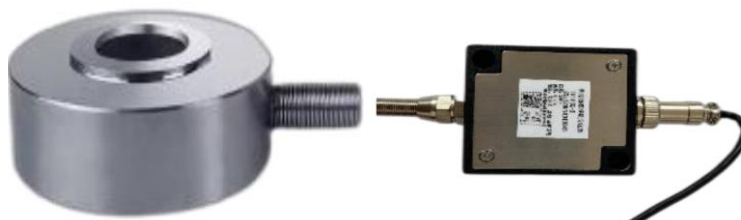


图 5-5 压力传感器与放大器

(4) 数据采集卡

实验平台中对数据进行采集和传输利用的是研华公司生产的 USB-4704 数据采集卡，如图 5-6。USB-4704 数据采集卡利用 USB 总线对上位机进行传输，模

拟量的输入可以有 8 路单端或 4 路差分的形式，采样速率最大为 48KHz，本文进行的控制实验中利用了 2 路 12 位模拟量输出和 8 路数字量输入、输出接口。



图 5-6 研华 USB-4704 数据采集卡

(5) 空气压缩机和气缸

如图 5-7，空气压缩机的作用是接上电源工作后，可以吸取并压缩周围空气使其气泵内气压增大，通过连接的气管路径流通完成后续气动作业。本文选用的空气压缩机的最大输送压力是 0.7 Mpa，排气量为 $0.27\text{m}^3/\text{min}$ ，外形尺寸为 $970\text{mm}\times 380\text{mm}\times 645\text{mm}$ 。而气缸作为磨削末端装置气动部分的主要部件，其主要通过上下进出气口的压强差，推动推杆完成进给量的调节，本文中气缸主要通过改变两只比例阀两口的压强大小控制动作。本文选用的是百汇公司 SC32-25S 缓冲气缸，性能参数为工作压力为 0.1~1Mpa，气缸理论最大推力为 250 N，气缸直径为 32mm，气缸行程为 25mm，使用速度范围 30~800mm/s。



图 5-7 空气压缩机和气缸

(6) 比例阀

比例阀在磨削末端装置的气动部分中承担恒力控制的作用，主要控制气缸的两端气动回路中的气压大小，通过模拟量信号的输入对比例阀的阀芯开口大

小进行调节，进而控制气缸两端气压，完成磨削恒力控制的进给量调节气缸推杆伸缩动作。



图 5-8 比例阀

（7）磨削主轴

磨削主轴选择的是科麦斯生产的充电式电磨机如图 5-9 所示。该电磨机内置 4.2V 锂电池，五档调速，空载转速为 15000 转每分钟，净重 0.13 千克，通过设计法兰盘，将磨削主轴夹持在磨削末端执行器上。



图 5-9 磨削主轴

5.1.3 实验系统软件设计

（1）TCP 通讯

为了实现机器人磨削视觉引导轨迹规划及恒力控制实验，必须解决上位机与机器人示教器，以及与压力传感器之间的通讯问题。TCP/IP 协议的全称是传输控制协议，是互联网通信的基石。以分层的方式进行设计，在开放式系统互联模型（OSI）中 TCP/IP 被详细分为七层，实际中还是更多的使用 TCP/IP 传输层，这两种模型的对比，如表 5-2。

表 5-2 TCPIP 模型 OSI 模型对比表

编号	OSI 模型	TCPIP 模型
1	应用层	
2	表示层	应用层
3	会话层	
4	传输层	传输层
5	网络层	网络层
6	数据链路层	链路层
7	物理层	

TCP/IP 协议传输层主要解决的是端到端数据传输的可靠性问题，需要使得数据准确并且顺序正确可靠的输入到另一端。传输层包括 TCP 协议和 UDP 协议。这两种协议都有着各自的特点和适用的场合，本质上有着一一定的区别，具体表现在连接性、可靠性、传输效率、报文处理和连接对象个数方面，如表 5-3。

表 5-3 TCP 协议与 UDP 协议对比表

特点	TCP	UDP
可靠性	可靠性高	可靠性低
连接性	面向	无
报文	长	短
效率	低	高
连接对象个数	单端	单端、多端
应用场景	效率要求不作要求，准确性要求严	效率要求严，准确性不作要求

经多次实验发现，TCP 通讯方式可以保证机器人示教器接收到 Matlab 上位机的运动指令之后控制机器人本体运动的单个周期最短在 0.05s 左右，可知 TCP 通讯已经能够满足实验要求，并能够保证数据收发的完整与正确。

故首先 Matlab 上位机建立 TCP 通讯，通过视觉相机获取工件的位置信息，经过坐标变换以及误差实时控制轨迹精度，使机器人磨削末端装置能够在目标工件边缘进行磨削；之后 Labview 上位机通过数据采集卡接收压力传感器的磨削力数据，经过上位机建立的恒力控制模型，计算得到磨削末端装置气动系统

的调整量，进而达到恒力磨削的目的，如图 5-10。

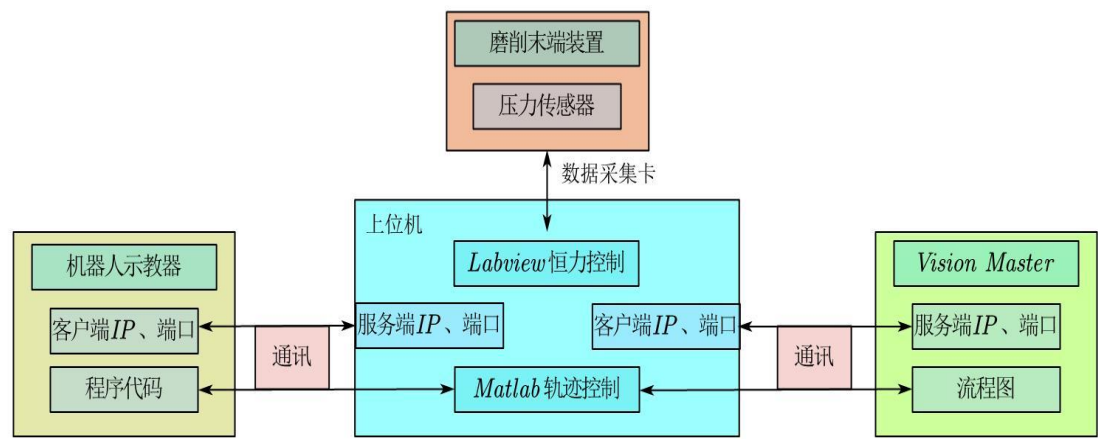


图 5-10 实验平台相互通讯

根据第二章基于视觉引导的机器人磨削轨迹规划及控制中对整体坐标系模型的分析，明确了视觉坐标系与机器人坐标系之间的关系。由于机器人的编程是基于基坐标系实现的，因此需要对机器人系统中的工件坐标系原点与机器人基坐标系原点的进行标定，从而使工件在工件坐标系下的位姿转换为机器人基坐标系下，实现机器人对工件的定位。在机器人的示教器中可以对用户坐标系进行标定操作，它是对工件所在工作台进行定义的一个直角坐标系，该坐标系可以通过机器人基坐标系进行变换得到。又由于机器人磨削末端形状不规则，与特定点难以对准，故采用 TCP&Z,X 方法进行标定建立一个工具坐标系。之后在实验开始前还需要对相机利用标定板进行标定，如图 5-11。

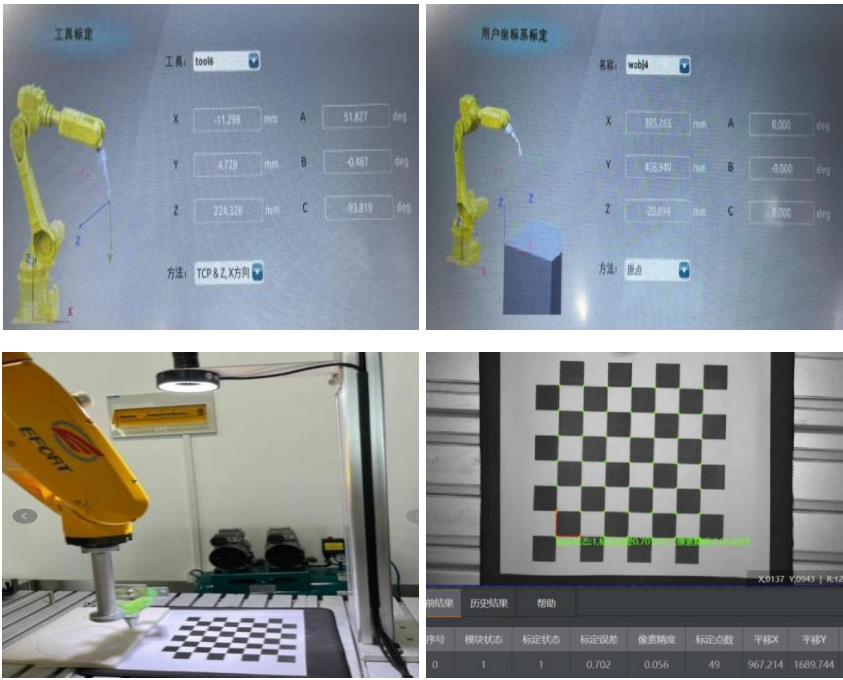


图 5-11 实验系统坐标系标定

(2) ERFORT 的 TCPIP 交互程序

ERFORT 机器人编程语言为 RPL，包括 Common、Movement、Interrupt、Other、Trigger 五种指令集。机器人运动通常分为点到点运动和连续轨迹运动，而本次实验负责机器人的实时控制的指令代码示例如下所示。

1. LABEL a:
2. WHILE i<=i2 DO
3. Vision.setTrigCmd("10");
4. hasobj:=vision.getData();
5. IF hasobj=1 THEN
6. MJOINT(POINTC(vision.x-14.953,vision.y+17.031,height+50,vision.a,7.28,
119.59),v500,fine,tool6,wobj4);
7. END IF;
8. i:=i+1;
9. END_WHILE;

机器人示教器通过 TCP/IP 和 Matlab 上位机进行字符串数据交换和传递，其中机器人作为客户端，通过示教器界面配置对应的通讯参数并发出指令。第 1 行始终出现在程序的开头，作用为定义程序名。第 2 行判断语句，输出传输有无错误。第 3 行是设置相机的触发指令为“10”。第 4 行是触发相机拍照，当成功当获取数据时变量 hasObj=true。第 6~8 行是埃夫特机器人常用运动控制指令，通常包含点位信息、运动速度、末端执行器坐标系和基坐标系编号选择，运动过程中的点位信息具体位姿信息根据 TCPIP 进行传输。常用的机器人运动代码包括 PTP (Point-To-Point)，根据 PTP 指令表示点到点的运动，机器人将末端执行器从当前点以最快的轨迹移动至目标点，由于机器人是关节旋转组合成的耦合运动，因此，最快轨迹通常不是最短轨迹，弯曲的轨迹比直线轨迹更快。第 11 行“END”表示循环程序的结束。

(3) 视觉软件 MVS 程序设计

本文利用海康威视公司研发的视觉相机配套 MVS 软件，与 MV-CA032-10GC 视觉相机通过数据网线进行通信，实现对实验工件以及磨削末端装置特征

点的坐标采集。MVS 软件主要负责对事先设定好的工作流程进行作业，对实验时视觉相机采集的图片进行分析，从而获得更加真实准确的工件轨迹特征信息，视觉软件的工作流程框架如图 5-12。



图 5-12 视觉软件工作流程设计

工作流程从上到下依次按箭头指示进行，首先设置接收数据模块，以此通过 TCP/IP 通讯并接收上位机发送的拍照指令；预先设定并使用通信触发模块可以在接受运行指令后，触发视觉相机对目标进行拍照后进行下方流程；对视觉相机拍照结果按照流程依次进行特征识别，查找工件位置，并进行位置修正；之后调用标定结果，对识别的坐标进行转换，得到机器人坐标系下的工件坐标；最后设置发送数据模块，将数据以一定格式发送至 Matlab 上位机。

(4) Matlab 上位机程序设计

进行磨削路径规划时需要利用 TCP/IP 的通讯方式与视觉软件、机器人示教器进行连接。而机器人示教器接收只能识别固定格式的位置坐标信息，固定格式如下：Image\r\n [X:xxx;Y:xxx;A:xxx;ATTR:xxx;ID:xxx]\r\n Done\r\n。所以为了实现实验系统之间的实时通讯，基于 TCP/IP 通讯方式在 Matlab/App design 中设计了基于机器视觉的磨削机器人路径规划信息传输软件，软件界面主要分为实时显示、参数设置与开关区域。

在 Matlab 上位机与机器人示教器、视觉相机的通信中，视觉相机的数据采集模块相当于一个服务端，而 Matlab 上位机作为客户端接收视觉软件发送的位

置坐标数据；通过软件使得 Matlab 上位机又为服务端，实现其与作为客户端的机器人示教器进行通信，Matlab 上位机向机器人示教器发送确定格式的数据指令，使得机器人会解析指令并做出相应的轨迹运动，以此用来实现三者的连接以及数据传送。

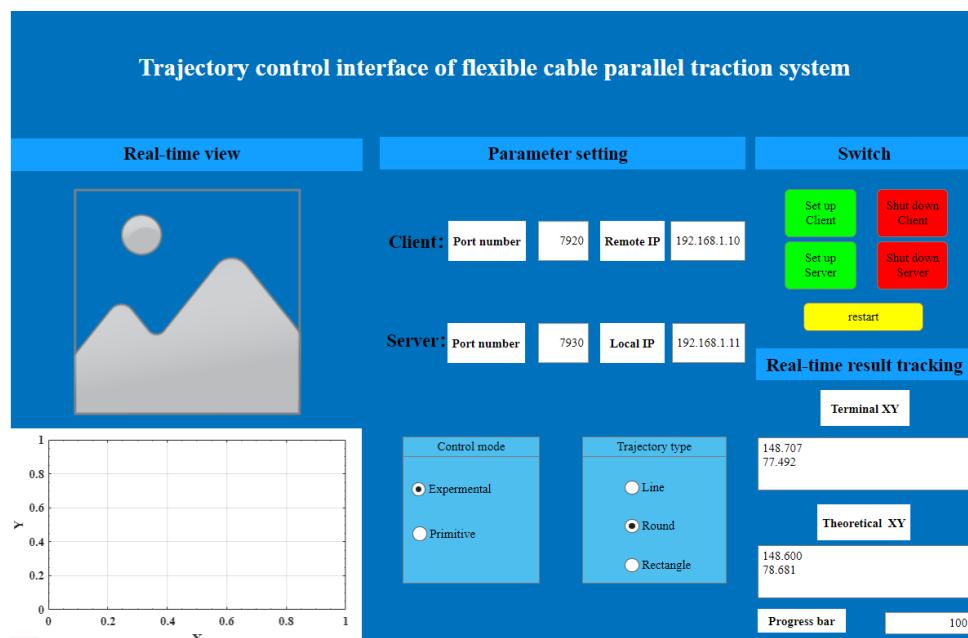


图 5-13 基于机器视觉的磨削机器人路径规划信息传输软件

如图 5-13 所示，参数中包含对服务端和客户端的两种基本设置，服务端用于连接机器人系统，客户端用于连接视觉系统，能够在机器人运行过程中实时反馈机器人末端实际坐标信息。在软件界面中，可选择将要实验的控制类型以及轨迹类型，通过内部与 simulink 控制模型的数据交互，能够在机器人运行过程中实时对机器人末端实际坐标信息的误差进行校正并显示。

（5）恒力控制上位机程序设计

最后在进行恒力控制时，本文利用美国 NI 公司研发的 Labview 上位机软件，通过 USB 总线将上位机与数据采集卡、比例阀进行连接并通信，实现压力传感器上磨削力信号的采集和磨削恒力控制调节信号的发送。Labview 上位机按照设定的程序首先对测量元件压力传感器的模拟输出信号进行采集，之后按照滑膜控制器的磨削恒力控制策略将控制后的信号控制指令发送至下位机比例阀，使得对磨削末端装置的进给量进行调节，从而实现弹性构件磨削的恒力控制。

图 5-14 为弹性构件磨削恒力控制实验数据采集平台，主要是对磨削末端装

置上安装的压力传感器信号波形图进行显示，以及比例阀压力、输出力显示，可以对磨削力进行调零等操作，并且会显示弹性构件恒力控制后的磨削力误差，最后包括程序停止及滑模控制开关按钮。

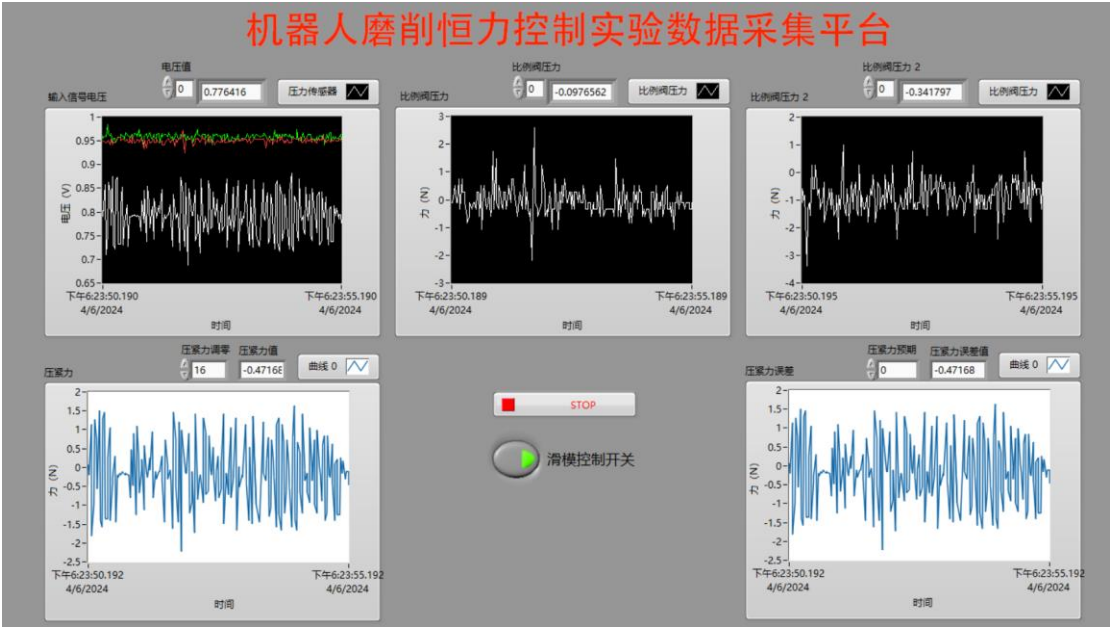


图 5-14 弹性构件机器人磨削恒力控制实验数据采集平台

5.1.4 机器人磨削视觉引导轨迹控制实验测试结果

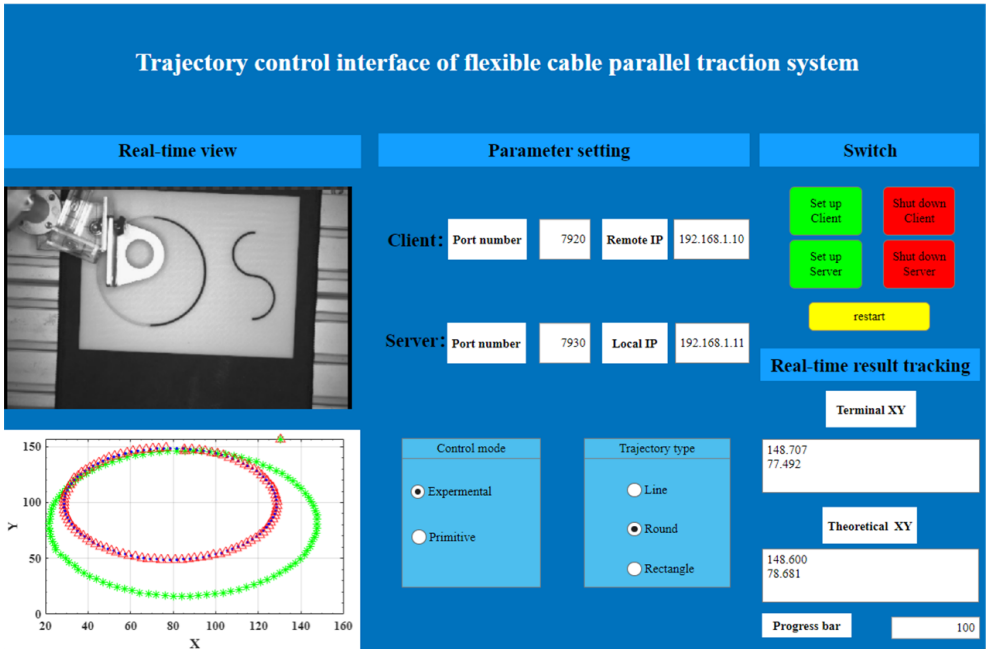


图 5-15 实验软件界面

如图 5-15 为本文设计的基于机器视觉的磨削机器人路径规划信息传输软件。实验时选取直线、圆形、矩形三种工件轮廓轨迹进行实验测试，视觉轨迹模糊

PID 控制器初始参数设定为 $K_p=0.6$ 、 $K_i=0.2$ 、 $K_d=0.05$ 。实验过程中，通过视觉系统获取工件轨迹轮廓，如图 5-16 图 5-17 图 5-18 所示，通过的轨迹特征点识别、轨迹位置查找、轨迹坐标转换获取轨迹坐标信息，通过轨迹规划模块实现视觉引导机器人的轨迹规划；在机器人运动过程中，视觉系统实时反馈机器人末端轨迹点的实际坐标，通过模糊 PID 控制器进行机器人轨迹误差实时校正，完成视觉引导轨迹控制。

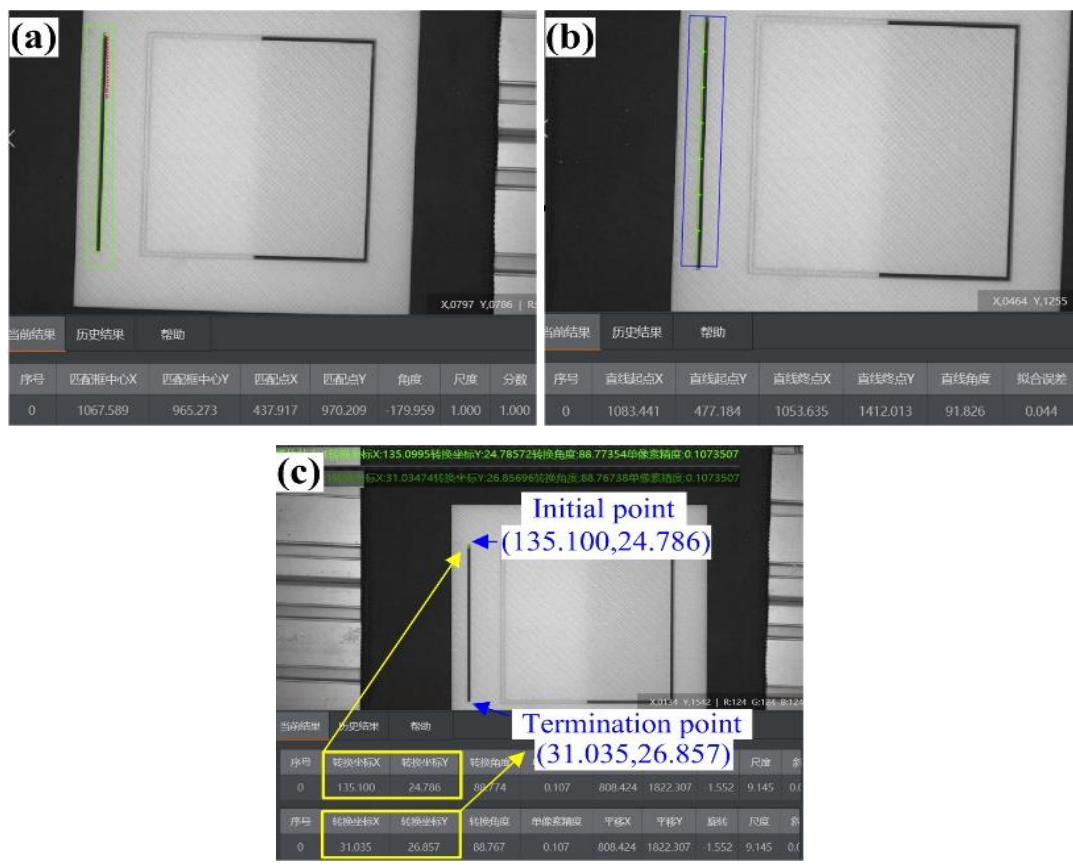
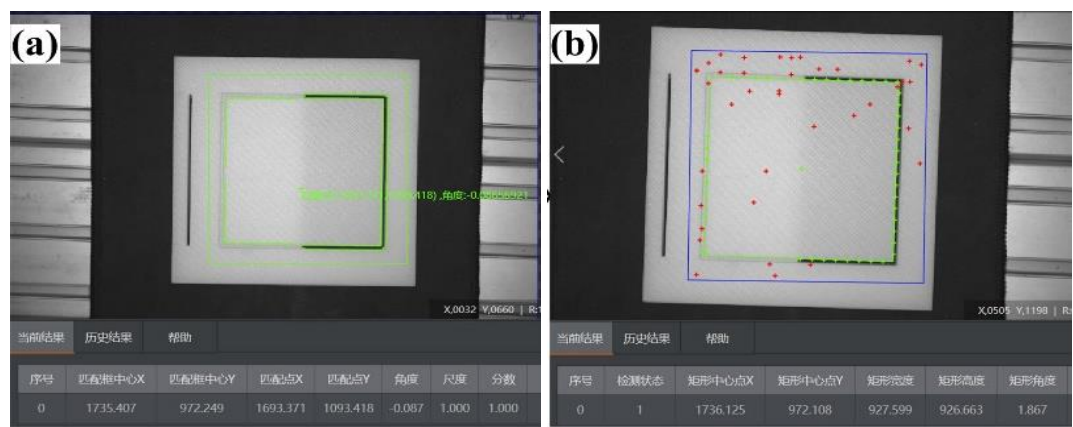


图 5-16 直线轨迹: (a)特征点识别;(b)轨迹位置查找;(c)轨迹坐标转换



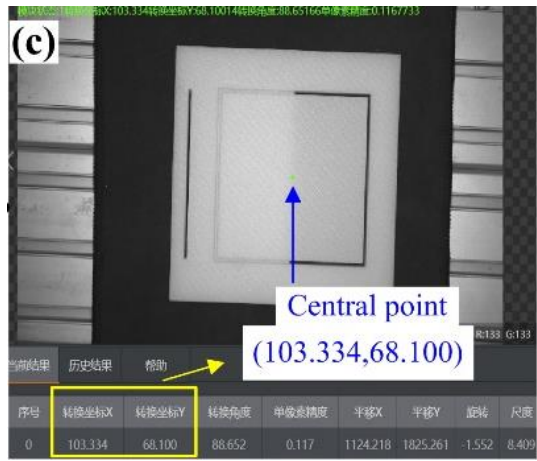


图 5-17 矩形轨迹: (a)特征点识别;(b)轨迹位置查找;(c)轨迹坐标转换

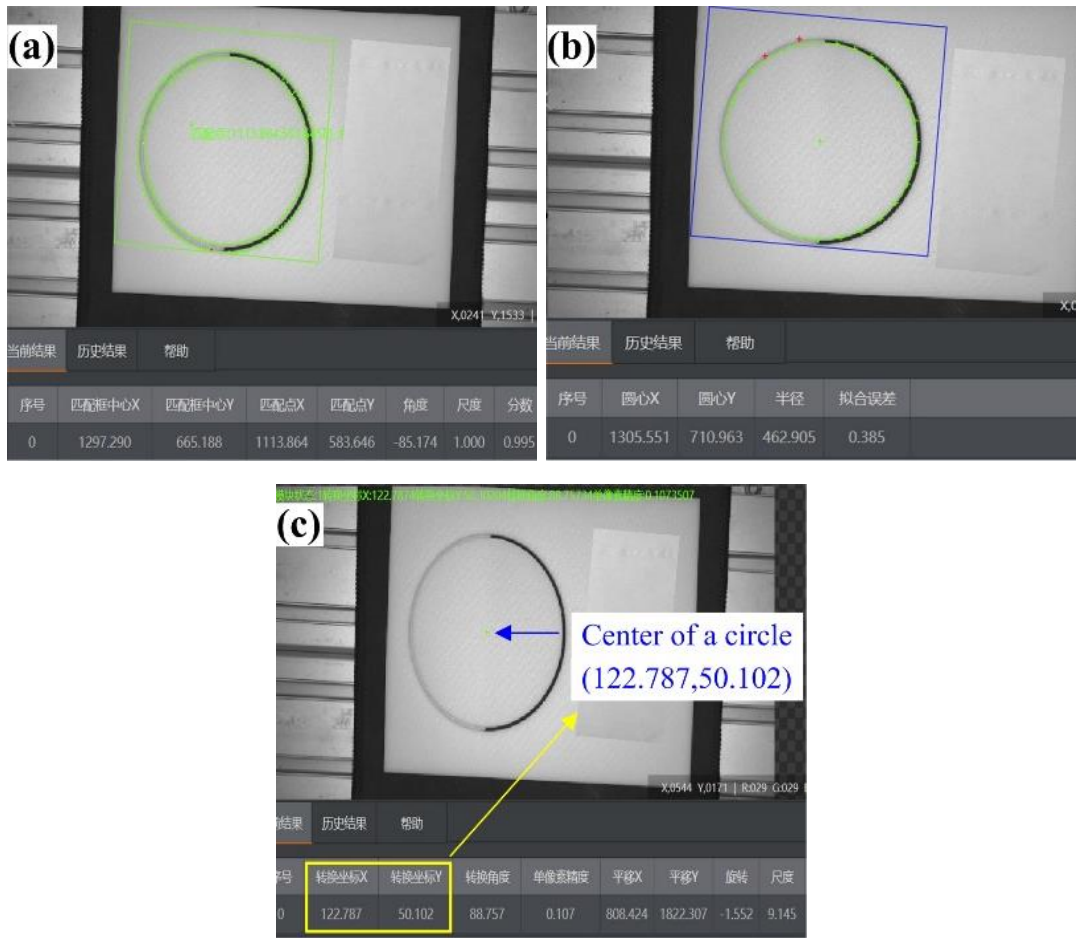


图 5-18 圆形轨迹: (a)特征点识别;(b)轨迹位置查找;(c)轨迹坐标转换

如图 5-19 图 5-20 图 5-21 所示为直线、圆形、矩形三种工件轮廓轨迹的实验测试结果。可以看出，在不施加视觉引导轨迹控制策略时，视觉引导机器人实际轨迹与理论轨迹偏差较大，而施加后视觉引导机器人实际轨迹轨迹精度得到明显提高，验证了本文设计的视觉引导轨迹控制策略的有效性。

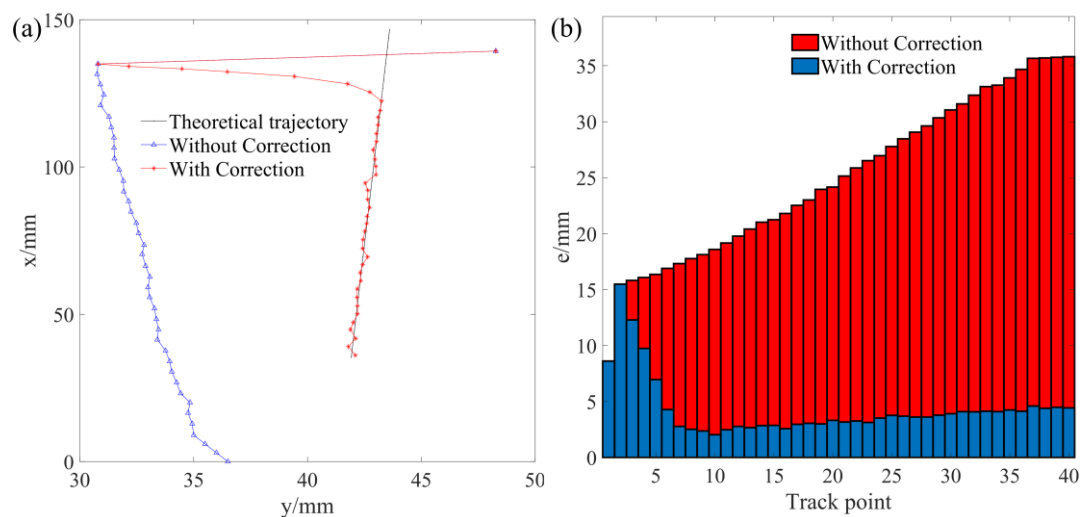


图 5-19 直线轨迹控制实验结果: (a)轨迹点图; (b) 轨迹误差

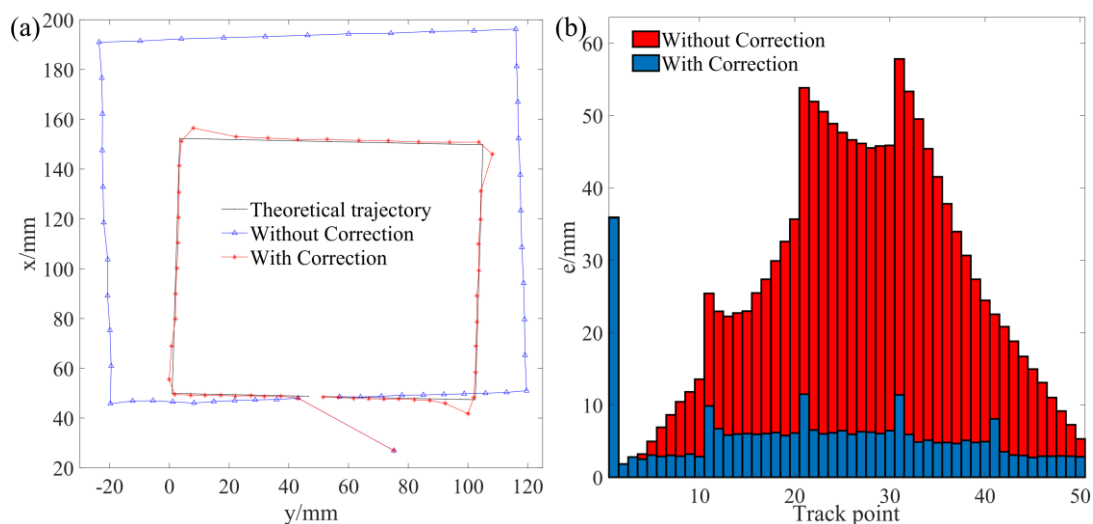


图 5-20 矩形轨迹控制实验结果: (a)轨迹点图; (b)轨迹误差

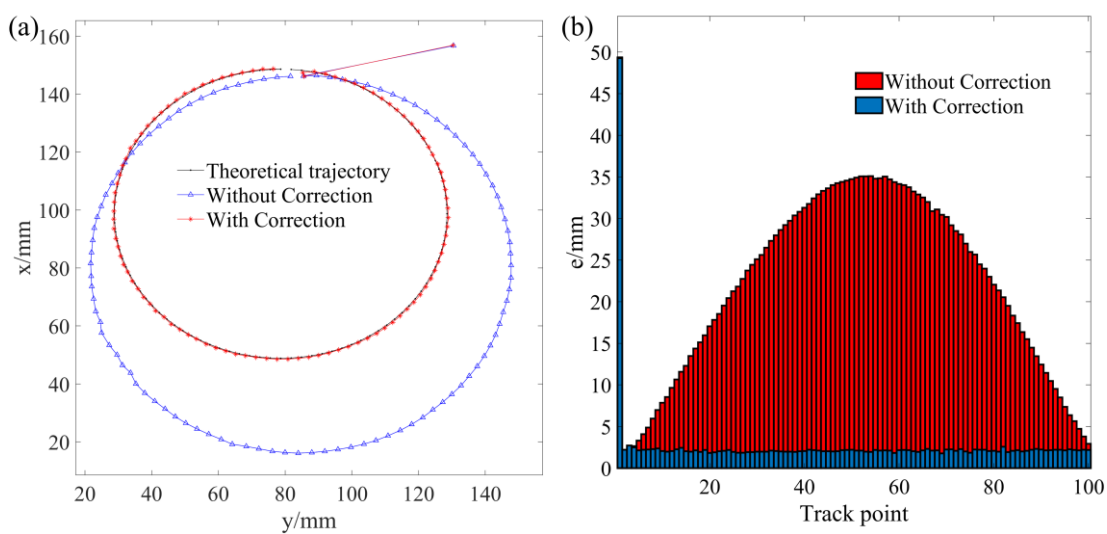


图 5-21 圆形轨迹控制实验结果: (a)轨迹点图; (b)轨迹误差

5.2 弹性构件机器人磨削恒力控制实验

5.2.1 实验系统设计

为了进一步验证本文提出的机器人磨削视觉引导轨迹规划及恒力控制策略，对实验平台进行搭建，基于六自由度机器人、视觉相机、磨削末端装置、弹性圆柱构件工件，再通过上节对硬件的加工选型以及软件系统的设计调试，其弹性构件机器人磨削恒力控制实验系统构成如图 5-22，磨削末端装置如图 5-23。

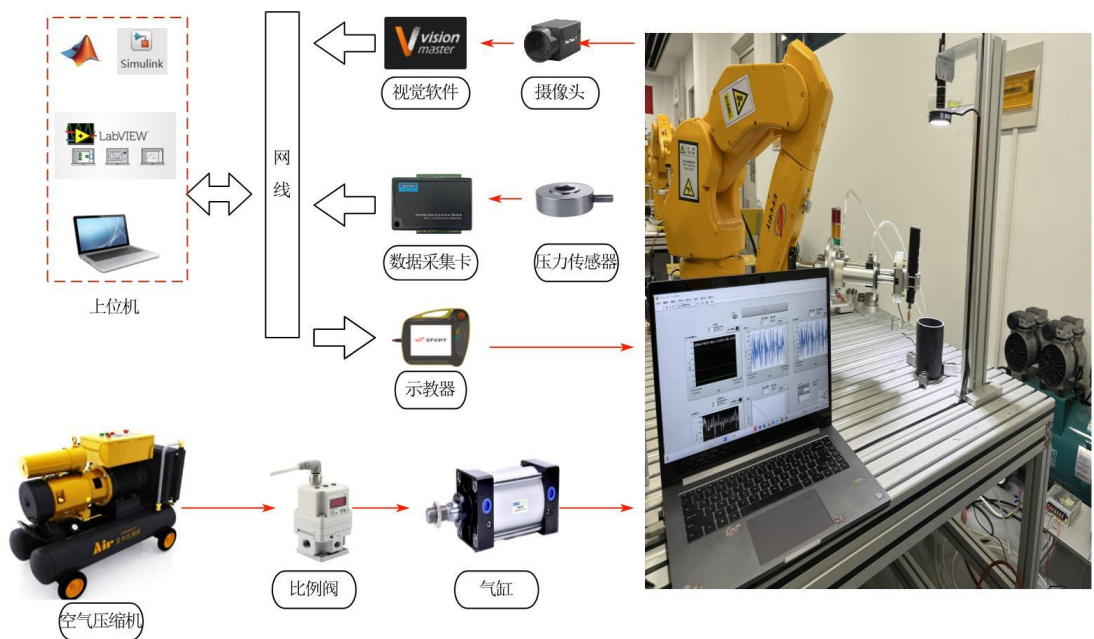


图 5-22 弹性构件机器人磨削恒力控制实验系统构成

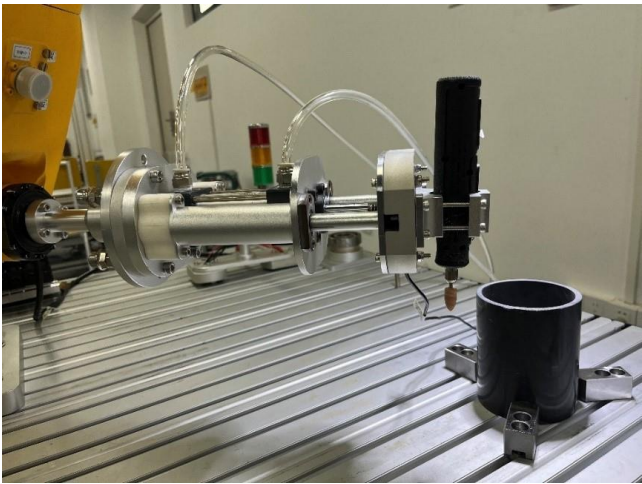


图 5-23 磨削末端装置

在开展弹性构件机器人磨削恒力控制实验的过程当中，通过视觉相机首先取得工件视觉坐标，经过 Matlab 上位机实时进行误差校正，使得机器人可以随

着弹性构件边缘进行打磨；当磨削末端装置对工件产生磨削力时将由压力传感器进行测量，并通过数据采集卡进行传输到 Labview 上位机，调节气动比例阀进行磨削恒力控制。

5.2.2 弹性构件机器人磨削恒力控制实验测试结果

弹性构件机器人磨削恒力控制实验选取圆形轮廓轨迹弹性构件作为工件进行实验测试，弹性构件外轮廓直径为 90mm，运行速度在程序中设定为匀速 50mm/s，视觉轨迹模糊 PID 控制器初始参数设定为 $K_p=0.6$ 、 $K_i=0.2$ 、 $K_d=0.05$ 。实验过程中，首先通过视觉系统获取工件轨迹轮廓，如图 5-24；再通过的轨迹特征点识别、轨迹位置查找、轨迹坐标转换获取轨迹坐标信息，输入实验软件进行实现视觉引导机器人的轨迹规划及控制，如图 5-25 图 5-26；在机器人进行弹性构件磨削恒力控制的过程中，机器人磨削末端装置的实际磨削力，将通过压力传感器由数据采集卡输入上位机并通过滑模变结构控制器进行机器人磨削末端装置气动系统进给量控制，完成磨削恒力控制，如图 5-27。

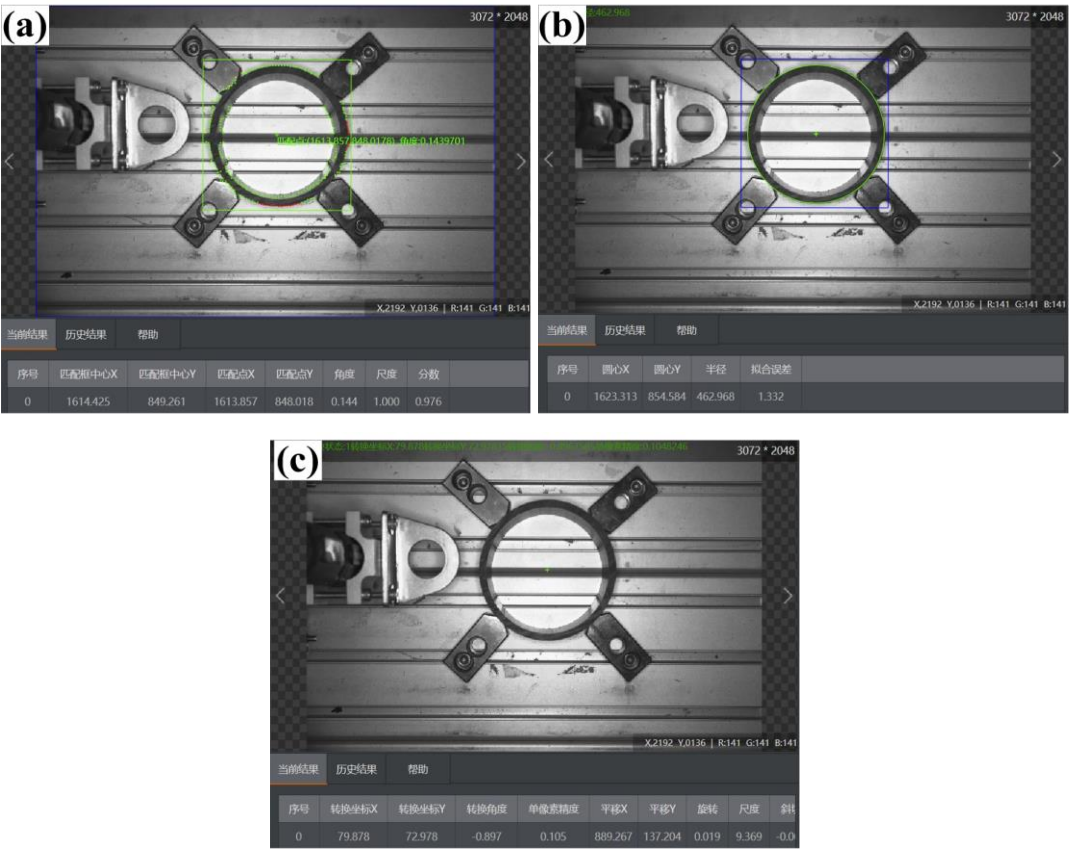


图 5-24 圆形弹性构件：(a)特征点识别;(b)特征点位置查找;(c)特征点坐标转换

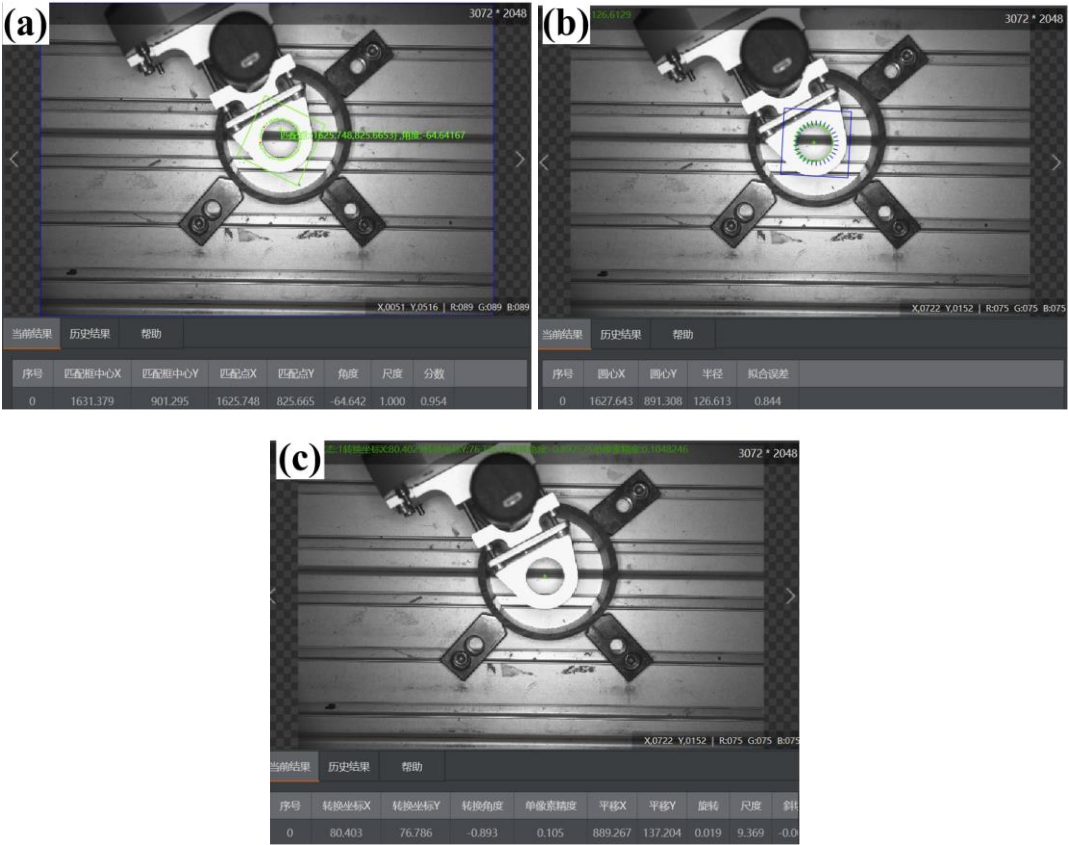


图 5-25 磨削起始点: (a)特征点识别; (b)特征点位置查找; (c)特征点坐标转换

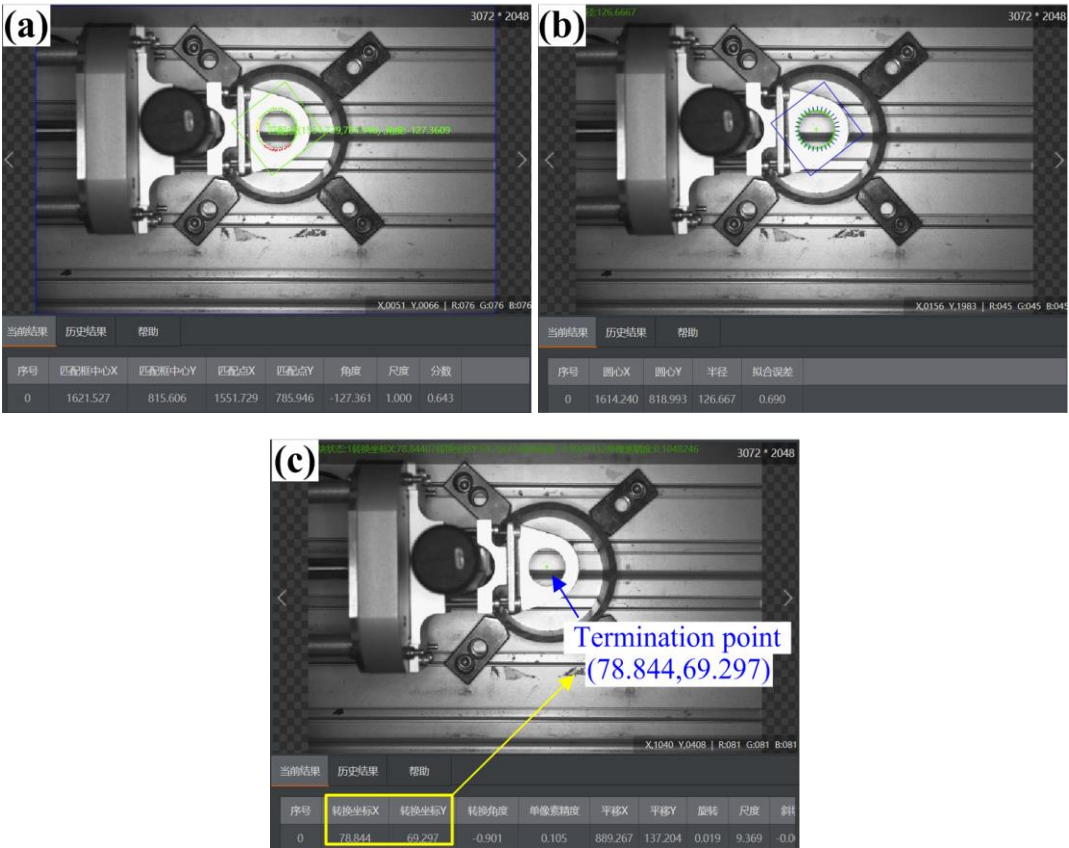


图 5-26 磨削终止点: (a)特征点识别; (b)特征点位置查找; (c)特征点坐标转换

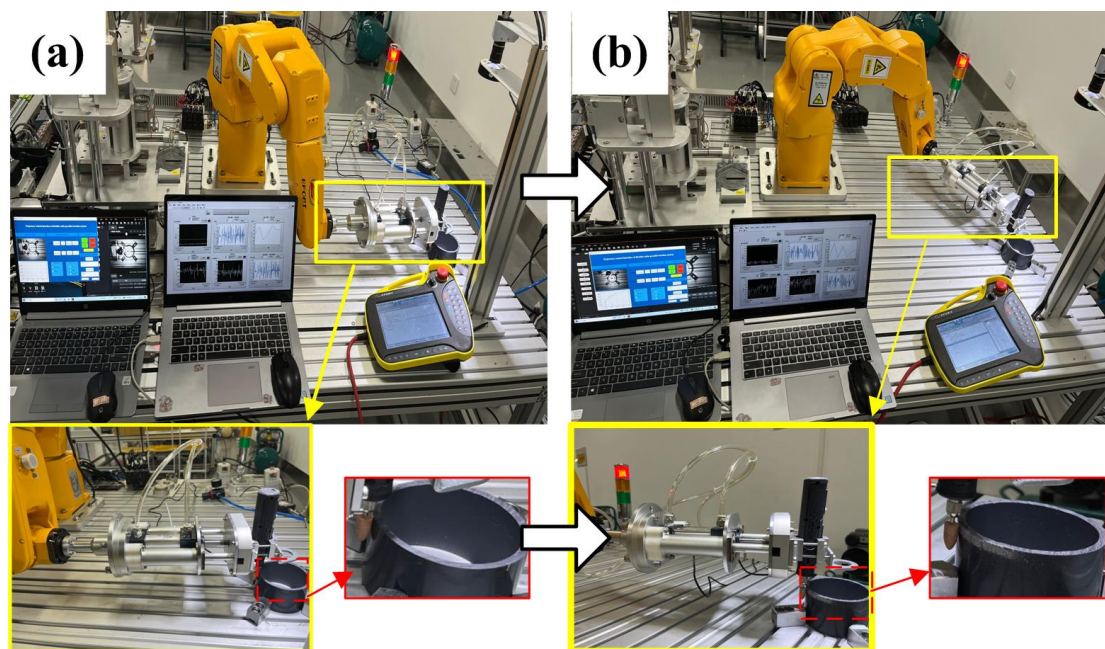


图 5-27 磨削恒力控制实验过程图: (a)磨削起始状态;(b)磨削终止状态

在弹性构件机器人磨削恒力控制实验中，首先设置好视觉引导轨迹控制部分，使得磨削末端装置对工件边缘进行磨削加工，之后设置不同组的期望恒力控制力的大小，开启滑模变结构控制器，并观察磨削末端装置的恒力控制效果。如图 5-28 和图 5-29 所示，可以看出所设计振动耦合下机器人磨削恒力控制策略具有一定的效果。由于本文磨削装置结构与加工存在的误差，使得实际磨削主轴磨削力方向与压力传感器测试方向存在一定的偏差，后续将通过磨削装置的集成优化设计改进恒力控制效果。

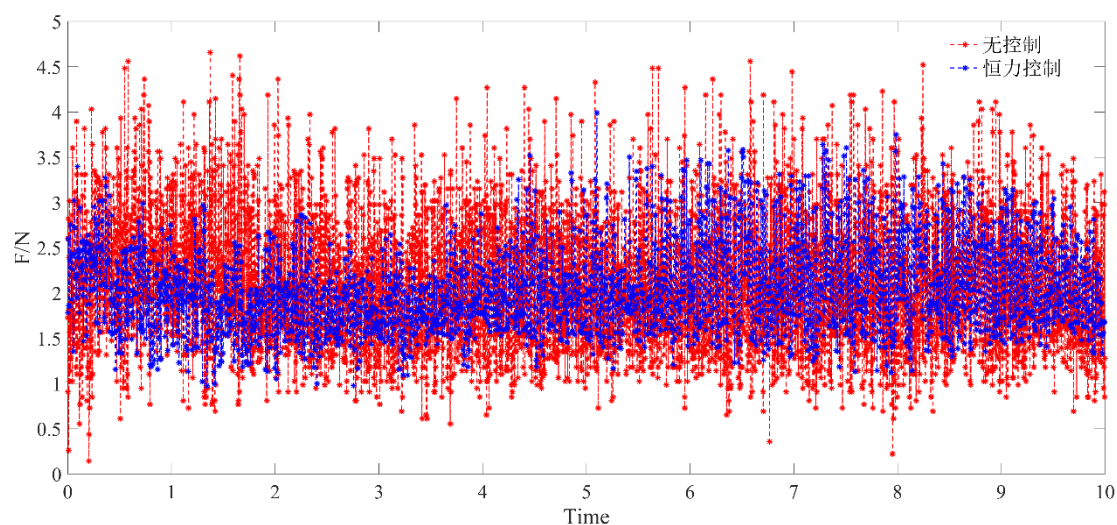


图 5-28 弹性构件机器人磨削恒力控制实验效果(2N)

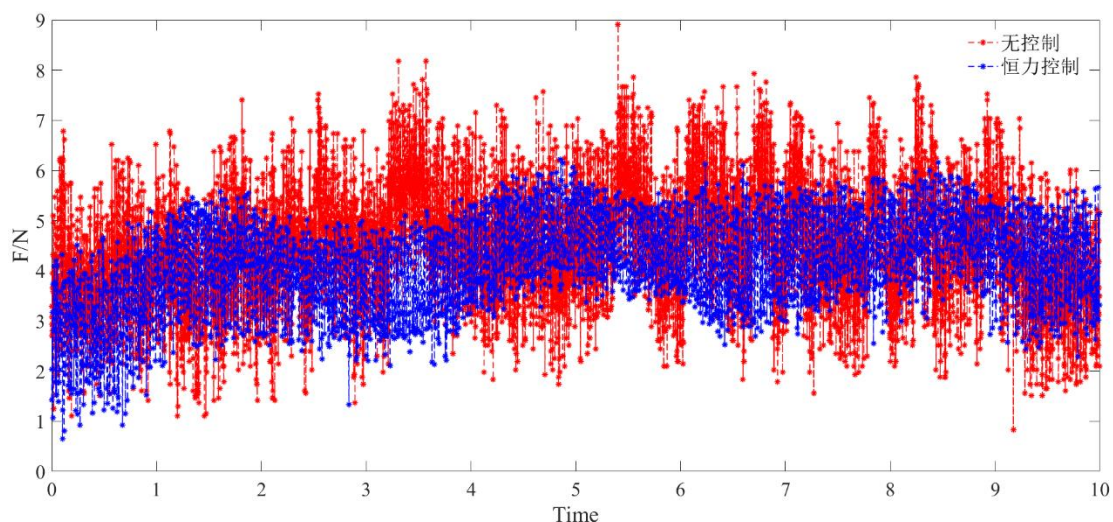


图 5-29 弹性构件机器人磨削恒力控制实验效果(4N)

5.3 本章小结

本章搭建了机器人磨削视觉引导轨迹规划及恒力控制实验平台，完成了对必要实验硬件的选型，以及所需通讯软件的设计，开展了不同轨迹情况下的机器人磨削视觉引导轨迹控制实验，实现了视觉引导轨迹误差的有效降低，开展了不同期望力情况下的弹性构件机器人磨削恒力控制实验，实现了在视觉引导轨迹规划条件下的磨削力波动的有效抑制，验证了本文提出的机器人磨削视觉引导轨迹规划及恒力控制策略的有效性。

第6章 结论与展望

6.1 结论

本文针对机器人磨削轨迹规划及恒力控制问题，开展了机器人磨削视觉引导轨迹规划及恒力控制策略的研究，研究结论如下：

(1) 设计了基于模糊 PID 控制器的视觉引导轨迹控制策略，基于 Matlab/Simulink 与 Adams 软件搭建了视觉引导轨迹控制策略虚拟样机仿真模型，开展了虚拟样机联合仿真，结果表明，视觉引导轨迹控制策略能够实时对机器人运行轨迹误差进行校正，实现了视觉引导机器人连续轨迹误差的实时补偿，验证了本文设计的视觉引导轨迹控制策略的有效性。

(2) 分析了直线和圆形轨迹下机器人关节和末端轨迹振动耦合特性，设计了基于 PI 控制器的柔性关节工业机器人振动控制策略，基于 Matlab/Simulink 与 Adams 软件搭建了振动控制虚拟样机联合仿真模型，结果表明，设计的振动控制策略能够对柔性关节机器人运行轨迹误差进行校正，从而提高机器人关节转角以及末端轨迹控制精度。

(3) 设计了基于滑模变结构控制器的恒力控制策略，基于 Matlab/Simulink 与 Adams 软件搭建了磨削恒力控制虚拟样机联合仿真模型，虚拟样机联合仿真结果表明，设计的磨削恒力控制策略能够对磨削末端装置进行磨削力误差调节，从而实现机器人磨削末端装置的磨削力补偿。

(4) 设计了机器人磨削末端装置，搭建了机器人磨削视觉引导轨迹规划及恒力控制实验平台，完成了实验平台实验硬件以软件选型设计，开展了机器人磨削视觉引导轨迹控制实验以及弹性构件机器人磨削恒力控制实验，实验验证了机器人磨削视觉引导轨迹规划及恒力控制策略的有效性。

6.2 展望

本文研究了机器人磨削视觉引导轨迹规划及恒力控制策略，本文的研究内容仍有较大改进空间，后续研究可以在以下方面做进一步的研究工作：

(1) 由于工业机器人的开链式串联结构特征，影响机器人末端轨迹精度的

误差因素很多，本文主要分析了机器人柔性关节对机器人末端轨迹精度的影响及其控制策略，后续可以综合考虑机器人连杆、关节间隙等因素，分析机器人末端误差的产生机理及其传递机理，结合动力学特性设计有效的振动控制策略，实现机器人末端轨迹误差的补偿。

（2）机器人磨削系统尤其是弹性构件磨削系统是典型的多维耦合动力学系统，磨削过程中系统参数动态时变，本文主要研究了特定工况机器人磨削轨迹规划及恒力控制，后续可以进一步研究弹性构件机器人磨削的智能编程算法，结合系统的振动耦合规律设计磨削恒力自适应控制策略。

（3）机器人磨削恒力控制对磨削主轴与工件之间的接触磨削力需要一定的监测精度，本文所设计的磨削恒力控制装置并不能很好的对实际磨削力进行检测，影响控制效果，后续可以对机器人末端恒力控制装置进行集成优化设计。

参考文献

- [1] 徐祥. 机器人离线编程系统模块化平台的设计与实现[D]. 东南大学, 2016.
- [2] 梅雪川, 葛光军, 林粤科, 陈天豪. 涂胶机器人技术现状与发展趋势[J]. 现代制造技术与装备, 2016(01): 159-160
- [3] 王帅. 基于 3-SPR 型并联机构机器人曲面制孔末端执行器动力学与控制[D]. 兰州理工大学, 2017.
- [4] Kim SH, Nam E, Ha TI, et al. Robotic Machining: A Review of Recent Progress[J]. Int J Precis Eng Man, 2019, 20: 1629-1642.
- [5] Liu YF, Tang D, Ju JY. Electromechanical Coupling Dynamic and Vibration Control of Robotic Grinding System for Thin-walled Workpiece[J]. Actuators, 2023, 12:1-17.
- [6] Du GL, Chen MX, Liu CB, et al. Online Robot Teaching With Natural Human–Robot Interaction[J]. IEEE Trans Electr Insul, 2018, 65: 9571-9581.
- [7] Tran TA, Njåstad EB, Midling OT, et al. Generation of rule-adhering robot programs for aluminium welding automatically from CAD[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2023, 126: 1175–1187.
- [8] Gábor E, Paniti I, Tipary B. Transformation of robotic workcells to digital twins[J]. Cirp Ann, 2020, 69: 149-152.
- [9] Kos M, Arko E, Kosler H, et al. Remote laser welding with in-line adaptive 3D seam tracking[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2019, 103: 4577–4586.
- [10] Chen Z, An YS, Wang ZX, et al. Hybrid offline programming method for robotic welding systems[J]. Robot Cim-Int Manuf, 2022, 73: 102238.1-102238.14.
- [11] Perla M, Richard W, David B, et al. Flexible robot sealant dispensing cell using RGB-D sensor and off-line programming[J]. Robot Cim-Int Manuf, 2017, 48: 188- 195.
- [12] Zhu WD, Qu WW, Cao LH, et al. An off-line programming system for robotic drilling in aerospace manufacturing[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2013, 68: 2535 -

2545.

- [13]Stefano P, Riccardo R, Sergio S. A vision guided robotic system for flexible gluing process in the footwear industry[J]. Robot Cim-Int Manuf, 2020, 65: 1019 65.1-101965.11.
- [14]Zheng LY, Fu Q, Fan W, et al. In-situ Pose Measurement Method for Large Cylinders Based on Binocular Vision and Prior Processing Data[J]. Chin J Mech Eng, 2023, 59: 129-146.
- [15]Andreas S, Natalia-Christina Z, Zoi A, et al. 2-Stage vision system for robotic handling of flexible objects[J]. Procedia CIRP, 2021, 97: 491-496.
- [16]Khashayar A, Varun RH, Kevin H, et al. Automated Object Manipulation Using Vision-Based Mobile Robotic System for Construction Applications[J]. J Comput Civ Eng, 2021, 35: 04020058.1-04020058.15.
- [17]Muhammad J, Altun H, Abo-Serie E. A robust butt welding seam finding technique for intelligent robotic welding system using active laser vision[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2018, 94: 13-29.
- [18]Bedaka CY. Automatic robot path integration using three-dimensional vision and offline programming[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2019, 102: 1935-1950.
- [19]Wang ZJ, Xue KX, Wu DY, et al. Robotic Weld Seam Correction Control System Based on Visual Sensing[J]. Chin J Mech Eng, 2019, 55: 48-55.
- [20]Geng YS, Lai M, Tian XC, et al. A novel seam extraction and path planning method for robotic welding of medium-thickness plate structural parts based on 3D vision[J]. Robot Cim-Int Manuf, 2023, 79: 102433.
- [21]Zhang ZK, Guo K, Sun J. High-precision Closed-loop Robust Control of Industrial Robots Based on Disturbance Observer[J]. Chin J Mech Eng, 2022, 58: 62-70.
- [22]Wang R, Wu AW, Chen X, et al. A point and distance constraint based 6R robot calibration method through machine vision[J]. Robot Cim-Int Manuf, 2020, 65: 101959.1-101959.7.
- [23]Mohammadi Y, Ahmadi K. Chatter in milling with robots with structural

- p nonlinearity[J]. Mech Syst Signal Process, 2022, 167: 108523.
- [24]Wan M, Dang XB, Zhang WH, et al. Chatter suppression in the milling process of the weakly-rigid workpiece through a moving fixture[J]. J Mater Process Technol, 2022, 299: 117293.
- [25]Guo YJ, Dong HY, Wang GF, et al. Vibration analysis and suppression in robotic boring process[J]. Int J Mach Tools Manuf, 2016, 101: 102-110.
- [26]Lee JH, Kim SH, Min BK. Posture optimization in robotic drilling using a deformation energy model[J]. Robot Cim-Int Manuf, 2022, 78: 102395.
- [27]Zhao G, Zhang P, Ma G, et al. System identification of the nonlinear residual errors of an industrial robot using massive measurements[J]. Robot Cim-Int Manuf, 2019, 59: 104-114.
- [28]Zargarbashi S, Khan W, Angeles J. Posture optimization in robot-assisted machining operations[J]. Mech Mach Theory, 2012, 51: 74-86.
- [29]Guo YJ, Dong HY, Ke YL. Stiffness-oriented posture optimization in robotic machining applications[J]. Robot Cim-Int Manuf, 2015, 35: 69-76.
- [30]Jiao J, Tian W, Zhang L, et al. Variable stiffness identification and configuration optimization of industrial robots for machining tasks[J]. Chin J Mech Eng, 2022, 35(1): 1-16.
- [31]Chen X, Zhang Q, Sun Y. Non-kinematic calibration of industrial robots using a rigid-flexible coupling error model and a full pose measurement method[J], Robot Cim-Int Manuf, 2019, 57: 46–58.
- [32]Gao GB, Liu F, San HJ, et al. Hybrid Optimal Kinematic Parameter Identification for an Industrial Robot Based on BPNN-PSO[J]. Complexity, 2018, 2018: 1-11.
- [33]Lin JZ, Ye CC, Yang JX, et al. Contour error-based optimization of the end-effector pose of a 6 degree-of-freedom serial robot in milling operation[J]. Robot Cim-Int Manuf, 2022, 73: 102257.1-102257.11.
- [34]Luo GY, Zou L, Wang Z, et al. A novel kinematic parameters calibration method for industrial robot based on Levenberg-Marquardt and Differential Evolution

- p>hybrid algorithm[J]. Robot Cim-Int Manuf, 2021, 71: 102165.
- [35]Zhang ZK, Guo K, Sun J. High-precision Closed-loop Robust Control of Industrial Robots Based on Disturbance Observer[J]. Chin J Mech Eng, 2022, 58: 62-70.
- [36]Wang R, Wu AW, Chen X, et al. A point and distance constraint based 6R robot calibration method through machine vision[J]. Robot Cim-Int Manuf, 2020, 65: 101959.1-101959.7.
- [37]Chen Z, Zhang T, Li Z. Hybrid control scheme consisting of adaptive and optimal controllers for flexible-base flexible-joint space manipulator with uncertain parameters[J]. International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, 2017, 2017: 314-345.
- [38]Pham MN, Hamelin P, Hazel B, et al. A Two-Stage State Feedback Controller Supported by Disturbance-State Observer for Vibration Control of a Flexible-Joint Robot[J]. Robotica, 2019, 386: 1–23.
- [39]Datouo R, Mvogo A J, Melingui A, et al. Adaptive Fuzzy Finite-Time Command-Filtered Backstepping Control of Flexible-Joint Robots[J]. Robotica, 2021, 39(6): 1081-1100.
- [40]Kim JY. Two-Time Scale Control of Flexible Joint Robots With an Improved Slow Model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4): 3317–3325.
- [41]Zaare S, Soltanpour MR, Moattari M. Voltage based sliding mode control of flexible joint robot manipulators in presence of uncertainties[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2019, 118.
- [42]Huang HY, Pan HT, Cheng Y. Tracking control for flexible joint robots based on adaptive fuzzy compensation with uncertain parameters[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2021, 35(8): 1633-1648.
- [43]Gang X , Ye D, Z LM. Stiffness-based pose optimization of an industrial robot for five-axis milling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 55: 19–28.
- [44]Lu Y, Guo K, Sun J. Force-Position Composite Control Method for Trajectory

- Accuracy Compensation of Industrial Robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(14): 181-189.
- [45]Ma JW, Sun HC, Yan HT, et al. A Solution Method for Optimal Stiffness Path in Joint Space of Serial Manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(14): 54-61.
- [46]Guo YJ, Dong HY, Wang GF, et al. A robotic boring system for intersection holes in aircraft assembly[J]. Industrial Robot, 2018, 45(3): 328-336
- [47]Hu X, Wei X, Zhang H, Han J, Liu X. Robust adaptive tracking control for a class of mechanical systems with unknown disturbances under actuator saturation[J]. Int J Robust Nonlinear Control, 2019, 29(6): 1893-1908.
- [48]Gao GB, Zhang SW, Na J, et al. Compensation of Trajectory Error for Industrial Robots by Interpolation and Calibration Method in the Joint Space[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(21): 55-67.
- [49]Zhou J, Zheng LY, Fan W, et al. Adaptive Online Compensation for Industrial Robot Positioning Error[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(5): 53-66.
- [50]Geng YS, Lai M, Tian XC, et al. A novel seam extraction and path planning method for robotic welding of medium-thickness plate structural parts based on 3D vision[J]. Robot Cim-Int Manuf, 2023, 79: 102433.
- [51]Xiao M, Zhang T, Zou Y, et al. Robotic constant force grinding control based on grinding model and iterative algorithm[J]. Industrial Robot, 2020.
- [52]Chen F, Zhao H, Li D W, et al. Robotic grinding of a blisk with two degrees of freedom contact force control[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018.
- [53]李晓炜, 饶巍林. 机器人恒力磨抛材料去除研究[J]. 机床与液压, 2021, 49 (04): 31-36.
- [54]张铁, 胡广, 陈首彦. 基于模糊自整定 PID 的力控制磨削实验研究[J]. 现代制造工程, 2016, (09): 121-125.
- [55]贾林, 王耀南, 何静, 等. 自由曲面打磨机器人非奇异终端滑模阻抗控制[J]. 电

- 子测量与仪器学报, 2020, 34 (05): 89-96.
- [56]刘真, 周严. 电动钢轨打磨车恒力磨削控制方法的研究[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(01): 38-42.
- [57]张洪瑶, 李论, 赵吉宾, 等. 基于模糊 PID 的力/位混合控制机器人自动化叶片磨削加工[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, 11: 147-150+155.
- [58]徐童, 郝建军, 陈家栋. 凸轮磨削过程磨削力控制方法的研究[J]. 内燃机与配件, 2019, 05: 126-129.
- [59]何银水, 余卓骅, 李健, 马国红. 基于视觉特征的厚板机器人焊接焊缝轮廓的有效提取[J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 56-60.
- [60]张永宏, 胡德金, 徐俊杰. 基于视觉图像的机加工零部件亚像素边缘定位[J]. 2004, 40(6): 179-182.
- [61]JohnJ Craig, 克来格, Craig, 等. 机器人学导论[M]. 机械工业出版社, 2006.
- [62]朱子俊, 朱祥龙, 董志刚, 康仁科, 鲍岩. 磨削加工颤振稳定性研究综述[J]. 机械工程学报, 2023, 59(21): 15-33.
- [63]Emil Madsen, Oluf Skov Rosenlund, David Brandt, Xuping Zhang. Comprehensive modeling and identification of nonlinear joint dynamics for collaborative industrial robot manipulators[J]. Control Engineering Practice, 2020, 101(8): 104462.1-104462.11
- [64]阮毅, 杨影, 陈伯时. 电力拖动自动控制系统-运动控制系统[M]. 机械工业出版社, 2019.
- [65]刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真第二版[M]. 清华大学出版社, 2005.

攻读学位期间发表的学术论文目录

- [1] Experiment system design of visual servo motion control for industrial robot [C]. 5th International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA 2024), 录用出版(EI 检索), 排名第 2 (导师第 1)
- [2] Vision-guided trajectory correction strategy for continuous operation of industrial robot based on fuzzy PID[J].Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 在审, 排名第 2 (导师第 1)。
- [3] 发明专利: 一种具有力感知功能的机器人柔性手爪, CN2024101384159, 排名第 6。

致 谢

研究生阶段的时光即将结束，回想当年，独只入研身未知，很幸运可以成为刘玉飞导师的学生，在往后这令人心潮澎湃的三年研究生生涯里，加入到智造共融课题组进行学习。

首先，我要感谢我最敬爱的导师刘玉飞老师，这三年的学习和生活都离不开刘老师的谆谆教诲。作为成绩并不拔尖的学生，清楚的认识到加入课题组时自身能力的有限和不足，而刘老师不厌其烦的悉心指导，不仅在整个研究生学习期间教会了我很多关于学习方面的学术知识、实践技能和研究思路，也教会了我很多关于人生的经验道理，“艰难方显勇毅，磨砺使得玉成”，期望我们在学习的路途中哪怕风雨再大，大到步履维艰，都要坚守本心，我相信这些会让我在以后的生活中受益无穷。同样，我要感谢智造共融课题组的鞠锦勇老师、苏学满老师，在课题学习的过程中遇到困难和疑问时，鞠老师和苏老师都会牺牲宝贵时间耐心地对我的诸多疑问进行讲解，让我可以学习到更多的课题方面相关知识提升自己的能力。在智造共融课题组学习的日常生活中，我要感谢课题组可爱的组员们，特别感谢课题组的师兄们，汤东、聂洋、陈剑波，传授了我课题学习的很多技巧；还要感谢课题组同届同学陈洋洋、吴朗、纪旭阳，相互交流了学习生活的很多心得体会；也要感谢课题组的师弟师妹们，邵传好、朱祖浩、包琪、金文丽，不管是在课题研究和课题实验上，还是在生活中都给予了我很大帮助，同时结下了深厚的友谊，愿大家都有个美好的未来。在我这多年求学的生涯即将结尾时刻，感谢我的家人对我的鼓励和关爱，给予了我理解和关怀，让我可以专心致志的读书学习，是我最幸福的港湾，感恩之情难以言书。

最后，感谢论文评审和答辩的专家，感谢您在百忙之中抽出时间来提出宝贵的意见，为我的论文把好最后一道关，谢谢！

尚德敏学 唯实惟新

