

分类号: TH113

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220110163



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 基于磁流变阻尼的机器人磨削系统
振动控制研究

论 文 作 者 邵传好

校 内 导 师 刘玉飞（副教授）

校 外 导 师 徐晗

专业学位类别 机械

研究方向（领域） 机器人智能作业系统

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

分类号：TH113

学校代码：10363

密 级：公开

学 号：2220110163

安徽工程大学

基于磁流变阻尼的机器人磨削系统振动 控制研究

RESEARCH ON VIBRATION CONTROL OF ROBOTIC GRINDING SYSTEM BASED ON MAGNETORHEOLOGICAL DAMPING

学 生 姓 名：邵传好

指 导 教 师：刘玉飞（副教授）

专业学位类别：机械

研 究 方 向：机器人智能作业系统

答辩时间：2025 年 5 月 9 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：邵传好

日期：2025 年 5 月 18 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

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：邵传好

指导教师签名：邵传好

日期：2025 年 5 月 18 日

日期：2025 年 5 月 18 日

基于磁流变阻尼的机器人磨削系统振动控制研究

摘 要

机器人磨削被广泛地应用在工业、林业、医疗等加工制造领域。机器人磨削过程中存在磨削力波动与工件振动的动态耦合效应，会降低工件磨削的表面质量。因此，开展机器人磨削系统振动控制研究是确保磨削系统稳定性，提高磨削加工质量的关键。本文开展基于磁流变阻尼的机器人磨削系统振动控制研究，主要包括：

（1）磁流变阻尼磨削装置设计与性能分析。对磁流变阻尼原理进行分析，设计一种用于机器人磨削的磁流变阻尼磨削装置，并研制出磨削装置的整体实物样机；对装置中磁流变阻尼单元的磁路进行电磁仿真验证，并对其力学性能进行分析；基于电子万能试验机的实验平台对磁流变阻尼单元进行力学实验测试，利用实验数据拟合出磁流变阻尼单元的阻尼力模型，为机器人磨削系统的振动控制提供装置和理论基础。

（2）机器人磨削耦合系统振动特性分析。分析机器人磨削耦合系统构成，构建机器人磨削耦合系统的动力学模型，并建立工件等效刚度约束模型；对磁流变阻尼磨削装置振动传递特性展开研究，分析工件在磨削过程中的振动行为以及在振动耦合作用下的磨削力波动特性，得出工件振动与磨削力之间的动态耦合关系，为机器人磨削系统的振动控制设计提供理论基础。

(3) 基于模糊PID的机器人磨削系统振动控制策略。针对机器人磨削耦合系统的振动特性，设计出一种用于机器人磨削的模糊PID自适应控制器，搭建基于模糊PID的机器人磨削系统振动控制策略理论仿真模型；在不同砂轮转速、进给速度以及工件厚度的磨削参数影响下，分析在施加主被动控制前后磨削力的波动特性以及工件振动特性，验证控制策略的有效性。

(4) 机器人磨削系统振动控制实验研究。设计机器人磨削系统的实验测试方案，完成机器人磨削系统的硬件设备选型，开发机器人磨削系统的上位机程序和采集系统，搭建机器人磨削实验平台；开展机器人磨削实验测试，对磨削过程中的磨削力和工件振动位移进行采集，通过对比分析进一步验证磨削装置和控制策略的有效性。

关键词：机器人磨削，磁流变阻尼，动力学建模，振动特性，振动控制

RESEARCH ON VIBRATION CONTROL OF ROBOTIC GRINDING SYSTEM BASED ON MAGNETORHEOLOGICAL DAMPING

ABSTRACT

Robotic grinding has been widely applied in industrial, forestry, and medical manufacturing fields. During robotic grinding processes, the dynamic coupling effects between grinding force fluctuations and workpiece vibrations have degraded the surface quality of machined workpieces. Therefore, conducting research on vibration control in robotic grinding systems has become critical to ensure system stability and improve machining accuracy. This study has focused on vibration control in robotic grinding systems based on magnetorheological damping. The main contents include:

(1) Design and performance analysis of a magnetorheological damping grinding device. The magnetorheological damping principle has been analyzed, and a magnetorheological damping grinding device for robotic grinding has been designed and prototyped. The magnetic circuit of the magnetorheological damping unit has been validated through electromagnetic simulations, and its mechanical performance has been systematically investigated. Mechanical testing of the magnetorheological damping unit has been conducted using an electronic universal testing machine. Experimental data have been utilized to establish a damping force model for the unit, providing both a practical device and a theoretical foundation for vibration control in robotic grinding systems.

(2) Vibration characteristics analysis of the robotic grinding coupled

system. The composition of the robotic grinding coupled system has been analyzed, and its dynamic model has been established alongside a workpiece equivalent stiffness constraint model. The vibration transmission characteristics of the magnetorheological damping grinding device have been studied. Workpiece vibration behavior during grinding and grinding force fluctuation characteristics under vibrational coupling effects have been examined, revealing the dynamic coupling relationship between workpiece vibration and grinding forces. This analysis has laid the theoretical foundation for vibration control design in robotic grinding systems.

(3) Fuzzy PID-based vibration control strategy for robotic grinding systems. A fuzzy PID adaptive controller has been designed to address the vibration characteristics of the robotic grinding coupled system. A theoretical simulation model for the vibration control strategy based on fuzzy PID has been developed. The fluctuation characteristics of grinding forces and workpiece vibrations under varying parameters (e.g., grinding wheel speed, feed rate, and workpiece thickness) have been analyzed, comparing results before and after applying active/passive control. The effectiveness of the control strategy has been validated.

(4) Experimental research on vibration control in robotic grinding systems. An experimental test protocol for the robotic grinding system has been designed, and hardware components have been selected. The host computer program and data acquisition system for robotic grinding experiments have been developed, and an experimental platform has been constructed. Robotic grinding tests have been conducted, during which grinding forces and workpiece vibration displacements have been collected. Comparative analyses have further verified the effectiveness of the grinding device and control strategy.

KEY WORDS: robotic grinding, magnetorheological damping, dynamic modeling, vibration characteristics, vibration control

目 录

摘 要	III
ABSTRACT	V
第一章 绪论	1
1.1 课题来源	1
1.2 课题研究背景及意义	1
1.3 国内外研究现状	2
1.3.1 机器人磨削装置结构设计	2
1.3.2 机器人磨削振动控制方法	3
1.3.3 基于磁流变阻尼的振动控制技术	6
1.4 主要研究内容	8
1.5 本章小结	9
第二章 磁流变阻尼磨削装置设计与性能分析	10
2.1 引言	10
2.2 磁流变阻尼原理	10
2.3 磁流变阻尼磨削装置设计研制	11
2.3.1 结构设计	11
2.3.2 样机研制	14
2.4 磁流变阻尼磨削装置性能分析	15
2.4.1 电磁特性分析	15
2.4.2 力学性能分析	20
2.4.3 实验测试	26
2.5 本章小结	31
第三章 机器人磨削耦合系统振动特性分析	33
3.1 引言	33
3.2 机器人磨削耦合系统动力学模型	33
3.2.1 磁流变阻尼磨削装置动力学模型	34
3.2.2 工件动力学模型	36

3.3 机器人磨削耦合系统振动特性	41
3.3.1 磁流变阻尼磨削装置系统振动传递特性	41
3.3.2 工件磨削系统振动耦合特性	46
3.4 本章小结	48
第四章 基于模糊PID的机器人磨削系统振动控制策略	49
4.1 引言	49
4.2 振动控制策略设计	49
4.2.1 模糊PID原理	50
4.2.2 控制器设计	52
4.3 性能仿真及结果分析	54
4.3.1 磨削力控制	55
4.3.2 工件振动控制	56
4.4 本章小结	58
第五章 机器人磨削系统振动控制实验研究	59
5.1 引言	59
5.2 实验方案	59
5.3 实验平台搭建	60
5.2.1 硬件设备选型	61
5.2.2 上位机程序开发	66
5.4 实验测试	68
5.4.1 测试流程	68
5.4.2 测试过程	69
5.5 结果分析	70
5.5.1 不同磨削接触力控制结果分析	70
5.5.2 不同磨削参数控制结果分析	72
5.6 本章小结	75
第六章 结论与展望	76
6.1 结论	76

6.2 展望	76
参考文献	78
攻读硕士学位期间的主要学术成果	85
致谢	86

第一章 绪论

1.1 课题来源

本课题来源于安徽省高校优秀青年科研项目“弹性薄壁构件机器人磨抛系统柔顺交互控制机理研究”（项目号：2023AH030018）。

1.2 课题研究背景及意义

随着智能制造引领的第四次工业革命浪潮，我国推出了《中国制造 2025》计划，明确将创新驱动作为制造业智能化转型的核心策略。这一战略被视为我国从“制造大国”向“制造强国”转型升级的关键路径。机器人的研发、制造和应用是体现一个国家制造业水平和科技创新能力的重要标志^[1]。

磨削作为提升工件表面质量和尺寸精度的一种机械加工方式，目前多采用磨床加工的方式，复杂的大型工件采用人工打磨^[2]的方式。磨床加工的精度虽然高，但由于其结构尺寸大，无法移动，因此只能用于形状、尺寸固定的工件。随着我国航空航天以及新能源汽车等领域的快速发展，尺寸较大、结构复杂的工件已经难以依靠磨床加工的方式来实现加工需求，现阶段针对大型构件主要依赖人工打磨的方式（图 1-1）。人工打磨过程中由于砂轮与工件表面接触会产生火花、粉尘以及噪声，对操作人员的健康产生极大的危害，同时，由于操作人员的技术层次不一，导致加工的工件质量一致性差，效率低下。



图 1-1 人工打磨风电叶片



图 1-2 机器人打磨风电叶片

随着机器人技术的飞快发展,磨削机器人已被广泛地应用在复合材料、航空航天、船舶制造等自动化生产中^[3,4]。机器人磨削对比人工打磨,其能够保证加工质量地一致性,提高生产效率,有效避免恶劣的工作环境对人员产生的伤害,并且由于工业机器人具有高度的灵活性,能够精确自主定位,因此,能够实现复杂大型曲面^[5,6]的磨削作业(图 1-2)。由于机器人磨削具有明显的优势,因此其在汽车制造、风电叶片、五金陶瓷以及橡胶材料等制造加工领域^[7-9]具有广阔的应用前景。

机器人在磨削过程中,由于工件的装夹方式和材料非线性特性等因素的影响,工件在磨削过程中极易发生振动,工件振动会进一步造成磨削力的波动,而磨削力的波动又会直接引起工件的振动,磨削装置与工件之间存在着复杂的耦合关系,因此,在磨削过程中很难对其磨削力和振动进行精确的分析,单纯的靠机器人控制很难实现工件磨削加工的精度要求,需要在机器人末端增加柔顺装置,通过施加控制系统来抑制磨削力的波动和工件的振动。因此,分析机器人磨削耦合系统的振动特性,设计出一种能够应对复杂动态载荷变化的磨削装置以及搭建出行之有效的控制策略,对研究机器人磨削的振动抑制具有重要的意义。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 机器人磨削装置结构设计

磨削机器人经过近几十年的发展,在很多领域方面的应用已逐渐趋向成熟。谢福贵等人^[10]针对航空航天、能源、船舶等领域的大型复杂构件难加工的问题,提出了基于移动式 and 吸附式机器人的多机协同原位加工新模式,可以实现铣削、制孔和打磨等并行作业模式。刘晓飞等人^[11]针对大型螺旋桨人工抛光质量差的问题,研发了适用于大、中型复杂曲面铣削加工以及研磨抛光的叶曲双面同时加工的机器人磨削系统,解决了手工打磨一致性和精度差的问题。刘祺等人^[12]通过矢量法运动学建模、壁厚约束的镜像路径生成及双模式联动控制,实现了双混联机器人镜像铣削系统的高精度薄壁加工(图 1-3)。熊伟尉等人^[13]针对碳纤维增强复合材料机器人铣边存在的颤振、效率低等问题,提出一种双机器人激光复合铣

边新方法，与铣边机器人比，铣边质量得到有效提升。KUKA^[14]将AGV车与机器人结合，开发出一套机器人叶片磨削系统（图 1-4）。

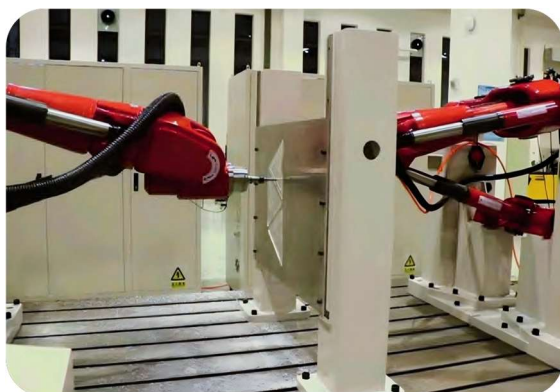


图 1-3 双混连机器人镜像铣削系统



图 1-4 机器人叶片磨削系统

Wen等人^[15]提出一种构建大型舱室移动机器人铣削系统的多目标优化方法，实验结果表明，所提方法能够估计不同组合的铣削精度、成本和时间消耗。Ge等人^[16]针对现有焊缝磨削方法存在的问题，提出了一种基于点云的机器人自动磨削系统，实验结果显示，该系统在焊缝高度、宽度提取及磨削后表面质量方面均表现出较高的精度和一致性。Hsueh等人^[17]针对现有气动磨削模块以及 6 轴机器人臂空间需求存在的不足，提出了一种紧凑的 3 轴磨削机器人，能够实现不同几何形状的工件的稳定磨削。Li等人^[18]提出一种用于磨削焊缝的机器人系统，并提出了一种过度磨削的监测方法，实验表明，所提方法能够准确识别过度研磨（图 1-5）。Liu等人^[19]在新型五轴混合机器人TriMule的基础上，开发了开放式CNC系统并集成了镜像铣削技术，通过实验分析，该系统能确保高加工精度并显著提高了加工效率和质量（图 1-6）。

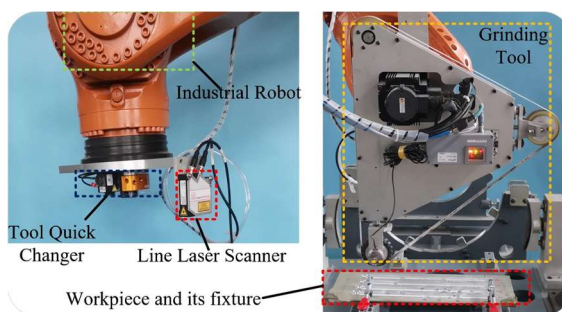


图 1-5 机器人焊缝磨削系统

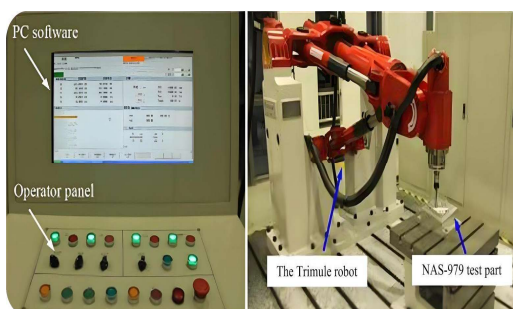


图 1-6 五轴混合机器人铣削系统

1.3.2 机器人磨削振动控制方法

机器人在磨削过程中由于工件与磨削装置之间存在着动态交互的作用，尤其

针对弹性构件磨削，由于弹性构件的低刚度特性，机器人在加工过程中工件极易产生弹性振动，工件振动对磨削力具有扰动作用，磨削力的波动对工件振动又具有激励作用，这使得弹性构件的磨削控制变得更加复杂，面对航空航天^[20,21]、高铁车身部件曲面^[22,23]等具有非线性变形特征的弹性构件，这给机器人磨削增加了一定的难度。因此，维持磨削接触力的恒定是实现振动抑制的关键，目前主要采用两种方法^[24,25]来实现振动抑制，即力/位混合控制和力/位解耦控制两种方法。

力/位混合控制^[26,27]是通过机器人在不同自由度上分别控制力和位置，以实现机械臂与外界环境的柔顺交互进而达到振动抑制效果。祁若龙等人^[28]针对工件曲率不确定性对零件表面质量产生的影响，提出一种变速积分PID前馈控制器和自适应控制算法，实验证明了本文力控制方法可以有效提高恒参数位置阻抗控制的力跟踪性能。Zhu等人^[29]针对机器人打磨大表面时凸起过磨与凹陷欠磨的问题，提出了一种基于自适应可变阻抗的混合力/位控制器，实验结果说明，该控制器相较于传统PI与阻抗控制明显提升了力跟踪精度。Zhang等人^[30]针对航空叶片磨削的复杂性，提出了一种基于模糊PID控制的混合力/位置抗干扰策略，仿真和实验结果表明，该策略在控制效果和磨削质量上显著优于传统PID控制(图 1-7)。

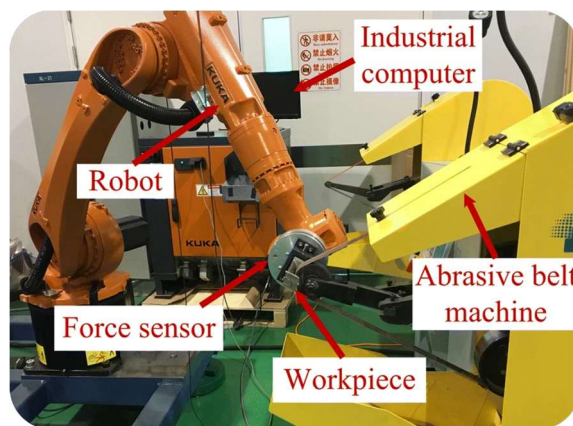


图 1-7 机器人自动磨削系统

Liu等人^[31]针对工业机器人砂布轮抛光航空叶片过程中过抛、欠抛及加工余量分布不均问题，提出一种模糊变阻抗力控制策略，结果表明，应用模糊变阻抗力控制的位移补偿后，叶片表面均匀性与一致性显著提升。Xie等人^[32]针对混合移动抛光机器人在抛光过程中因位置和刚度扰动及非线性接触过程导致的接触力控制难题，提出了一种集成接触力控制方法，结合期望力的前馈和自适应变阻抗控制，有效减少了力超调并补偿了扰动（图 1-8）。

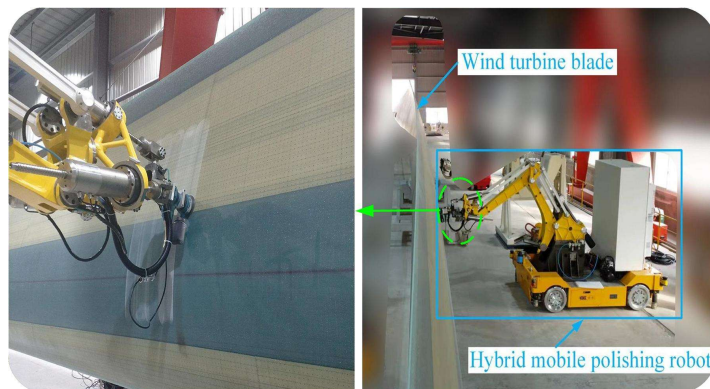


图 1-8 风电叶片移动打磨实验

机器人的力/位控制算法虽然有效，但其存在着力控与位控的耦合效应，可能会导致系统的稳定性不足，并且需要同时控制多个参数，因此增加了机器人控制系统的复杂性和计算量。

力/位解耦控制^[33,34]比较常见的方法是在机器人末端施加末端执行器，机器人负责轨迹控制，末端执行器负责力控，来达到振动抑制的效果。目前，机器人磨削的末端柔顺方式主要分为机械式、气动式和电驱式。Zhang等人^[35]针对传统抛光机器人高度依赖力传感器的特点，设计出一种基于固定-导向柔顺梁二次弯曲模式的被动式恒力末端执行器，通过实验，实现了无力传感器下磨削力的恒定。Wan等人^[36]研究了一种基于滑模控制和电磁致动器的铣削颤振主动抑制方法，并在设计的带有集成电磁致动器的主轴系统上进行了铣削实验，实现了铣削颤振的抑制。Chen等人^[37]针对薄壁叶片设计一种重力补偿器与涡流阻尼器结合的智能末端执行器，实现了机器人抛光薄壁叶片时接触力的精确控制和振动抑制（图 1-9）。

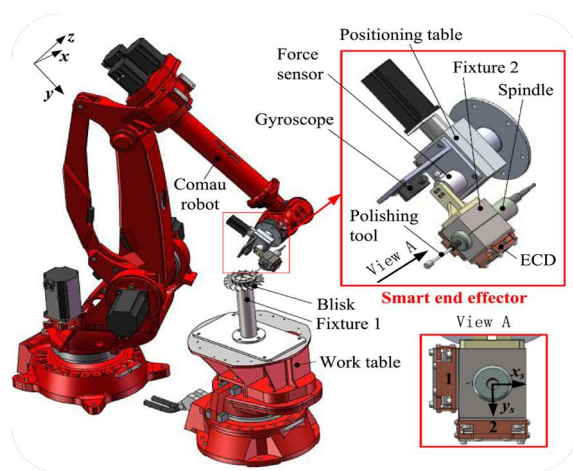


图 1-9 叶片抛光智能末端执行器

Zhang等人^[38]针对有机玻璃需要保持较小的接触力问题,设计了一种气动力控制执行器,通过模糊PID控制策略和重力补偿算法,实现了在机器人抛光过程中保持抛光工具与工件之间的法向接触力恒定。张国龙等人^[39]针对重型工业机器人难以达到精确力控的问题,提出一种含氮气弹簧的气电直驱式 3-P (UU) 2 型三平动力控末端执行器,实验结果表明,基于鲁棒自适应力跟踪导纳控制的三平动力控末端执行器可实现力的快速精确跟踪(图 1-10)。

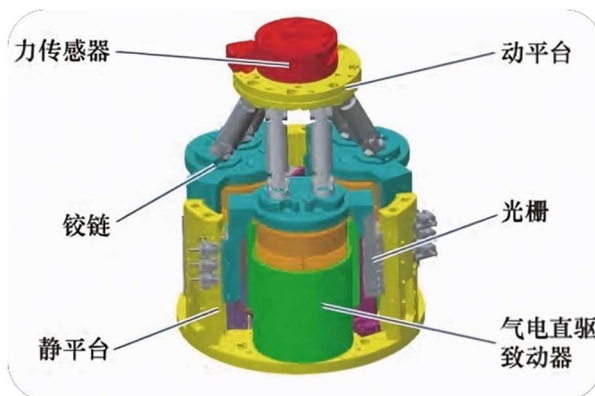


图 1-10 三平动力控末端执行器

机器人的力/位解耦控制相较于力/位混合控制,其控制器设计更为简洁,能够有效减少外部干扰对系统的影响。尽管力/位解耦控制通过末端执行器分离力控与位控任务,但现有机械式、气动式及电动式执行器在刚度调节、动态响应和轻量化方面的固有缺陷,仍制约着高精度磨削工艺的实现。

1.3.3 基于磁流变阻尼的振动控制技术

磁流变阻尼技术因其场控流变特性与快速响应优势,为下一代自适应柔顺执行器的设计提供了全新思路:通过磁场精确调控磁流变液的粘弹性状态,构建兼具高带宽力跟踪、宽域刚度调节和紧凑结构的智能末端装置,很大程度上能够解决传统执行器在磨削振动抑制中的矛盾性需求。目前,磁流变阻尼技术被广泛地应用在建筑、汽车、制造等行业^[40-42],其在机器人磨削方向上的研究仍处于探索阶段。相较于机械式、气动式和电驱式末端执行器,磁流变液技术具有响应速度快、连续调节、能耗低、阻尼力输出大等优点,其在铣削加工领域具有广泛地应用前景。

以往的研究将磁流变液引入到磨削加工领域,通常是将磁流变液设计成辅助装置^[43]或者设计成磁流变液智能夹具^[44]配合机床进行铣削加工,以实现振动抑

制。Bo等人^[45]针对镜面铣削的复杂性、非线性和外部干扰问题，提出了一种基于磁流变液的镜面支撑装置及其力信号反馈控制策略，实验结果表明，该装置配合算法有效提升了镜面铣削的稳定性和加工精度（图 1-11）。Saleh等人^[46]针对深孔镗削过程中由于长细镗杆引起的颤振问题，设计出了一种由海绵结构和少量磁流变液组成的新型磁流变阻尼器，实验结果表明，这种阻尼器显著提高了镗杆的阻尼和动态刚度，从而增加了无颤振切削深度（图 1-12）。



图 1-11 基于磁流变液的镜面支撑装置



图 1-12 磁流变阻尼器用于镗削刀具

Jiang等人^[47]针对铣削薄壁工件时出现的振动问题，提出了一种利用磁流变液的复合夹紧方法，通过理论分析和实验验证，证明了该方法能够有效提高薄壁工件的固有频率，显著抑制铣削振动。Sridhar等人^[48]针对金属切削过程中颤振现象对刀具以及工件产生的负面影响，设计出一种基于磁流变液的新型振动阻尼夹具，通过实验研究，验证了这种夹具在减少加工振动、改善表面粗糙度和提升加工性能方面的有效性。

考虑到现有机床加工灵活性较差的问题，也有部分学者将磁流变液与末端执行器集成通过机器人连接进行作业加工，Zhang等人^[49]针对机器人法向定位误差导致的去除函数失稳问题，设计出一种力控磁流变末端执行器配合阻抗控制器，实现了光学元件纳米级表面精度的稳定加工（图 1-13）。Hou等人^[50]设计出一种MRF吸收器用于安装在机器人主轴外壳上，通过仿真验证了该MRF吸振器能够抑制颤振。Xu等人^[51]开发了一种磁流变阻尼器和磁弹簧机构的机器人末端执行器，提出一种基于重力补偿的抛光力振动控制器，通过磨削实验实现了抛光力的波动抑制和主轴振幅的降低（图 1-14）。

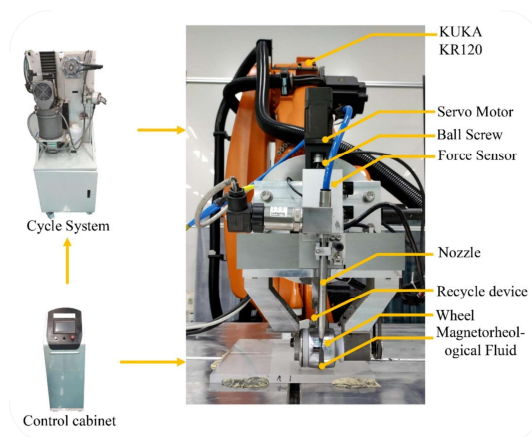


图 1-13 基于磁流变阻尼的机器人铣削装

置

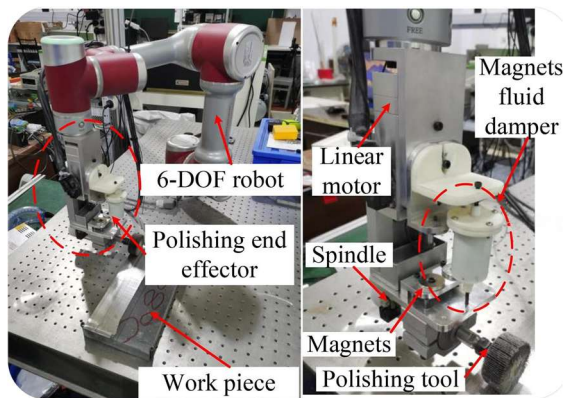


图 1-14 磁流变阻尼抛光装置

可以看出，磁流变阻尼铣削技术由于其独特优势已经取得初步应用成果，但面对复杂工况（如磨削进给速度、磨削转速、工件厚度等磨削参数变化）的磨削场景，基于磁流变阻尼的磨削末端执行器系统仍存在动态特性匹配不足的问题。针对这一问题，本研究聚焦于构建具有宽域参数适应性的智能磨削系统架构，通过创新设计的磁流变阻尼磨削装置与自适应控制策略的协同优化，着力突破复杂工况下动态特性精准调控的技术难点是提高磨削加工质量的关键。

1.4 主要研究内容

本文根据现有机器人磨削末端执行器应用场景存在的局限性，设计了一种基于磁流变技术的磁流变阻尼磨削装置，对磨削装置进行性能分析与验证，通过机器人磨削实验来验证所设计装置以及控制策略的有效性，主要内容如下：

（1）第一章：介绍本课题的研究背景以及意义，概述了机器人作业的研究发展现状，从机器人磨削装置结构设计、机器人磨削振动控制方法、基于磁流变阻尼的振动控制技术三个方面进行分析，提出了机器人磨削振动控制存在的问题，基于此提出了本文的研究内容。

（2）第二章：磁流变阻尼磨削装置设计与性能分析。基于磁流变阻尼原理，设计出一种用于机器人磨削的磁流变阻尼磨削装置，研制出磁流变阻尼磨削装置的实物样机，对装置内部的磁流变阻尼单元进行电磁特性和力学性能分析；基于电子万能试验机的实验平台对磁流变阻尼单元进行力学实验测试，拟合出磁流变

阻尼单元的阻尼力公式，为机器人磨削的振动控制提供装置和理论基础。

(3) 第三章：机器人磨削耦合系统振动特性分析。分析机器人磨削耦合系统的构成，构建机器人磨削耦合系统的动力学模型，并建立工件的等效刚度约束模型；对磁流变阻尼磨削装置的振动传递特性展开研究，分析工件磨削系统在振动耦合作用下的磨削力波动特性，得出机器人磨削耦合系统的动态响应特性，为机器人磨削系统的振动控制策略设计提供理论基础。

(4) 第四章：基于模糊PID的机器人磨削系统振动控制策略。针对机器人磨削耦合系统的构成及工件振动与磨削力之间的关系，设计出机器人磨削系统的模糊PID自适应控制器并搭建机器人磨削系统仿真控制模型，在不同砂轮转速、磨削进给速度及工件厚度的磨削参数下进行仿真，分析不同磨削参数下工件的振动抑制特性，验证本文设计的控制策略的有效性。

(5) 第五章：机器人磨削系统振动控制实验研究。设计出机器人磨削系统的实验测试方案，完成机器人磨削系统的实验硬件设备选型和软件程序设计，搭建机器人磨削实验平台，开展机器人磨削实验研究，验证本文所设计的机器人磨削系统振动控制策略的有效性。

(6) 第六章：总结与展望。对本文研究的工作内容进行总结，提出目前研究存在的问题并进行分析，为后续进一步研究提供一种思路。

1.5 本章小结

本章针对机器人磨削目前阶段存在的问题，概述了本课题的研究背景及意义，分析了机器人磨削装置结构设计，对机器人磨削的力/位混合和力/位解耦控制分别进行了总结，对磁流变阻尼技术在振动抑制方面的研究进行了概括，通过分析现阶段这些研究存在的不足，提出了本课题的主要研究内容。

第二章 磁流变阻尼磨削装置设计与性能分析

2.1 引言

目前常见的机器人磨削振动控制方法主要包括机器人力/位混合控制和添加末端执行器的机器人力/位解耦控制两种方式。本章针对机器人磨削过程中存在的振动耦合现象以及磨削力控制问题，采用力/位解耦的方式设计出一种磁流变阻尼磨削装置，通过电磁仿真与理论推导对装置进行性能分析，最后通过实验建立其阻尼力输出模型并进行验证，为后续机器人磨削的振动控制与磨削力控制提供装置基础。

2.2 磁流变阻尼原理

磁流变阻尼器是一种基于磁流变液特性的智能阻尼装置，其阻尼力大小可通过外部磁场实时调节，根据磁流变液在磁场作用下的流变特性及结构设计差异，磁流变阻尼器主要分为三种工作模式：流动式、剪切式和挤压式。磁流变液在这三种工作模式下始终处于两磁极之间，磁流变液的磁性颗粒与磁力线保持平行。

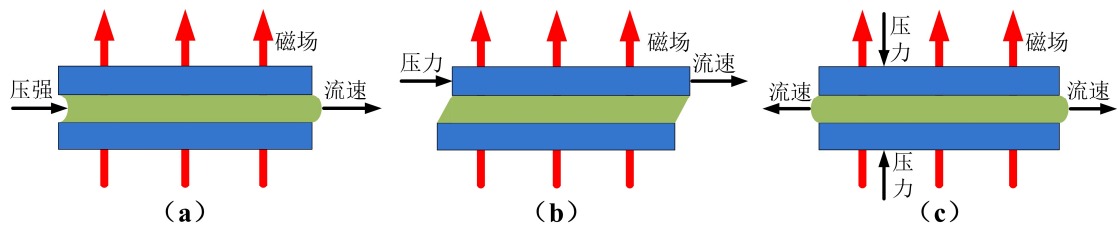


图 2-1 不同工作模式下的磁流变阻尼器：（a）流动式；（b）剪切式；（c）挤压式

图 2-1（a）为流动式磁流变阻尼器原理图，磁流变液在压力驱动下通过固定磁极间隙，流动方向与磁场方向垂直。通过调节励磁线圈电流改变磁场强度，磁流变液的屈服应力随之变化，从而控制阻尼力大小，流动式磁流变阻尼器通常用于车辆悬架系统、建筑减震以及液压控制器等。

图 2-1（b）为剪切式磁流变阻尼器原理图，剪切式磁流变阻尼器一个磁极固定，另一磁极平行或旋转运动，磁流变液在剪切作用下通过磁场区域，磁场方向垂直于流体运动方向。该模式通过调节磁场强度改变剪切应力，实现阻尼力连续

调控，被常用于离合器、制动器等。

图 2-1 (c) 为挤压式磁流变阻尼器，一个磁极固定，另一个磁极相对固定磁极相对运动，磁流变液受到上下磁极的挤压作用向四周流动，产生较大的阻尼力，但挤压位移较小，因此被常用于重型机械缓冲、加工支撑夹具等。

针对机器人磨削过程中高频、小位移振动的特点，本研究采用挤压式磁流变阻尼器作为机器人末端磨削装置的抑振机构。相较于流动式与剪切式磁流变阻尼器，挤压式结构在微小位移范围内即可输出较大的阻尼力，这是由于极板之间的链状磁流变液颗粒受到挤压会发生弯曲破裂并重新形成粗壮的链状颗粒，如图 2-2 所示。该阻尼器有效解决机器人末端执行器的空间约束问题，通过调控电流改变磁场进而实现阻尼力的精准控制，能够在有限工作行程内快速响应振动冲击，为机器人磨削振动控制提供了轻量化、高能效的解决方案。

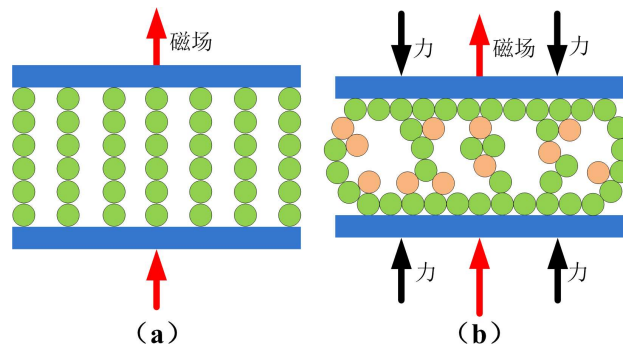


图 2-2 磁流变液挤压增强效应：(a) 挤压前；(b) 挤压后

2.3 磁流变阻尼磨削装置设计研制

2.3.1 结构设计

根据磁流变阻尼原理，本文设计了一种用于机器人磨削的磁流变阻尼磨削装置，旨在抑制机器人磨削过程中存在的扰动。如图 2-3 所示，磁流变阻尼磨削装置由柔顺联接装置和磨削执行器构成；柔顺联接装置主要由联接法兰、抑振单元、力传感器、导向杆以及磨削联接法兰组成，其中，联接法兰用于连接机器人与抑振单元；抑振单元由磁流变阻尼单元、支撑柱、支撑板、直线轴承以及支撑弹簧组成，支撑弹簧用于平衡打磨机的重力；导向杆与力传感器上端共同连接抑振单元，下端连接磨削联接法兰，力传感器用于实时检测机器人磨削过程中的磨削接

触力；磨削联接法兰下端与磨削执行器连接。磨削执行器由打磨机与夹具构成，夹具包括：L-型板、左夹持件以及右夹持件，左夹持件与右夹持件配合用于固定打磨机，L-型板上端连接柔顺联接装置，下端联接左夹持件。

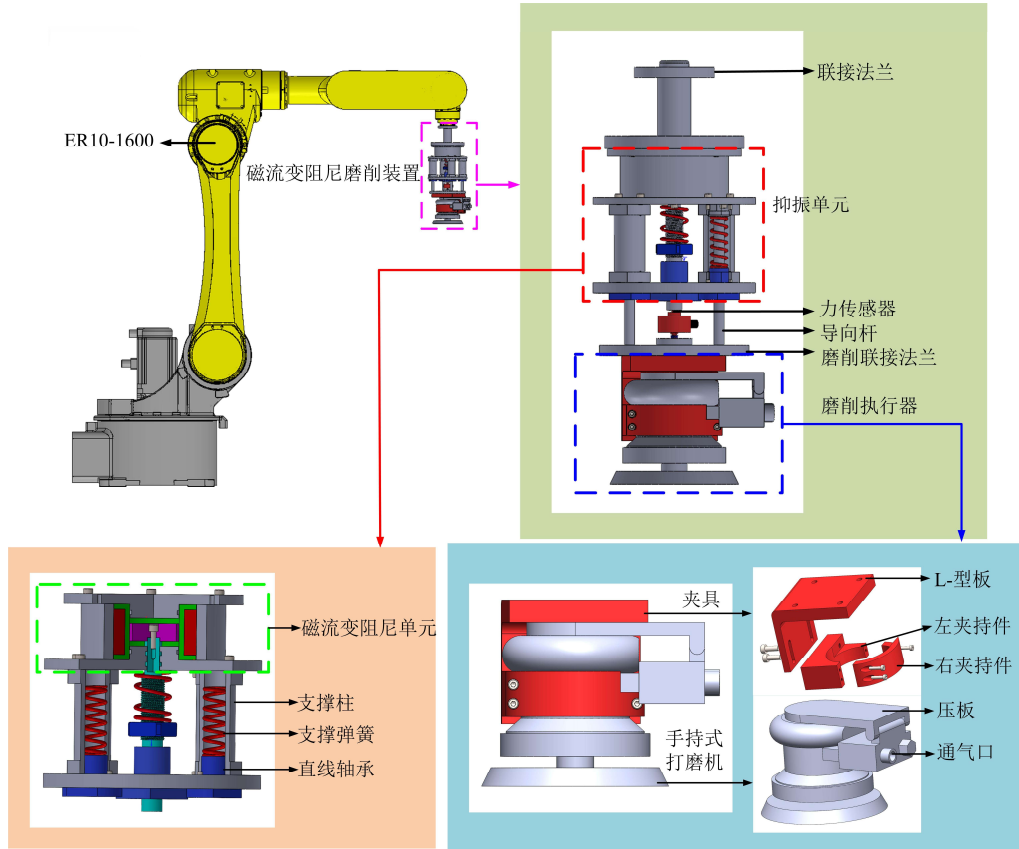


图 2-3 磁流变阻尼磨削装置 3D模型

磁流变阻尼磨削装置的核心组成部分是磁流变阻尼单元。如图 2-4 所示，磁流变阻尼单元由上端盖、导磁环、励磁线圈、阻磁环、压板、磁流变液、下端盖、导杆、锁紧螺母、复位弹簧、O形圈等组成。其中励磁线圈缠绕在阻磁环外围，磁流变液处于上端盖、阻磁环、下端盖包围的密闭空间中；压板与导杆连接，被包围在磁流变液中；励磁线圈通电产生的磁场通过上端盖、导磁环、下端盖、磁流变液、压板、磁流变液返回上端盖形成一条闭合的磁路，磁流变液在磁场作用下由液体转变为类固体，机器人在磨削过程中的振动通过磨削执行装置传递给压板，压板挤压磁流变液会产生阻尼力。机器人在磨削作业时，将工件传递的振动信号经过控制器转化为通入励磁线圈中的电流，产生相应的阻尼力来抑制磨削力的波动，根据振动信号来实时调节励磁线圈中的电流，从而实现磨削过程中对工件的振动抑制。

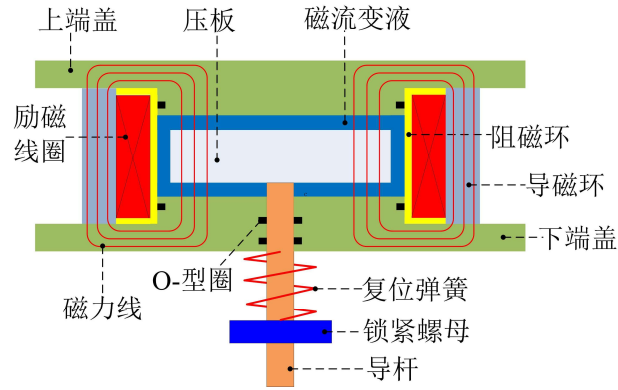


图 2-4 磁流变阻尼单元原理图

磁流变阻尼单元的结构参数和具体尺寸如图 2-5 和表 2-1 所示。

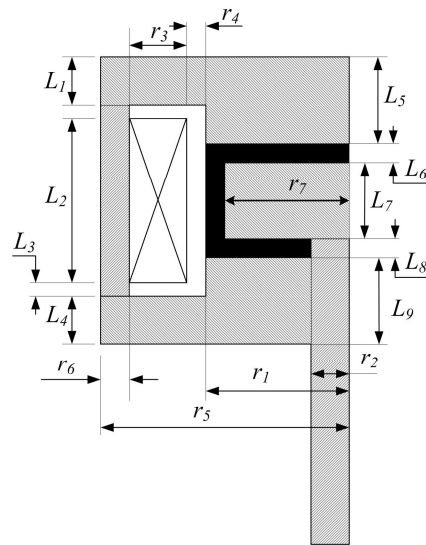


图 2-5 磁流变阻尼单元结构剖面图

表 2-1 磁流变阻尼单元的参数和尺寸

参数	符号	数值	参数	符号	数值
下端盖内圆半径	r_1	20mm	阻磁环凹槽高度	L_2	32mm
导杆半径	r_2	5mm	阻磁环外圆高度	L_3	3mm
阻磁环槽深	r_3	9.5mm	下端盖外圆高度	L_4	6mm
阻磁环内圆厚度	r_4	4mm	上端盖高度	L_5	14mm
下端盖外圆半径	r_5	63mm	压板行程	L_6+L_8	6mm
导磁环厚度	r_6	8mm	压板高度	L_7	10mm
压板半径	r_7	18mm	下端盖高度	L_9	14mm
上端盖外圆高度	L_1	6mm	线圈匝数	N	300turns

根据表 2-1 中的磁流变阻尼单元的部分尺寸参数来确定O型圈的尺寸，初选O型圈的线径为 1.9mm，根据GB/T 17446 规定设计出O型圈密封的沟槽尺寸：

上端盖、下端盖与阻磁环的接触处为静密封，液压静密封设计槽深 h_1 为 1.4mm，槽宽 b_1 为 2.4mm，静密封处的轴径 $2r_2$ 减去槽深得到静密封O-型圈的内径；导杆与下端盖接触处为动密封，液压动密封槽深 h_2 为 1.45mm，槽宽 b_2 为 2.4mm，导杆的外径 $2r_4$ 加动密封槽深得到动密封O-型圈的外径，其具体参数如表 2-2 所示。

表 2-2 密封圈的具体参数

名称	内（外）径尺寸	线径	材质
静密封O-型圈	内径 37.2mm	1.9mm	NBR丁腈橡胶
动密封O-型圈	外径 13.8mm		

由于磁流变阻尼单元在工作时通过励磁线圈的电流是连续短时变动的直流电，为了防止线圈产生的热量影响磁流变液，励磁线圈中的导线应具有低阻抗。因此，选择电流密度为 $j=8\text{A/mm}^2$ 。在本文中，通过励磁线圈的最大电流 I_{MAX} 设置为 2A。假设导线的横截面积为 S ，导线的直径为 D ，计算电流密度的公式为：

$$I_{MAX} = jS \quad (2.1)$$

励磁线圈中导线的截面积计算公式为：

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.2)$$

式中，导线的直径为：

$$D = 2\sqrt{\frac{I_{MAX}}{\pi j}} \quad (2.3)$$

计算结果显示，线圈导线的直径为 0.56mm。为了防止过大的电流损坏线圈，综合考虑后，直径选为 0.72mm。

2.3.2 样机研制

如图 2-6 所示，根据确定的结构参数，研制了磁流变阻尼磨削装置实物样机。其中，磁流变阻尼单元线圈选用漆包铜丝，磁流变液型号选型为MRF-250，上端盖、导磁环、下端盖、压板材质选用电工纯铁，弹簧选用弹簧钢，O-型圈选用丁腈橡胶，其它部件选用铝合金。为了降低磨削装置的制造成本，选择了价格较低的手持式打磨机作为机器人磨削的执行构件，为此设计开发了专用夹具，用于夹紧固定打磨机以及连接柔顺联接装置。

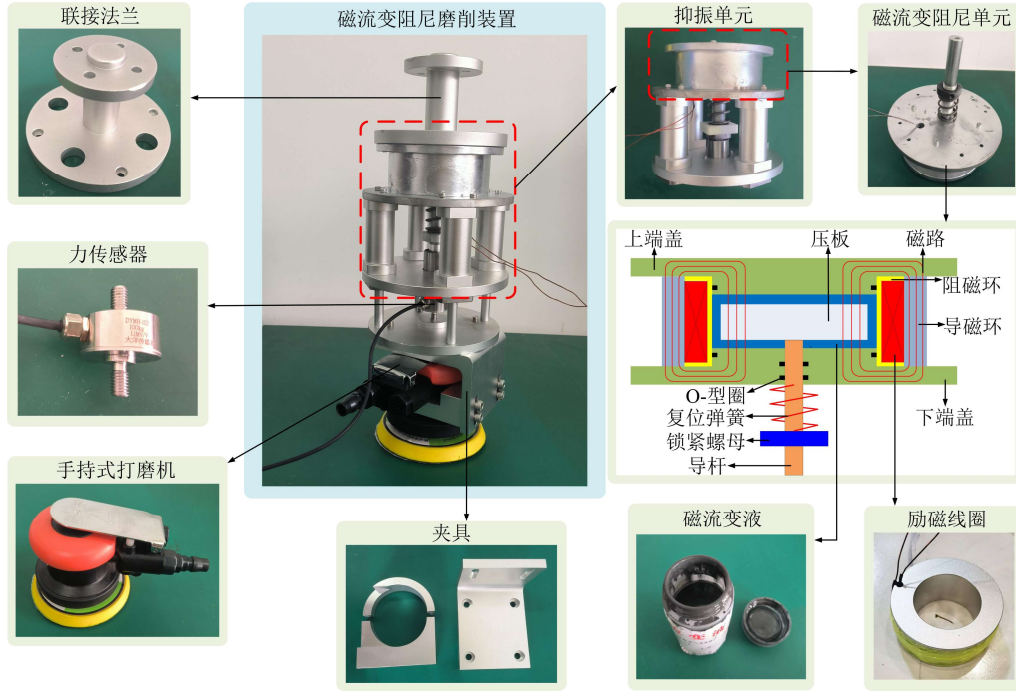


图 2-6 磁流变阻尼磨削装置的实物样机

2.4 磁流变阻尼磨削装置性能分析

2.4.1 电磁特性分析

为研究磁流变阻尼单元在不同电流下的阻尼力输出大小，首先要研究电流 I 对磁流变液挤压区域的磁通密度 B 的影响；如图 2-7 所示，将磁流变阻尼模块的磁路结构简化为各部分结构磁阻组成的串联等效磁路^[52]模型，由安培环路定律可知：

$$U = NI = \Phi_B R_m = \Phi_B (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + 2R_6 + R_7) \quad (2.4)$$

$$\Phi_B = BS \quad (2.5)$$

$$B = \frac{NI}{S(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + 2R_6 + R_7)} \quad (2.6)$$

其中各磁路对应的磁阻分别表示为：

下端盖内圆部位对应磁阻

$$R_1 = \frac{L_8 - L_3}{\mu_1 \pi (r_2^2 - r_4^2)} \quad (2.7)$$

下端盖外圆部位对应磁阻

$$R_2 = \frac{L_3}{\mu_1 \pi (r_8^2 - r_4^2)} \quad (2.8)$$

导磁环磁阻

$$R_3 = \frac{L_2}{\mu_1 \pi r_9^2} \quad (2.9)$$

上端盖外圆部位对应磁阻

$$R_4 = \frac{L_1}{\mu_1 \pi r_8^2} \quad (2.10)$$

上端盖内圆部位对应磁阻

$$R_5 = \frac{L_4 - L_1}{\mu_1 \pi r_2^2} \quad (2.11)$$

上端盖与压板之间的磁流变液磁阻

$$R_6 = \frac{L_5}{\mu_2 \pi r_2^2} \quad (2.12)$$

压板磁阻

$$R_7 = \frac{L_6}{\mu_1 \pi r_7^2} \quad (2.13)$$

磁场穿过磁流变液面积

$$S = \pi r_7^2 \quad (2.14)$$

式中：

μ_1 -电工纯铁材质磁导率

μ_2 -磁流变液材质磁导率

R_m -磁路中所有磁阻之和

Φ_B -磁流变阻尼单元磁通量

N -线圈匝数

I -电流大小

U -磁流变阻尼单元的磁动势

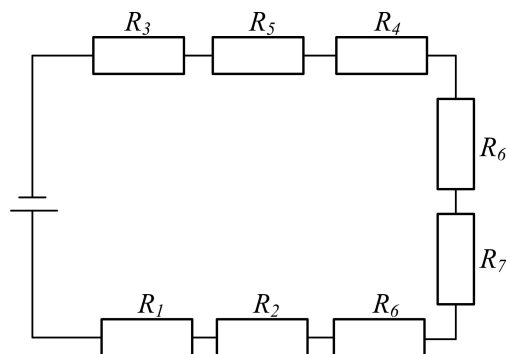


图 2-7 等效磁路模型

为验证建立的等效磁路的正确性,利用电磁仿真软件Ansoft Maxwell对灌入磁流变液的磁流变阻尼单元进行电磁特性分析。首先,在Ansoft Maxwell电磁仿真软件中建立磁流变阻尼单元 2D模型的四分之一,如图 2-8 所示。

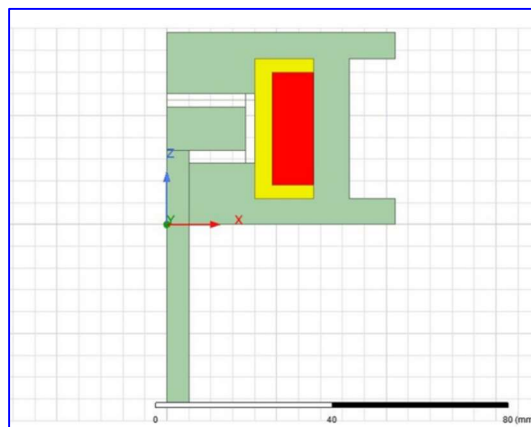


图 2-8 电磁仿真模型

将DT4C-电工纯铁以及磁流变液的 B - H 参数导入到模型中,如图 2-9、图 2-10 所示。其中表 2-3、表 2-4 分别为二者的材料详细参数。

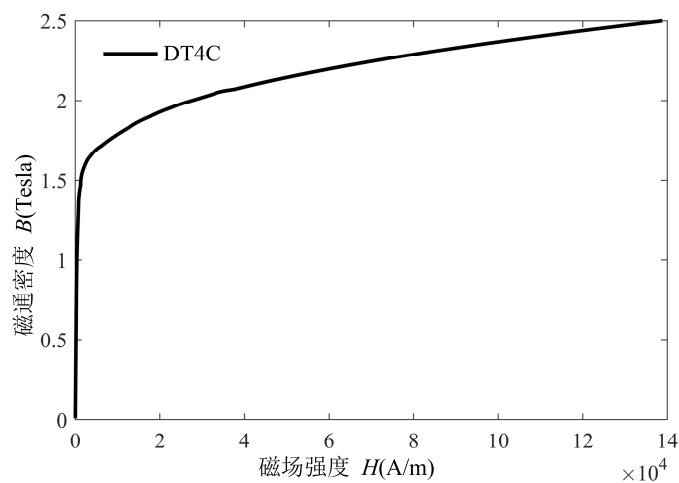


图 2-9 DT4C-电工纯铁BH曲线

表 2-3 DT4C-电工纯铁具体参数

参数	数值
矫顽力 H_C (A/m)	≤ 32.0
最大磁导率 μ_{max} (H/m)	≥ 12000
抗拉强度 σ_b (Mpa)	265

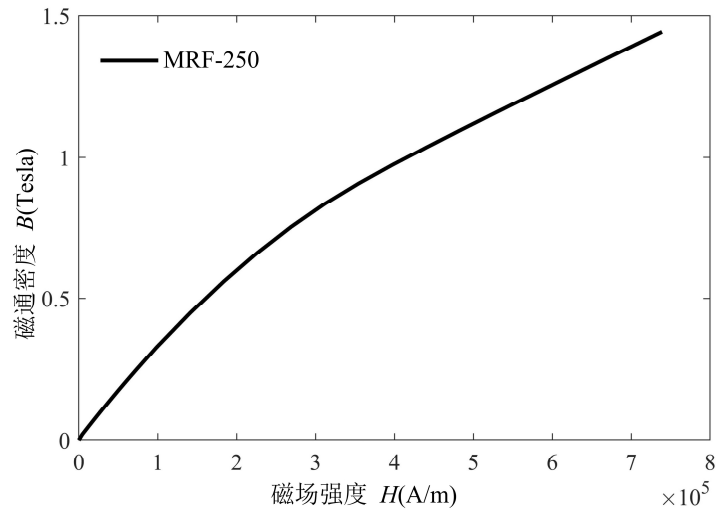


图 2-10 MRF-250 BH曲线

表 2-4 型号MRF-250 磁流变液具体参数

型号	MRF-250
密度 (g/cm^3)	2.55
零场粘度 ($\text{mpa}\cdot\text{s}$)	150
磁性颗粒体积分数 (%)	20

在Excitations中将励磁线圈设置为激励源，将Excitations中的电流值用变量IQRM代替，其值大小为单根导线通入电流乘线圈匝数，在Optimetrics中添加Parametrics并设定变量的变化范围为 0~600A，步长 60A，如图 2-11 (a) 所示；定义磁流变阻尼单元模型的边界为Balloon；对该模型表面区域进行网格划分，选择Assign Mesh Operation-On Selection-Element Length Based Refinement，由于模型中的最小尺寸为 2mm，因此，本文设定模型网格的最大单元尺寸为 1mm，如图 2-11 (b) 所示；在Analysis中添加Solution setup，设置Setup中的迭代步数和求解精度；参数设置完毕，分别对Analysis-Setup和Optimetrics-Parametric Setup进行求解分析。

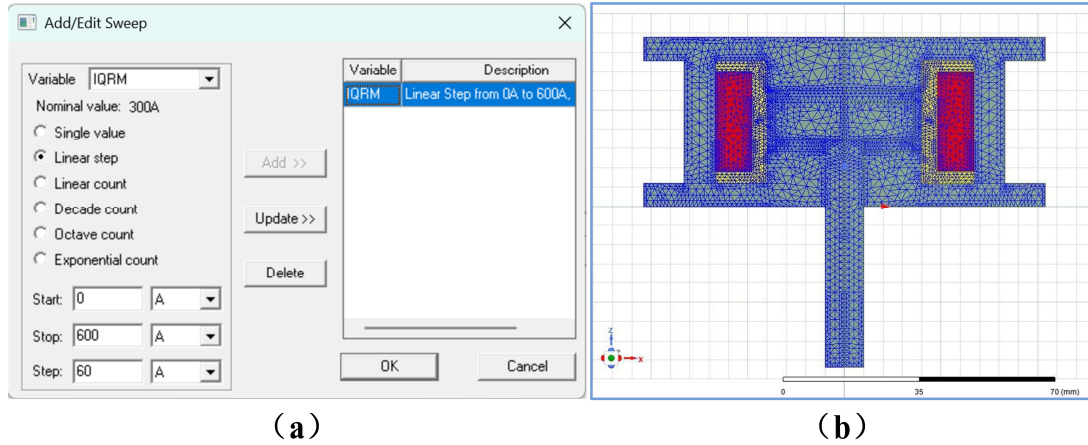


图 2-11 磁流变阻尼单元仿真参数设置：（a）变量参数设置；（b）有限元网格划分

如图 2-12 所示，通过仿真结果能看出模型的磁力线分布与预期磁路基本一致，磁通密度在压板上下附近处较高，意味着磁场大部分经压板穿过磁流变液从而形成回路，在压板直径范围内的磁流变液的磁通密度会明显高于两侧的磁流变液。验证了所设计的磁流变阻尼单元有效性、准确性，为后续磨削装置的力学性能分析提供理论基础。

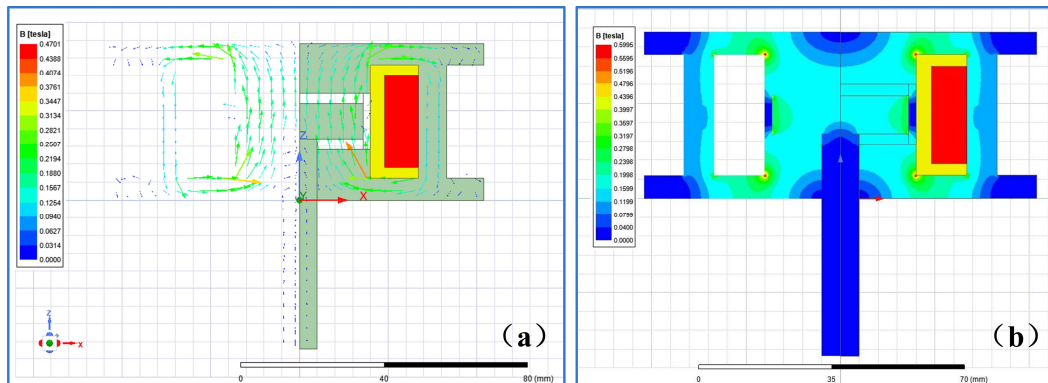


图 2-12 磁流变阻尼单元磁场仿真：（a）模型的磁通密度矢量；（b）磁通密度

如图 2-13 所示为磁流变阻尼单元在不同电流下的电磁仿真结果，从图中能够明显看出，随着电流的增大，压板上方的磁流变液挤压区域，磁通密度明显增大。

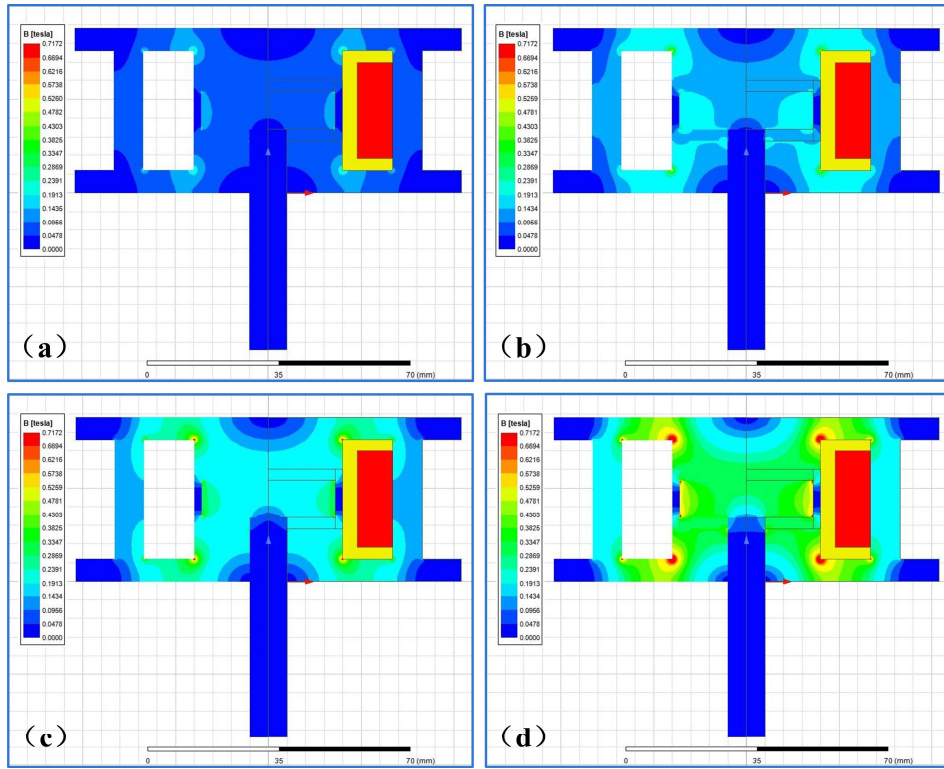


图 2-13 磁流变阻尼单元在不同电流下仿真结果：（a） $I=0.4\text{A}$ ；（b） $I=0.8\text{A}$ ；（c） $I=1.2\text{A}$ ；（d） $I=2\text{A}$

2.4.2 力学性能分析

本文设计的磁流变阻尼磨削装置对外输出的作用力主要包括复位弹簧压缩后产生的弹力以及挤压磁流变液产生的阻尼力，复位弹簧产生的弹力可通过经验公式求得：

$$k = \frac{Gd^4}{8nD^3} \quad (2.15)$$

其中：

G 为弹簧钢的剪切模量，一般取 78600~80670Mpa；

d 为弹簧线径；

n 为弹簧圈数；

D 为弹簧中径；

本章节主要对磁流变阻尼单元的阻尼力进行分析研究。如图 2-14 所示，机器人磨削的振动导致磨削力 F 的波动。磨削振动和磨削力 F 的波动通过砂轮传递到磁流变阻尼单元的压板上，压板挤压上方磁流变液产生阻尼力 F 。通过控制磁

流变阻尼装置的电流产生不同的阻尼力，实现磨削振动抑制和接触力补偿。本节重点介绍磁流变阻尼单元的阻尼力特性分析。

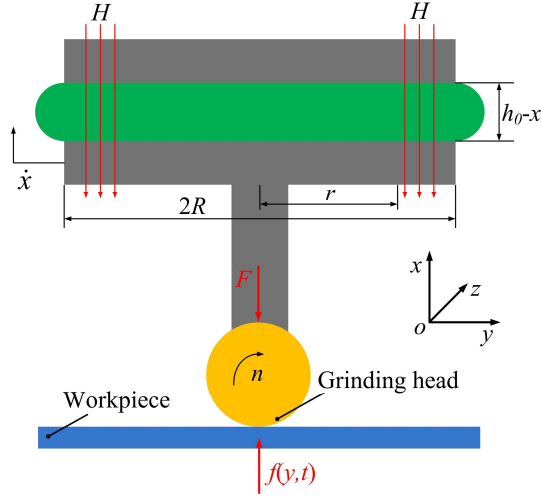


图 2-14 圆板挤压模式下磁流变单元模型

磁流变液挤压产生的阻尼力主要包括磁流变材料本身的粘性力 F_η 和磁流变效应引起的阻尼力 F_{mr} 。

(1) 黏性力计算

对于平板挤压模型，一般任务内部流体为 Poiseuille 流（层流），其速度分布如图 2-15 所示

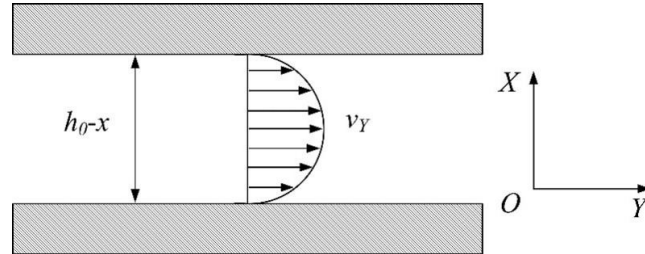


图 2-15 平板模型速度梯度分布

在外力作用下，两压板相对移动挤压内部流体，两压板之间的流体会沿径向向外流动，一般定义内部流体仅有沿径向的速度 v_Y ，由 Navier-Stokes 方程^[53]可得

$$-\rho \frac{\partial p}{\partial Y} + \nu \frac{\partial^2 v_Y}{\partial X^2} = 0 \quad (2.16)$$

由式 (2.16) 进一步得出：

$$\frac{\partial^2 v_Y}{\partial X^2} = \frac{\partial p}{\rho \nu \partial Y} = \frac{\partial p}{\eta \partial Y} \quad (2.17)$$

对 v_Y 进行二次积分并带入边界条件：当 $X=0$ 时， $v_Y=0$ ；当 $X=h$ 时， $v_Y=0$ ，得：

$$v_Y = \frac{\partial p}{2\eta \partial r} X^2 - \frac{(h_0 - x) \partial F_\eta}{2\eta \partial r} X \quad (2.18)$$

由流体流量守恒能够得到：

$$V(r) = C(r) \int_0^h v_Y dX = -\pi r^2 v \quad (2.19)$$

当压板向上压缩时，流体的径向体积变化率为：

$$V(r) = -\frac{C(r)(h_0 - x)^3}{12\alpha\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right) = -\pi r^2 v \quad (2.20)$$

周长 $C(r)$ 表示为：

$$C(r) = 2\pi r \quad (2.21)$$

由公式（2.20）能够进一步得到：

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{6\alpha\eta v r}{h^3} \quad (2.22)$$

对公式（2.22）积分，并带入边界条件： $r=R$ 时， $p=0$ ，可得：

$$p = -\frac{3\eta v r^2}{(h_0 - x)^3} + \frac{3\eta v R^2}{(h_0 - x)^3} \quad (2.23)$$

对 r 积分，得到磁流变粘滞阻尼力关于压板速度的关系式：

$$F_\eta = \int_0^R p(r) C(r) dr = \frac{3\alpha\eta R^4}{2(h_0 - x)^3} v \quad (2.24)$$

式中：

r 为压板任意位置处的半径；

$V(r)$ 为上下压板间磁流变液的体积变化率；

$C(r)$ 为压板半径 r 处的周长；

h_0 为上下两压板初始间距；

x 为压板相对位移；

v 为压板相对速度；

H 磁场方向；

α 与边界条件有关的系数；（磁流变液受沉降、温度、内部气泡影响）

ν 为磁流变液的运动粘度；

ρ 为磁流变液密度；

η 为磁流变液的粘度；

F_η 为磁流变液的粘滞阻力；

(2) 库仑力计算

磁流变液在挤压模式下，其性质一般被认为是宾汉流体，将其模型等效为平板模型进行计算，考虑到磁流变液在磁场影响下具有较大的屈服应力，压板之间存在着塞流层，如图 2-16 所示

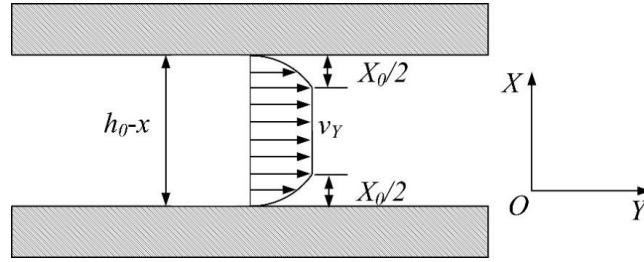


图 2-16 磁流变液在磁场作用下流动状态

磁流变效应引起的阻尼力 F_{mr} 的运动微分方程的应力表达式^[54]：

$$\frac{\partial p_{mr}}{\partial r} = \frac{-\partial \tau}{\partial X} \text{sgn}(v) \quad (2.25)$$

当 v 向上时，沿板内的磁流变液受到挤压， $\text{sgn}(v) = 1$ ；相反， $\text{sgn}(v) = -1$ 。

由边界条件： $\tau[(h_0 - x)/\beta] = 0$ ，得：

$$\tau = \frac{\partial p_{mr}}{\partial r} \left[X - \frac{(h_0 - x)}{\beta} \right] \text{sgn}(v) \quad (2.26)$$

假设在压板附近发生塞流，剪切应力为磁致剪切应力， $\tau = \tau_y$ ， τ_y 为磁致剪切应力，则压强梯度与磁致剪切应力 τ_y 关系式为：

$$\frac{\partial p_{mr}}{\partial r} = -\frac{\beta \tau_y}{h} \text{sgn}(v) \quad (2.27)$$

对式（2.27）进行积分并带入边界条件： $r=R$ 时， $p_{mr}(R) = 0$ ，可得：

$$p_{mr} = \frac{\alpha \tau_y}{h} (R - r) \text{sgn}(v) \quad (2.28)$$

对式（2.28）进行积分得活塞盘得阻尼力：

$$F_{mr} = \int_0^R 2\pi r p_{mr} dr = \frac{\beta \pi R^3 \tau_y}{6h} \text{sgn}(v) \quad (2.29)$$

总阻尼力：

$$F = F_{mr} + F_{\eta} = \frac{3\alpha\eta R^4}{2(h_0 - x)^3}v + \frac{\beta\pi R^3\tau_y}{6h}\text{sgn}(v) \quad (2.30)$$

式中：

ρ_{mr} 为磁流变效应引起的压强差；

β 与边界条件有关的系数；

τ_y 为磁流变液的剪切屈服强度；

F_{mr} 磁流变效应引起的阻尼力；

方程（2.30）中的剪切应力 τ_y 是磁通密度 B 相关的关系式，本文选取了MRF-250 磁流变液，将制造商提供的 τ - B 实验试验数据用Matlab多项式拟合，拟合曲线如图 2-17 所示。

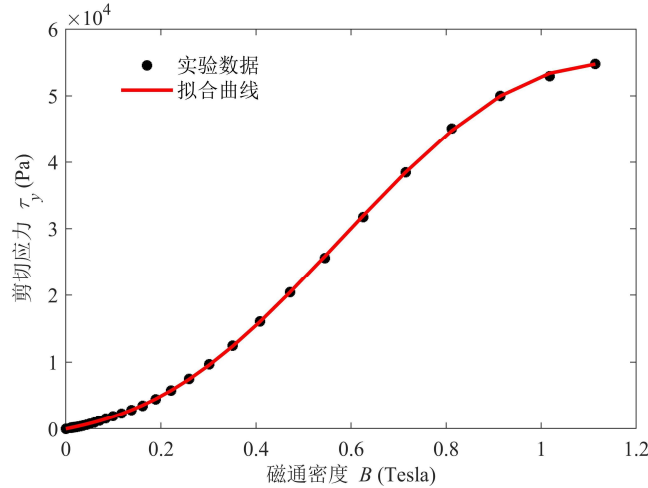


图 2-17 MRF-250 τ_y - B 拟合曲线

磁通密度 B 和剪切应力 τ_y 之间的关系可以表示为：

$$\tau_y = 7.322e^4 B^5 - 2.227e^5 B^4 + 1.607e^5 B^3 + 2.736e^4 B^2 + 1.437e^4 B \quad (2.31)$$

如表 2-5 所示，利用Ansoft Maxwell软件中的场计算器分别计算出不同电流 I 对应的磁流变液挤压区域的磁通密度平均值 B 。

表 2-5 不同电流对应的磁通密度值

I (A)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
B	0	0.038	0.071	0.104	0.136	0.168	0.199	0.230	0.260	0.289	0.318

将表 2-5 中不同电流 I 对应的磁通密度 B 代入方程（2.31）中，从而获得不同电流值 I 对应的剪切应力值 τ_y ，如表 2-6 所示。

表 2-6 不同电流对应的剪切应力

I (A)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
τ_y	0	576.798	1222.252	1959.822	2806.821	3776.825
I (A)	1.2	1.4	1.6	1.8	2	
τ_y	4878.802	6114.511	7475.101	8937.632	10462.201	

在Matlab中, 通过多项式拟合的方法, 得到剪切应力 τ_y 和电流 I 之间的关系式:

$$\tau_y = 1478I^2 + 2377I \quad (2.32)$$

因此, 磁流变阻尼单元的总阻尼力为:

$$F = F_{mr} + F_{\eta} = \frac{\beta\pi R^3(1478I^2 + 2377I)}{3(h_0 - x)} \text{sgn}(v) + \frac{3\alpha\eta R^4}{2(h_0 - x)^3} v \quad (2.33)$$

从方程 (2.33) 可以看出, 磁流变阻尼单元的黏性阻尼力 F_{η} 与压缩速度 v 呈线性关系, 而由磁流变效应引起的阻尼力 F_{mr} 与电流 I 呈非线性关系。为了方便观察电流 I 和压缩速度 v 对阻尼力 F 的影响, 在Matlab中对理论方程 (2.33) 进行仿真, 观察阻尼力 F 与电流 I 、压缩速度 v 和压缩位移 x 之间的关系。

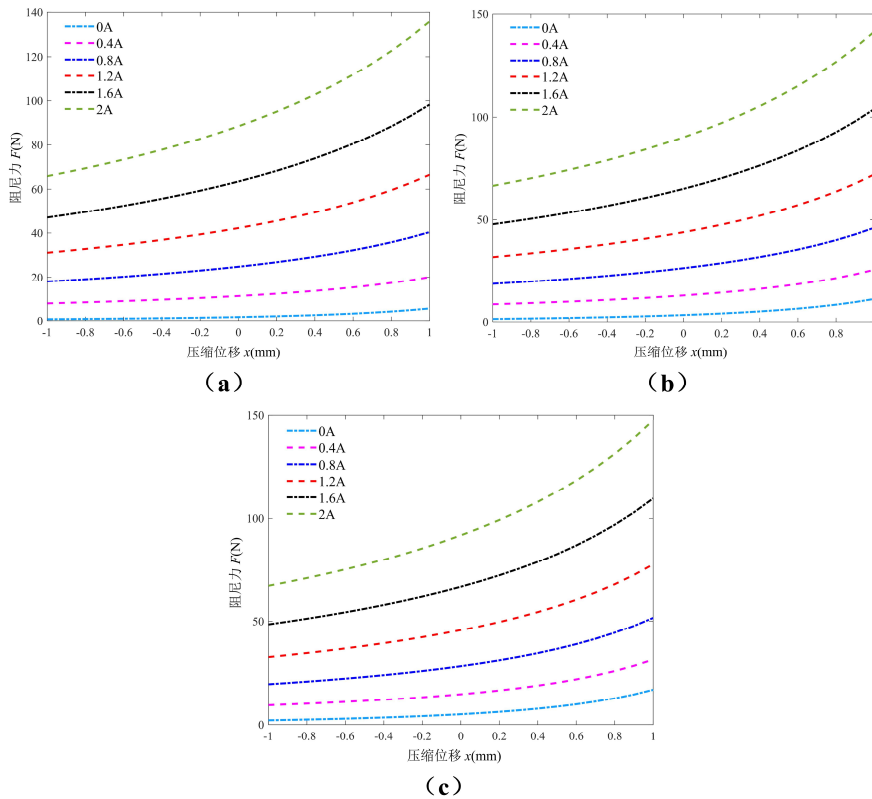


图 2-18 不同压缩速度下的阻尼力: (a) 压缩速度 $v=200\text{mm/min}$; (b) 压缩速度 $v=400\text{mm/min}$; (c) 压缩速度 $v=600\text{mm/min}$

图 2-18 显示了磁流变阻尼单元在不同电流 I 和压缩速度 v 下的阻尼力特性。在分析过程中，电流 I 的范围从 0 到 2A，以 0.2A 为步长递增，压缩速度 $v=200\text{mm/min}$ 、 $v=400\text{mm/min}$ 和 $v=600\text{mm/min}$ 。上下压板的初始距离 $h_0=4\text{mm}$ ，压缩位移 $x=2\text{mm}$ ，压板在磁流变液的中间位置（ $h_0=3\text{mm}$ ）处为 0。从图 2-18 可以看出，阻尼力 F 随电流 I 、压缩速度 v 和压缩位移 x 的增大而增大。此外，阻尼力 F 随电流 I 和压缩位移 x 的变化相较于压缩速度更为明显。

2.4.3 实验测试

由于理论模型的参数受边界条件影响较大，磁流变阻尼单元的理论阻尼力大小与实际阻尼力在部分区域仍存在较大误差，为进一步分析磁流变阻尼单元的实际阻尼力与电流、速度以及压板位移的关系，通过实验来分析磁流变阻尼单元的力学特性。

如图 2-19 所示，本课题在 AGS-X10KN 电子万能试验机上测试了所设计的磁流变阻尼单元的力学性能。实验过程中，电子万能试验机的压缩行程设定为 0~2mm，压缩速度 $v=200\text{mm/min}$ 、 $v=400\text{mm/min}$ 、 $v=600\text{mm/min}$ 。为了更好地观察磁流变液中压板的位置变化和出力状态，将压板位于磁流变液中部的的位置（ $h=3\text{mm}$ ）定义为 0，压板的向下挤压方向为正。

如图 2-20 为 AGS-X10KN 电子万能试验机测力实验的上位机软件控制界面。

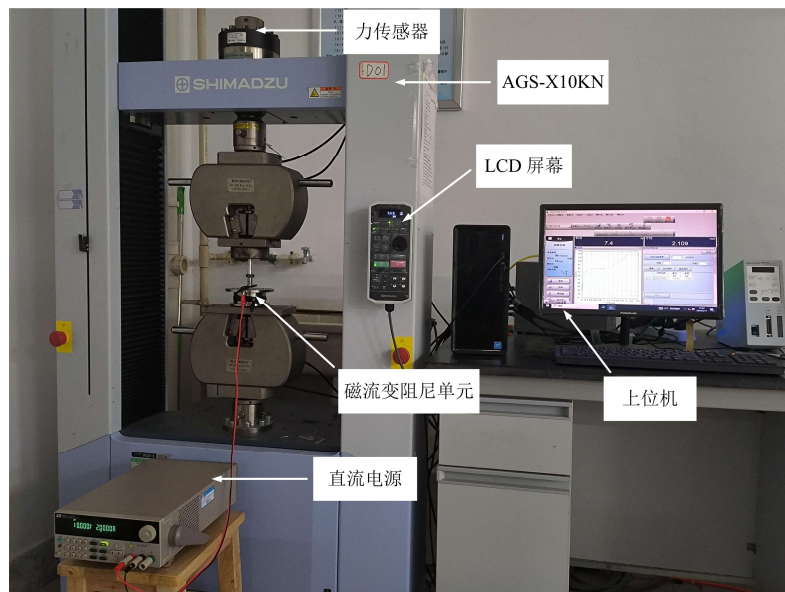


图 2-19 磁流变阻尼单元测力实验

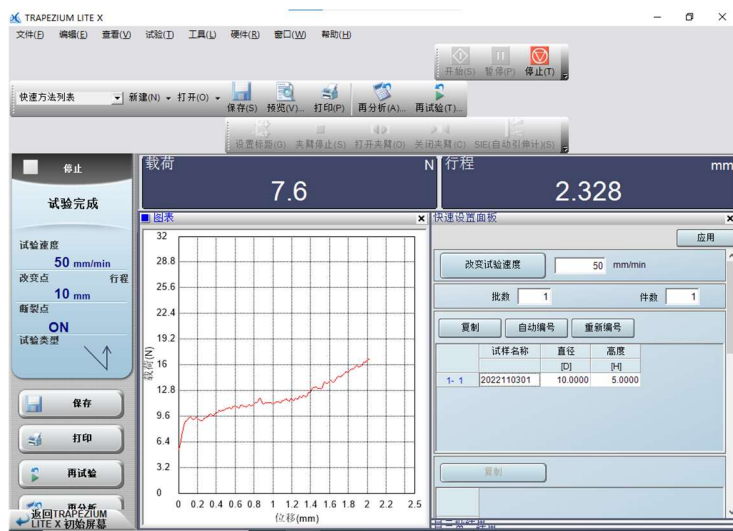


图 2-20 AGS-X10KN软件控制界面

如图 2-21 (a) 所示, 在零磁场条件 ($I=0A$) 和压缩位移 $x=2mm$ 的情况下, 磁流变阻尼单元在不同压缩速度下的阻尼力随着压缩位移的增加而增加。如图 2-21 (b) 所示, 展示了磁流变阻尼单元在不同压缩速度下的最大阻尼力值, 可以观察到, 随着压缩速度的增加, 阻尼力先增加, 然后减少, 并逐渐趋于平缓。这是由于磁流变液在一定速度下出现的屈服现象。从图 2-21 (b) 中可以看出, 磁流变液在压缩速度为 $v=400mm/min$ 时发生屈服。

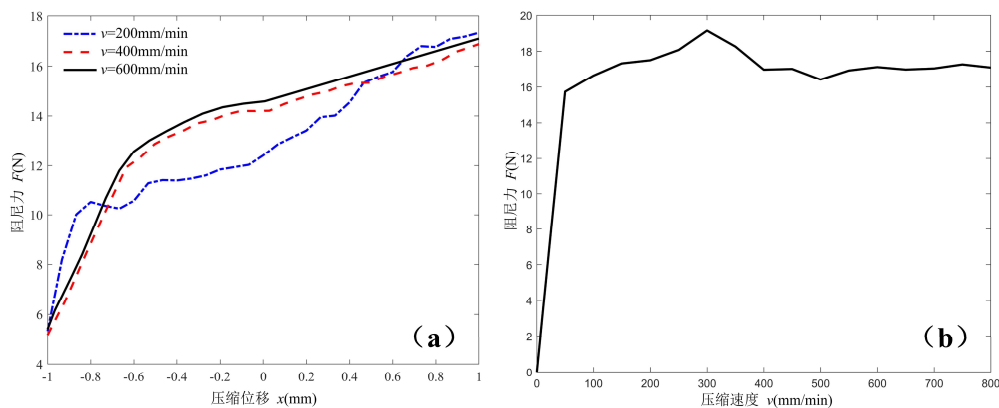


图 2-21 零磁场下不同工况对应的阻尼力: (a) 不同压缩位移对应的阻尼力; (b) 不同压缩速度对应的最大阻尼力

为了进一步分析磁流变阻尼单元的实际输出与电流、压缩速度和压缩位移之间的关系, 通过实验分析了磁流变阻尼单元的力学性能。

如图 2-22 所示, 为了观察电流 I 、压缩位移 x 和压缩速度 v 对磁流变阻尼单元输出的影响, 将电子万能试验机的压缩速度设为 $v=200mm/min$ 、 $v=400mm/min$ 和

$v=600\text{mm/min}$ 。

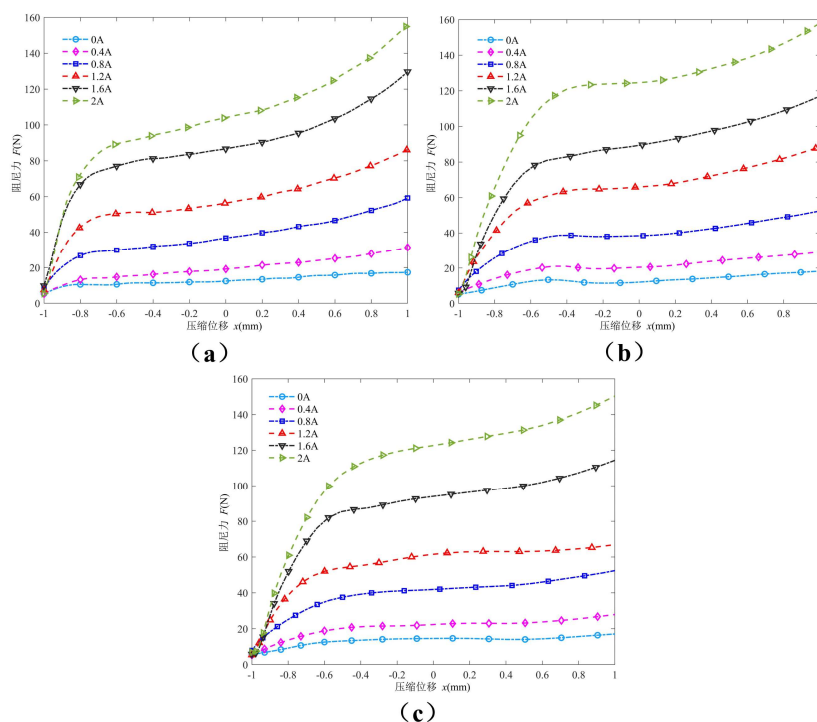


图 2-22 不同压缩速度下对应的阻尼力：（a）压缩速度 $v=200\text{mm/min}$ ；（b）压缩速度 $v=400\text{mm/min}$ ；（c）压缩速度 $v=600\text{mm/min}$

由图 2-22 可以看出，磁流变阻尼单元产生的阻尼力 F 随着电流 I 、压缩位移 x 和压缩速度 v 的增大而增大，这符合式 (2.33) 中阻尼力 F 随电流 I 、压缩位移 x 和压缩速度 v 的变化而变化的现象。然而，从图 2-22 可以明显看出，当压缩位移 $x \geq -0.6\text{mm}$ 时，实验测得的阻尼力随速度增加其增加速度比理论仿真稍慢，并且当电流 $I \geq 0.4\text{A}$ 时，实验测得的阻尼力随电流增加其增加速度比理论仿真得更快；基于前两个条件，当压缩速度 $v \geq 400\text{mm/min}$ 时，实验测得的阻尼力随位移增加其增加速度比理论仿真的更慢。这主要是因为实际的磁流变液受温度、沉降等因素影响较大，并且磁流变液也存在屈服效应。

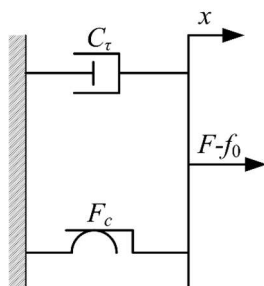


图 2-23 Bingham模型

为了得到适用于机器人磨削振动控制的阻尼力模型，本文采用图 2-23 所示的Bingham^[55]模型对不同工况下磁流变阻尼单元输出阻尼力进行拟合。

考虑到实验中使用的电子万能试验机只能在一个方向上拉伸或压缩，磁流变阻尼单元具有对称结构，其拉力与压缩力相等和相反。在此基础上，建立磁流变阻尼单元的阻尼力模型如下：

$$F = \begin{cases} f_0(x) + C_\tau \dot{x} + F_c(I, x), & \dot{x} > 0 \\ 0, & \dot{x} = 0 \\ -f_0(-x) + C_\tau \dot{x} - F_c(I, -x), & \dot{x} < 0 \end{cases} \quad (2.34)$$

式中， C_τ 为磁流变液屈服后的粘性阻尼系数，一般为常数； F_0 为磁流变液中气泡挤压产生的力，主要受压缩位移 x 的影响； F_c 为磁流变效应产生的阻尼力，主要受电流 I 和压缩位移 x 的影响。

零磁场下磁流变阻尼单元的阻尼力为：

$$F = f_0 + C_\tau \dot{x} \quad (2.35)$$

C_τ 的计算公式如下：

$$C_\tau = \frac{F_{600} - F_{400}}{(600 - 400) / 60} \quad (2.36)$$

式中， F_{400} 和 F_{600} 分别为压缩速度 $v=400\text{mm/min}$ 和 $v=600\text{mm/min}$ 的磁流变阻尼单元在零磁场下产生的阻尼力，两者的具体数值如表 2-7 所示。

表 2-8 为不同压缩位移 x 下 C_τ 的计算结果。

用Matlab将得到的 C_τ 数据与相应的 x 进行拟合，得到 $C_\tau=0.03018\text{N}\cdot\text{s/mm}$ 。

将 $C_\tau=0.03018\text{N}\cdot\text{s/mm}$ 代入式（2.35）求出 f_0 ， f_0 的计算结果如表 2-9 所示。

在Matlab中，用多项式拟合方法对 f_0 及其对应的 x 进行拟合，得到 f_0 关于 x 的表达式：

$$f_0(x) = 5.446x^3 - 3.253x^2 + 0.3958x + 14.23 \quad (2.37)$$

由于磁流变液在压缩速度 $v=400\text{mm/min}$ 后屈服，且当磁流变液屈服时，库仑力 F_c 受压缩速度 v 的影响可以忽略不计。因此，本文选择磁流变阻尼单元对压缩速度 $v=600\text{mm/min}$ 下的 F_c 进行分析。将电子万能试验机的压缩速度设为 $v=600\text{mm/min}$ ，将电流 I 分别设为 0A、0.4A、0.8A、1.2A、1.6A、2A进行实验，

实验结果如表 2-10 所示。

表 2-7 零磁场下不同压缩速度对应的阻尼力

x (mm)	-1	-0.6	-0.2	0.2	0.6	1
$v=400$	5.166N	12.146N	13.962N	14.583N	14.671N	16.974N
$v=600$	5.404N	12.073N	14.120N	14.605N	14.785N	17.119N

表 2-8 不同压缩位移对应的 C_τ 值

x (mm)	-1	-0.6	-0.2	0.2	0.6	1
C_τ	0.072	-0.020	0.047	0.007	0.030	0.043

表 2-9 不同压缩位移对应的 f_0 值

x	-1	-0.6	-0.2	0.2	0.6	1
f_0 (N)	5.102	11.771	13.818	14.304	14.473	16.819

表 2-10 磁流变阻尼单元在不同电流下的阻尼力值

x (mm)	-1	-0.6	-0.2	0.2	0.6	1
$I=0$ (A)	5.404N	12.573N	14.320N	14.575N	14.385N	17.118N
$I=0.4$	5.325N	18.819N	21.586N	23.063N	23.810N	27.974N
$I=0.8$	5.868N	34.883N	41.189N	42.992N	46.024N	53.040N
$I=1.2$	5.436N	52.039N	58.576N	62.916N	63.326N	68.092N
$I=1.6$	5.802N	79.932N	91.076N	96.321N	101.837N	114.218N
$I=2$ (A)	6.930N	96.882N	119.480N	126.028N	133.753N	150.077N

由于库仑力 F_C 是包含电流 I 和压缩位移 x 的表达式，基于此，本文采用多项式拟合的方法拟合库仑力 F_C 与电流 I 和压缩位移 x 的关系，库仑力 F_C 可表示为：

$$F_C = a_1 I^3 + a_2 I^2 + a_3 I \quad (2.38)$$

将表 2-10 中的数据导入Matlab，在Matlab中对公式（2.38）中的系数 a_i 进行拟合，得到不同 x 点处的系数 a_i 值。在Matlab中拟合不同 x 对应的 a_i 值，得到 a_i 关于 x 的多项式：

$$a_1 = 17.12x^4 - 7.536x^3 - 12.76x^2 + 7.792x - 4.295 \quad (2.39)$$

$$a_2 = -50.17x^4 + 30.48x^3 + 30.69x^2 - 19.51x + 30.93 \quad (2.40)$$

$$a_3 = 12.59x^4 - 2.098x^3 - 11.89x^2 + 12.61x + 9.647 \quad (2.41)$$

如图 2-24 所示, 将实验参数代入拟合得到的阻尼力模型, 得到阻尼力拟合结果。将阻尼力拟合结果与实验结果进行比较, 可以看出, 在不同实验参数下, 阻尼力拟合结果与实验结果接近, 相对误差 δ 小于 6.5%, 表明拟合精度较高。

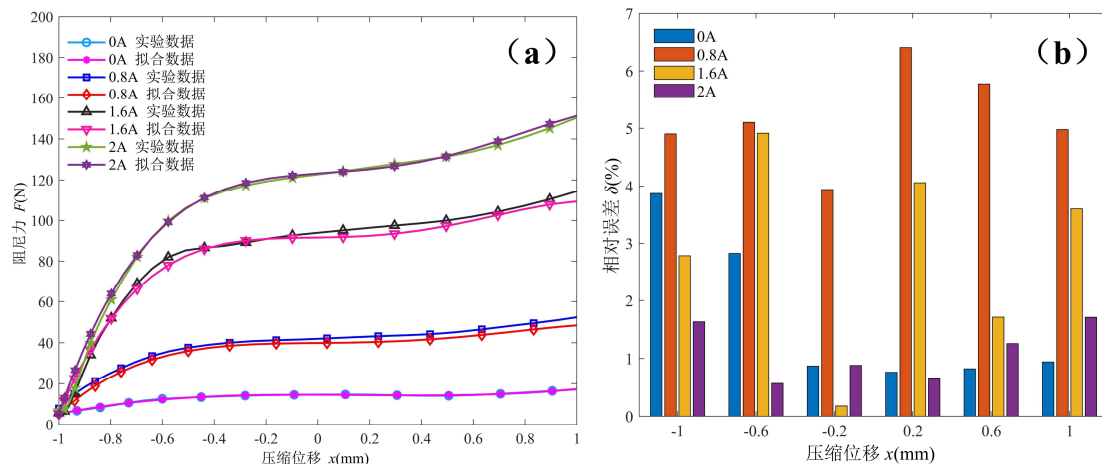


图 2-24 不同电流的拟合结果: (a) 拟合结果曲线; (b) 拟合相对误差

在此基础上, 通过设置新的实验参数, 验证了阻尼力的预测效果。实验过程中, 压缩速度设为 $v=800mm/min$, 电流设为 0.6A、1A、1.4A、1.8A, 将阻尼力的实验测试结果与预测结果进行对比, 如图 2-25 所示。可以看出, 阻尼力预测结果与实验结果接近, 相对误差 δ 小于 7.5%, 表明所建立的阻尼力模型可以预测不同工况下的阻尼力。

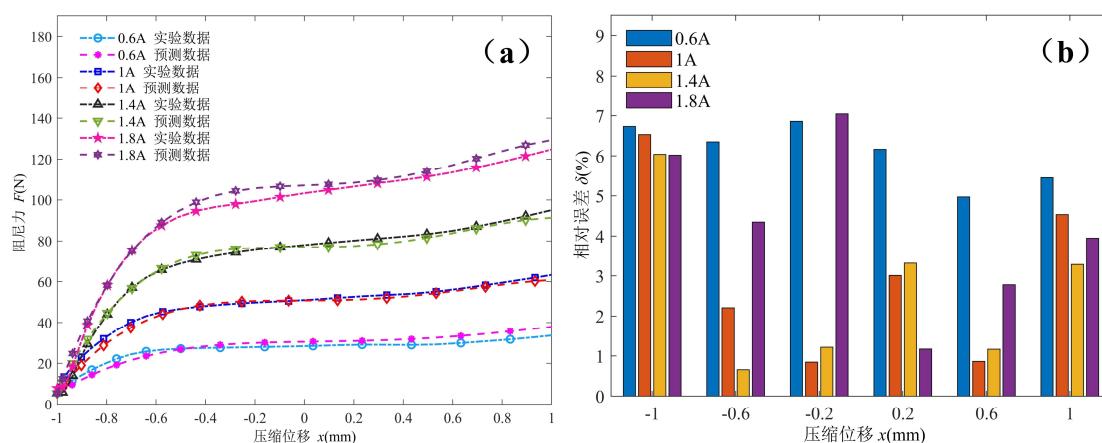


图 2-25 不同工况下的预测结果: (a) 预测结果曲线; (b) 预测的相对误差

2.5 本章小结

本章基于所提出的磁流变阻尼单元, 成功研制了磁流变阻尼磨削装置样机。

对磨削装置中的磁流变阻尼单元进行磁场特性和力学性能分析,验证了所设计装置的正确性、有效性;基于磁流变阻尼单元的力学性能实验,揭示了磁流变阻尼单元在不同电流、压缩速度和压缩位移下的阻尼力输出特性。通过对磁流变阻尼力的实验数据进行拟合,建立了磁流变阻尼单元的阻尼力模型,实验结果表明,所建立的阻尼力模型能够预测不同工况下的阻尼力,相对误差小于 7.5%,本文建立的磁流变阻尼磨削装置的阻尼力模型能够为机器人磨削的振动控制设计提供装置与理论基础。

第三章 机器人磨削耦合系统振动特性分析

3.1 引言

如图 3-1 所示, 本文所研究的机器人磨削耦合系统是由机器人、磁流变阻尼磨削装置及工件组成的动力学耦合系统, 系统振动与磨削力之间存在耦合关系。本章在上一章建立的阻尼力模型的基础上对机器人磨削耦合系统的振动特性展开分析。首先搭建了机器人磨削耦合系统的动力学模型以及工件等效刚度约束模型, 在此基础上, 深入分析了机器人磨削耦合系统的振动特性, 并研究在此耦合作用下工件的磨削力波动特性, 从而揭示出机器人磨削耦合系统内部的动态耦合行为, 为实现机器人磨削过程中的力控以及工件的振动控制提供坚实的理论支撑。

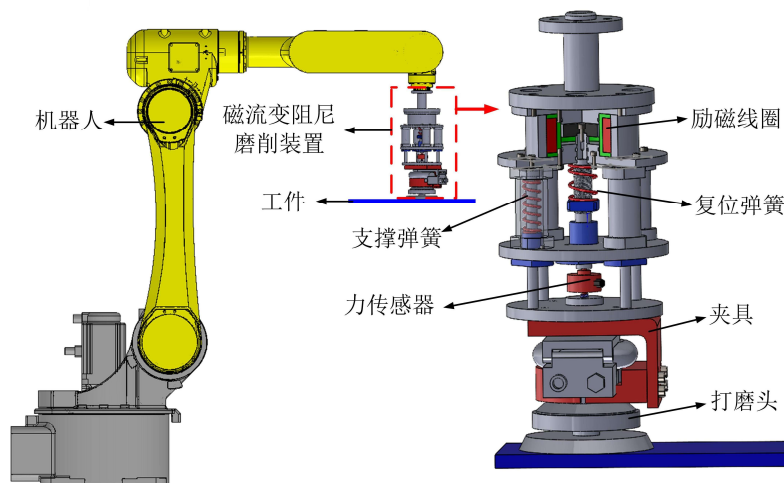
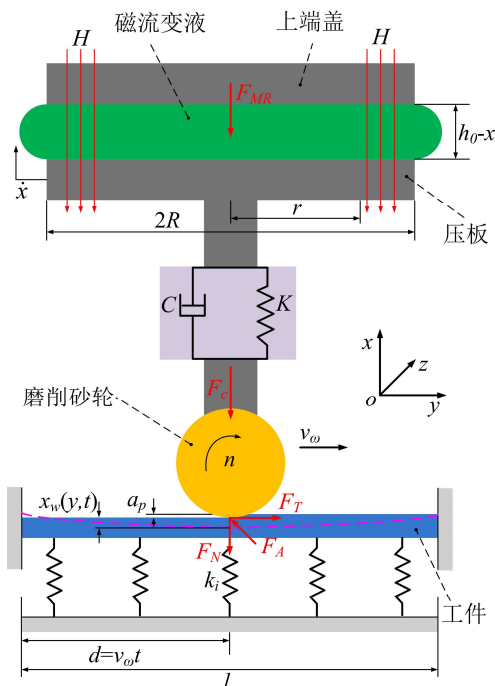


图 3-1 机器人磨削耦合系统构成

3.2 机器人磨削耦合系统动力学模型

如图 3-2 所示, 机器人磨削耦合系统是一种多维耦合系统, 工件振动与磨削力之间存在着耦合关系, 工件振动对磨削力起到扰动的作用, 磨削力的波动对工件振动同时具有激励作用, 因此, 磨削力的恒定是实现磨削质量的关键。在磨削过程中, 机器人用来控制磨削轨迹, 磁流变阻尼磨削装置来抑制磨削力的波动, 以实现力/位解耦。本节根据工件与磁流变阻尼磨削装置之间的耦合原理, 构建



3.2.1 磁流变阻尼磨削装置动力学模型

为分析工件振动与机器人磨削接触力之间的动态耦合关系,本文建立机器人磨削耦合系统的动力学模型。考虑到磨削力与工件之间的交互作用,并且机器人本身的刚度相较于装置较大,磨削过程中对工件产生的影响可忽略不计,本文将机器人考虑为刚性系统。图 3-2 中, C 为装置连接之间的阻尼系数, K 是复位弹簧的刚度, M 是手持式打磨机和夹具的质量之和, $x_w(y, t)$ 是工件振动响应位移。

对机器人磨削耦合系统受力分析, 由牛顿第二定律, 受力分析得:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + Kx = f(y, t) - F_{MR} \quad (3.1)$$

将磁流变阻尼磨削装置系统的动力学模型通过空间状态方程表示。设置磨削装置末端的位移 x 、速度 $\dot{x}$ 为状态变量,输入为工件波动力 $f(y,t)$ 和磨削装置产生的阻尼力 F ,输出为磨削装置末端的响应位移 x 、响应速度 $\dot{x}$ 和响应加速度 $\ddot{x}$ 。

$$X=[x \ \dot{x} \ \ddot{x}] \quad (3.2)$$

磁流变阻尼磨削装置系统的动力学模型表示为:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (3.3)$$

状态矩阵A，输入矩阵B，输出矩阵C，直接传输矩阵D分别表示为：

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K}{M} & -\frac{C}{M} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & -\frac{1}{M} \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -\frac{K}{M} & -\frac{C}{M} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & -\frac{1}{M} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.4)$$

为方便对磁流变阻尼磨削装置系统的振动特性进行分析，对阻尼力 F 进行等效化处理^[56]，将其等效成一个等效粘滞阻尼力 $C_e\dot{x}$ 和一个等效线性刚度的弹簧产生的压缩力 $K_e x$ 。

$$F = C_e\dot{x} + K_e x \quad (3.5)$$

阻尼力 F 的伪静力学表达式在第二章中通过实验数据拟合得出，利用上章实验得出的阻尼力表达式在Matlab中进行仿真，得到磁流变阻尼单元在一个位移周期产生的阻尼力大小，如图 3-3 所示。

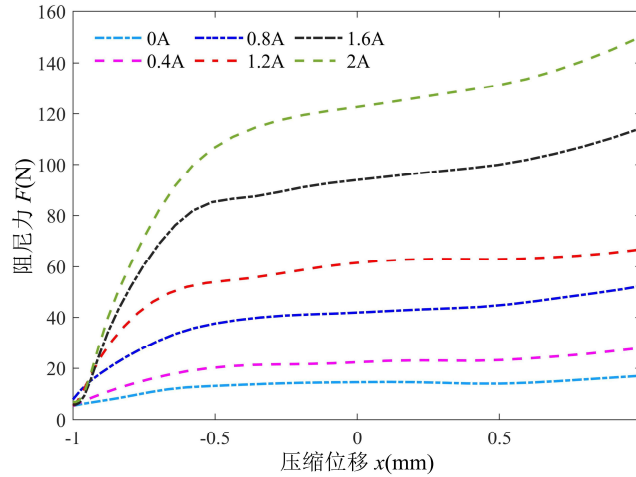


图 3-3 磁流变阻尼单元在一个行程产生的阻尼力

等效阻尼系数 C_e 表示为：

$$\begin{cases} C_e = \frac{W}{\sum_T \dot{x}_i^2 \Delta t} \\ W = \int_0^T F \cdot \dot{x}_i dt \end{cases} \quad (3.6)$$

式中 W 为磁流变阻尼单元在一个行程中消耗的能量，其可以通过阻尼力-位移曲线的面积来表示， $\dot{x}$ 为磁流变液屈服时的压缩速度。

等效刚度系数 K_e 为：

$$K_e = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3.7)$$

式中 $F_{\max}$ ， $F_{\min}$ 分别为磁流变阻尼单元在一个行程中阻尼力的最大值和最小值， $x_{\max}$ ， $x_{\min}$ 为最大阻尼力 $F_{\max}$ 和最小阻尼力 $F_{\min}$ 对应的压缩位置。

表 3-1 不同电流对应的等效刚度系数和等效阻尼系数

I (A)	0A	0.4A	0.8A	1.2A	1.6A	2A
K_e (N/mm)	5.857	11.325	22.586	31.328	54.208	71.573
C_e (N.s/mm)	0.170	0.329	0.647	1.086	1.606	2.168

为分析磁流变阻尼磨削装置的振动特性提供理论条件，将表 3-1 中的数据通过Matlab进行拟合，得出等效刚度系数和等效阻尼系数关于电流的表达式：

$$\begin{cases} K_e = 11.84i^2 + 9.595i + 5.857 \\ C_e = 0.3284i^2 + 0.3534i + 0.2688 \end{cases} \quad (3.8)$$

3.2.2 工件动力学模型

根据机器人磨削耦合系统构成，结合工件磨削振动与磨削接触力之间的关系，如图 3-2 所示，搭建机器人磨削耦合系统动力学模型。为了表征工件对磨削力的扰动作用，本文采用梁构件来表征磨削工件，建立工件的弹性约束模型来表征其对磨削接触力的扰动影响，假设 $K(y)$ 是磨削位置 y 处的工件等效刚度，其随着磨削位置的变化而变化，其中磨削转速为 n ， $t=0$ s时，砂轮位于右端固定，砂轮以速度 v 沿着工件向左移动，初始端距离为 d 。

磨削位置处的磨削力表示为：

$$F_c = K(y)x_w(y,t) - F \quad (3.9)$$

式中， F_c 是磨削接触力； F 是磨削装置产生的阻尼力； $x_w(y,t)$ 是工件在磨削处的横向振动位移，磨削过程中的横向振动为本文的重点考虑对象。

如图 3-2 所示，磨削过程中某一点的磨削力在 X 方向， Y 方向， Z 方向的分解力为轴向磨削力 F_A ，切向磨削力 F_T ，法向磨削力 F_N 。梁构件上的集中作用力为轴

向磨削力，则作用在梁构件上的横向力为

$$f(y,t) = F_N \sigma(y - v_\omega t) \quad (3.10)$$

其中， v_ω 是磨削进给速度， $\sigma(y - v_\omega t)$ 为单位脉冲函数，由磨削方式指数表得出，磨削法向力是磨削切向力的1.5~3倍，其具体值大小主要与磨削颗粒和工件材料有关，这里取 $F_N = 2F_T$ 。

本文的磨削参数和条件借鉴参考文献^[57,58]，磨削力可以表示为

$$F_N = C_{Ft} a_{Pe}^{\alpha_0} v_S^{\beta_0} v_\omega^{\gamma_0} = 28282 a_{Pe}^{0.86} v_S^{-1.06} v_\omega^{0.44} \quad (3.11)$$

式中， C_{Ft} 为切削比例系数， a_{Pe} 为标准切削深度， v_S 为切削线速度。

梁构件的横向位移振动会引起磨削深度波动，由动态模型耦合关系，法向磨削力表示为

$$F_N = 28282(a_{Pe} + x_w(y,t))^{0.86} v_S^{-1.06} v_\omega^{0.44} \quad (3.12)$$

广义力 F_i 在模态坐标下可以表示为

$$F_i(t) = \int_0^l f(y,t) Z_i(y) dy = F_i \int_0^l \Delta(y - v_\omega t) Z_i(y) dy = F_N Z_i(v_\omega t) \quad (3.13)$$

式中， $Z_i(\omega t)$ 是在 $y = v_\omega t$ 梁构件的第 i 阶振型函数

当梁构件两端固定，参考文献^[59]，得出工件的振型函数为

$$Z_i(x) = \cosh \lambda_i y - \cos \lambda_i y - \frac{\cosh \mu_i - \cos \mu_i}{\sinh \mu_i - \sin \mu_i} (\sinh \lambda_i y - \sin \lambda_i y) \quad (3.14)$$

已知 $\mu_i = \beta_i l$ ，则等截面梁的固有频率

$$\omega_i = \frac{\mu_i}{l^2} c = \lambda_i^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} = \left[\left(i + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{l} \right]^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (i=3,4,5\cdots) \quad (3.15)$$

式中， E 为梁构件的弹性模量； I 为梁构件的截面惯性矩； ρ 为梁构件密度， A 为梁构件的截面积

在磨削工况下，梁构件的广义坐标形式下的振动微分方程

$$M \ddot{q}_i + \omega_i^2 q_i = F_i = Z_i(v_\omega t) F_N \quad (i=1,2,3\cdots) \quad (3.16)$$

其中， q_i 和 M_i 分别为梁构件第 i 阶的模态坐标和模态质量。

$$M_i = \int_0^l \rho A Z_i^2(y) dy \quad (3.17)$$

由杜哈梅积分^[59,60]求得

$$q_i(t) = \frac{F_n}{M_i \omega_i} \int_0^t Z_i(v_\omega \delta) \sin[\omega_i(t - \delta)] d\delta + q_{i0} \cos \omega_i t + \frac{\dot{q}_{i0}}{\omega_i} \sin \omega_i t \quad (3.18)$$

式中， q_{i0} 和 $\dot{q}_{i0}$ 分别为广义坐标下的初始位移和速度。

当固有频率 ω_i 的边界条件给定，其对应的振型函数 $\psi_i(y)$ ，使用正则坐标 $q_i(t)$ 和振型叠加原理^[61,62]，得出梁的振动位移方程

$$\begin{aligned} x_w(y, t) &= \sum_{i=1}^n Z_i(y) q_i(t) \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{F_N Z_i(y)}{M_i \omega_i} \int_0^t Z_i(v_\omega \delta) \sin[\omega_i(t - \delta)] d\delta + q_{i0} \cos \omega_i t + \frac{\dot{q}_{i0}}{\omega_i} \sin \omega_i t \end{aligned} \quad (3.19)$$

由式（3.19）能够看出梁构件在磨削过程中的振动与法向磨削力存在着直接明显的耦合关系，通过进一步分析移动载荷下梁构件的等效刚度模型，为磨削力动态特性分析做准备。

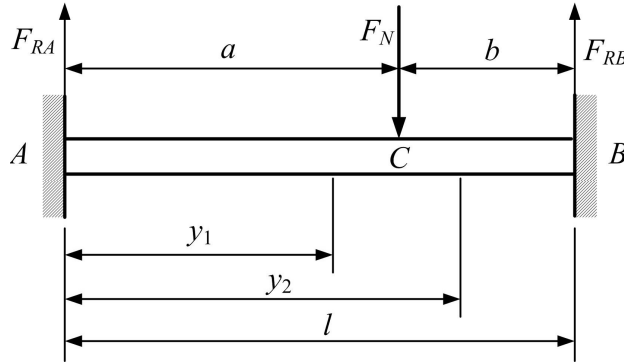


图 3-4 固定梁构件受力作用图

图 3-4 所示为梁构件磨削系统的弹性约束模型，工件的弹性振动对打磨机接触力的扰动效应表现为刚度可变的约束弹簧，磨削力随磨削位置的变化而变化。为求解工件在磨削位置 y 处的等效刚度，将梁构件的两端固定，对梁构件施加移动力载荷，梁构件的变形曲率方程可表示为

$$\frac{1}{\rho(y)} = \frac{M(y)}{EI} \quad (3.20)$$

由式（3.20），梁构件的挠度曲线微分方程可表示为

$$\frac{d^2 \gamma}{dy^2} = \frac{M(y)}{EI} \quad (3.21)$$

如图 3-4 所示，在磨削力 F_N 作用下，支撑体的反作用力表示为

$$\begin{cases} F_{RA} = \frac{F_N b^2}{l^2} (1 + \frac{2a}{l}) \\ F_{RB} = \frac{F_N a^2}{l^2} (1 + \frac{2a}{l}) \end{cases} \quad (3.22)$$

梁构件 AC 段和 BC 段的弯矩方程表示为

$$\begin{cases} M_1(y) = \frac{F_N b^2}{l^2} (1 + \frac{2a}{l}) y_1 \\ M_1(y) = \frac{F_N a^2}{l^2} (1 + \frac{2a}{l}) y_2 - F_N (y_2 - a) \end{cases} \quad (3.23)$$

式中, y_1 为梁构件 AC 段任意一处截面, y_2 为梁构件 BC 段任意截面。

对式(3.23)分别进行一次积分和二次积分, 梁构件 AC 、 BC 段的转角方程和挠度曲线方程表示为

$$\begin{cases} \alpha_1(y) = \frac{F_N b^2}{2EI l^2} (1 + \frac{2a}{l}) y_1^2 + \frac{C_1}{EI} \\ Y_1(y) = \frac{F_N b^2}{2EI l^2} (1 + \frac{2a}{l}) y_1^3 + \frac{C_1}{EI} y_1 + \frac{D_1}{EI} \end{cases} \quad (3.24)$$

$$\begin{cases} \alpha_2(x) = \frac{F_N a^2}{2EI l^2} (1 + \frac{2b}{l}) y_2^2 - \frac{F_N}{2EI} y_2^2 + \frac{F_N a y_2 + C_2}{EI} \\ Y_2(x) = \frac{F_N a^2}{6EI l^2} (1 + \frac{2b}{l}) y_2^3 - \frac{F_N}{6EI} y_2^3 + \frac{F_N a}{2EI} y_2^2 + \frac{C_2 y_2 + D_2}{EI} \end{cases} \quad (3.25)$$

由连续条件得

$$\begin{cases} \alpha_1(a) = \alpha_2(a) \\ Y_1(a) = Y_2(a) \end{cases} \quad (3.26)$$

由边界条件得

$$\begin{cases} \alpha_1(0) = \alpha_2(l) \\ Y_1(0) = Y_2(l) \end{cases} \quad (3.27)$$

将式(3.24)、式(3.25)分别代入式(3.26)、式(3.27)中, 得梁构件的挠度为

$$\gamma(y) = \begin{cases} -\varepsilon(3(\frac{y}{a})^2 - 2(\frac{y}{a})^3), 0 \leq y \leq a \\ -\varepsilon(3(\frac{l-y}{b})^2 - 2(\frac{l-y}{b})^3), a \leq y \leq l \end{cases} \quad (3.28)$$

式中 ε 为梁构件的最大挠度，在移动载荷下，梁构件在该位置处的最大挠度为

$$\varepsilon = \gamma(y)_{\max} = \frac{2F_N(a^3b^2)}{3EI(3a+b)^2} \quad (3.29)$$

由胡克定律，求出梁构件的等效刚度为

$$K(y) = \frac{F_N}{\gamma(y)_{\max}} = \frac{3EI(3a+b)^2}{2a^3b^2} = \frac{3EI(2y+l)^2}{2y^3(l-y)^2} \quad (3.30)$$

将式（3.30）、式（3.19）代入到式（3.9）中，得到磨削位置处的磨削力为

$$F_c = \frac{3EI(2y+l)^2}{2y^3(l-y)^2} \sum_{i=1}^n Z_i(y)q_i(t) - F \quad (3.31)$$

式中 $I=bh^3/12$ ，密度 $\rho=900\text{kg/m}^3$ ；弹性模量 $E=2 \times 10^9\text{pa}$ ；长度 $l=0.5\text{m}$ ；宽度 $b=0.2\text{m}$ ，高度 $h=0.008\text{m}$ 。

为方便分析研究梁构件在移动载荷下的等效刚度分布特性，选取磨削力作用在梁构件的起点和终点距离，即 $y=0.05 \sim 0.45\text{m}$ ，在Matlab软件中仿真出梁构件在移动载荷下的位移刚度曲线。如图 3-5 所示，梁构件的等效刚度在两端最大，越靠近中间越小，在中心点 $y=0.25\text{m}$ 处最小并关于此点对称，符合实际情况。

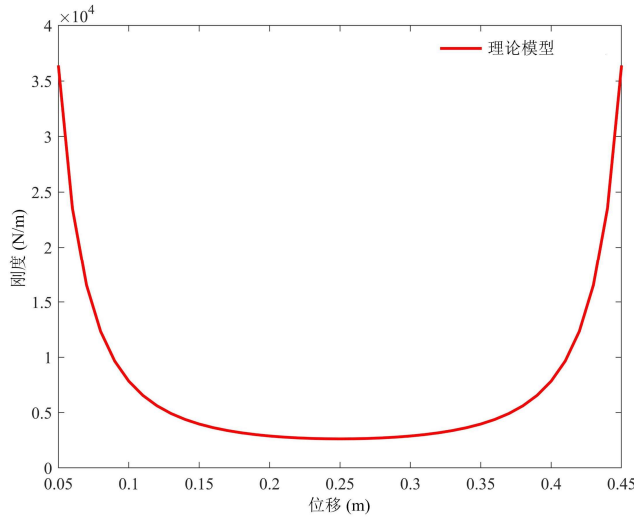


图 3-5 梁构件在不同位置处刚度

为进一步验证移动载荷作用下梁构件等效刚度分布特性，建立有限元仿真模型对工件刚度分布特性验证，将工件三维模型导入Ansys中，设置工件两端固定约束，添加工件的材质和属性，设置作用工件表面的载荷，仿真研究工件的变形结果，如图 3-6 所示。

梁构件等效刚度有限元仿真结果如图 3-7 所示，能够看出有限元仿真结果与

理论模型分析结果变化趋势一致，梁构件的等效刚度在中心点处最低，沿中心点向两端逐渐变大并关于中心点对称，由于梁构件在有限元中网格划分存在着差异以及两端固定约束的简化，导致仿真结果与理论结果在数值上会产生一些误差。

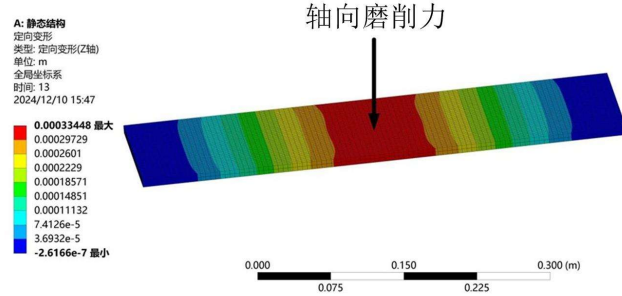


图 3-6 梁构件有限元仿真模型

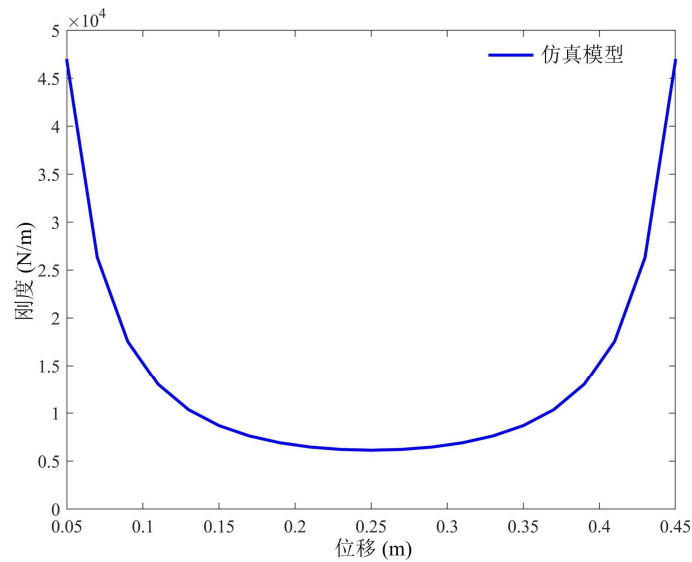


图 3-7 梁构件等效刚度

3.3 机器人磨削耦合系统振动特性

为了研究机器人磨削耦合系统的振动特性以及在振动耦合作用磨削力的波动特性，本节首先对磁流变阻尼磨削装置的振动传递特性展开研究，分析了不同系统参数对磨削装置振动传递率的影响；随后在Matlab/Simulink中搭建了工件磨削系统的仿真模型，分析工件振动与磨削力波动之间的耦合机理。

3.3.1 磁流变阻尼磨削装置系统振动传递特性

(1) 振动传递方程

本文将磁流变阻尼磨削装置系统看作为单自由度的弹簧-质量-阻尼系统，假

定磨削装置末端受到工件的磨削力波动为 $f(y,t) = F_0 \sin(\omega t)$ ，如图 3-8 所示。

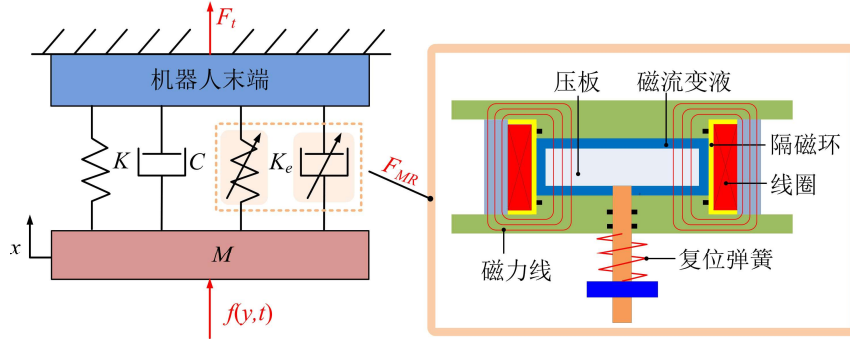


图 3-8 磁流变阻尼单元系统动力学模型

当系统处于被动控制下，磁流变阻尼磨削装置系统的动力学方程为：

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + (C_e + C) \frac{dx}{dt} + (K_e + K)x = f(y,t) = F_0 \sin(\omega t) \quad (3.32)$$

式中， F_0 是磨削装置末端受到的扰动力幅值， ω 是扰动频率。

公式 (3.32) 为非齐次二阶常系数线性常微分方程，其齐次解和通解为^[63]：

$$X = Ae^{-\zeta_e \omega_n t} \sin(\sqrt{1 - \zeta_e^2} \omega_n t + \varphi) + \frac{F_0 \sin(\omega t - \psi)}{\sqrt{(K_e + K - M\omega^2)^2 + [(C_e + C)\omega]^2}} \quad (3.33)$$

令强迫振动，磁流变阻尼磨削装置末端在扰动力作用下的位移响应：

$$X = \frac{F_0}{\sqrt{(K_e + K - M\omega^2)^2 + [(C_e + C)\omega]^2}} = \frac{F_0}{(K_e + K) \sqrt{(1 - \lambda_e^2)^2 + (2\zeta_e \lambda_e)^2}} \quad (3.34)$$

式中，频率比 $\lambda_e = \frac{\omega}{\omega_n}$ ，固有频率 $\omega_n = \sqrt{\frac{K_e + K}{M}}$ ，阻尼比 $\zeta_e = \frac{C_e + C}{2\sqrt{M(K_e + K)}}$ 。

扰动力传递到机器人末端为

$$(C_e + C) \frac{dx}{dt} + (K_e + K)x = F_t \quad (3.35)$$

式中， F_t 是响应幅值，同理，对公式 (3.32) 进行求解，可得

$$X = \frac{F_t}{\sqrt{(K_e + K)^2 + [(C_e + C)\omega]^2}} = \frac{F_t}{(K_e + K) \sqrt{1 + (2\zeta_e \lambda_e)^2}} \quad (3.36)$$

将公式 (3.36) 代入到公式 (3.34) 中，得磨削装置系统的力传递率为：

$$\begin{aligned}
\beta &= \frac{F_t}{F_0} = \frac{\sqrt{(K_e + K)^2 + [(C_e + C)\omega]^2}}{\sqrt{(K_e + K - M\omega^2)^2 + [(C_e + C)\omega]^2}} \\
&= \frac{\sqrt{1 + (2\zeta_e \lambda_e)^2}}{\sqrt{(1 - \lambda_e^2)^2 + (2\zeta_e \lambda_e)^2}}
\end{aligned} \tag{3.37}$$

(2) 磁流变阻尼磨削装置系统传递特性分析

为进一步分析磁流变阻尼磨削装置的动态性能, 本文对装置系统的幅频特性和振动传递率进行分析。如图 3-9、图 3-10 所示, 在幅值为 10N 的激励力的作用下, 磁流变阻尼磨削装置在不同刚度系数和阻尼比下的幅值响应。

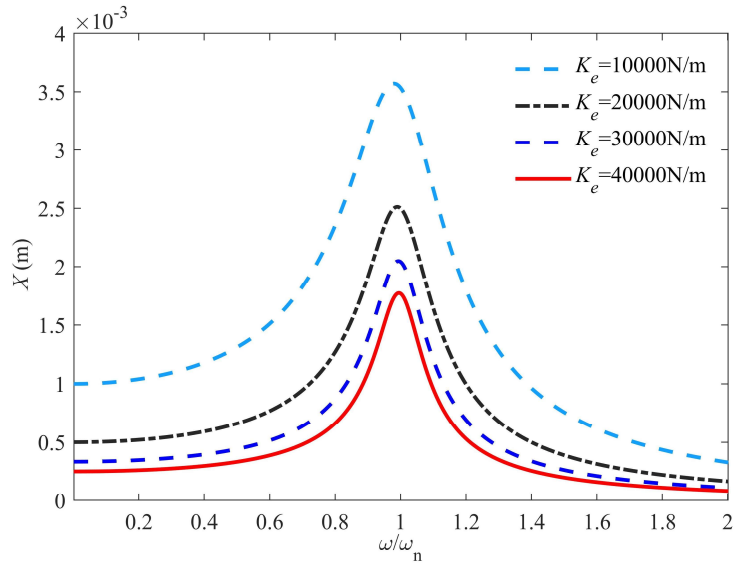


图 3-9 不同刚度下的幅频特性

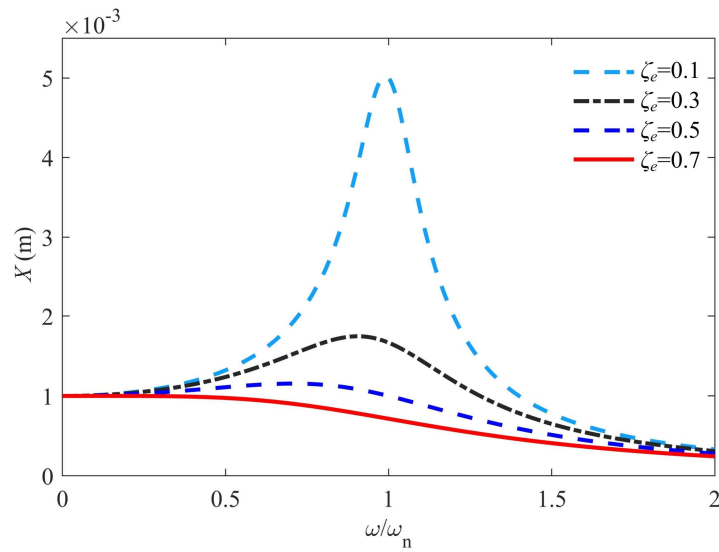


图 3-10 不同阻尼比下的幅频特性

从图 3-9 中能够看出, 频率比位于 1 处, 磁流变阻尼磨削装置系统达到共振,

响应幅值最大，随着刚度系数的增大，系统响应幅值会降低。从图 3-10 中能够看出，频率比位于 1 处，磁流变阻尼磨削装置系统达到共振，响应幅值最大，但随着阻尼比的增大，系统共振峰值会降低。

如图 3-11 所示为磁流变阻尼磨削装置在通入不同电流下的幅频特性曲线，在施加磁流变阻尼力的情况下，随着电流的增大，系统刚度和阻尼比均增大，系统的响应幅值和共振峰值均降低。

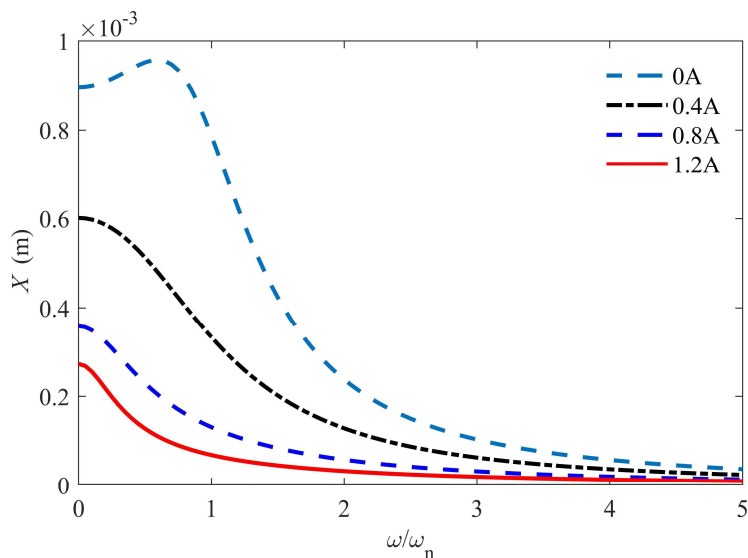


图 3-11 不同电流下的幅频特性

图 3-12、图 3-13 为不同刚度和阻尼比对磁流变阻尼磨削装置传递率的影响：从传递率曲线可以看出，当 $\omega/\omega_n=1$ ，即激振频率等于装置的固有频率，此时装置发生共振，传递系数到达峰值，传递系数的峰值随着阻尼比的增大而减小，因此在进行磨削作业时需避免激振频率在固有频率附近，以免产生共振对机器人和工件造成损坏。当 $\omega/\omega_n < \sqrt{2}$ 时，即激振频率小于系统的固有频率，位于共振区内，传递率 β 大于 1，此时系统没有起到抑振的作用，系统的传递率 β 会随着刚度的减小和阻尼比的增大而降低。当 $\omega/\omega_n > \sqrt{2}$ 时，激振频率大于系统的固有频率，位于共振区外，传递率 β 小于 1，系统起到抑振的作用，系统的传递率 β 会随着刚度增大和阻尼比的减小而增大。

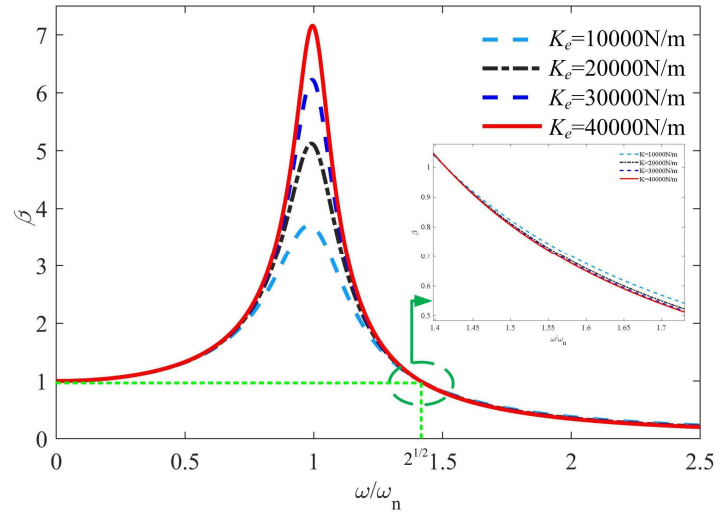


图 3-12 不同刚度下传递率

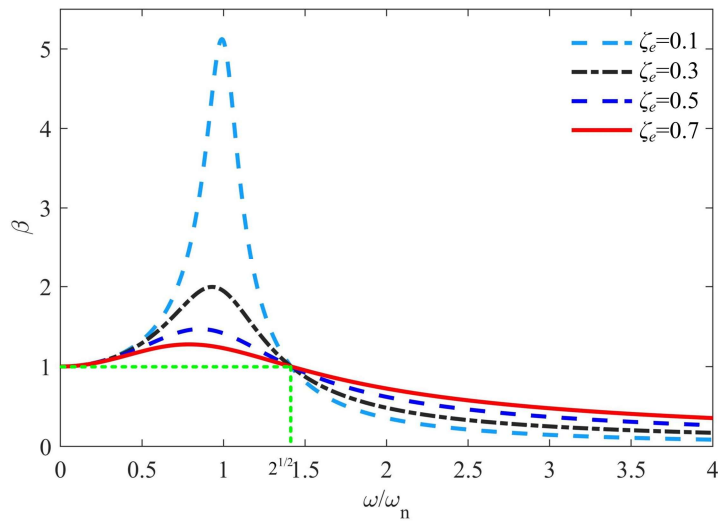


图 3-13 不同阻尼比下传递率

图 3-14 为磁流变阻尼磨削装置通入不同电流下的传递率，从图中可以看出当 $\omega/\omega_n < \sqrt{2}$ 时，处于共振区内，力传递率 β 的值大于 1，没有起到抑振作用，并且力传递率 β 的共振峰值随着电流的增加而降低。当 $\omega/\omega_n > \sqrt{2}$ 时，位于共振区外，力传递率 β 的值小于 1，具有抑振效果，并且力传递率 β 随电流增大而增大。因此，只有当激励频率大于固有频率的 $\sqrt{2}$ 倍时，装置才起到抑振作用，并且增大电流促使装置阻尼比增大，能够抑制装置的共振峰值。电流增大阻尼系数也会变大会导致系统响应的带宽变宽，这意味着传递率在较宽的频率范围内保持较低水平，这有助于减少在非共振频率下的振动传递。

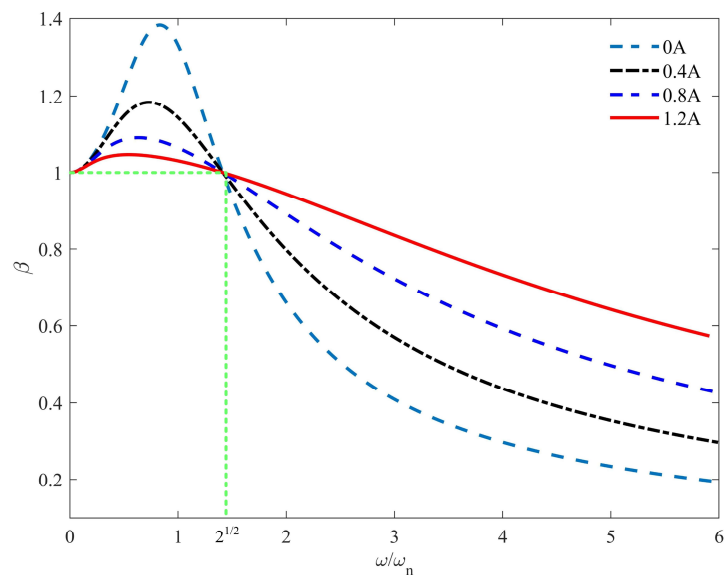


图 3-14 不同电流下的传递率

在机器人磨削作业过程中，需避免机器人磨削时的激励频率处于共振区内。磨削装置在工件上移动磨削时，工件的刚度随着磨削的改变而发生变化，此时，激励的频率也会发生变化，改变电流使装置的阻尼比发生变化，在共振区（ $\omega/\omega_n < \sqrt{2}$ ）可以降低传递率的共振峰值，在非共振区同时可以通过电流的自适应控制来优化整体的振动效果。

3.3.2 工件磨削系统振动耦合特性

为研究工件磨削过程的振动特性以及振动耦合下磨削力的波动，如图 3-15 所示，在Matlab搭建构件与磁流变阻尼磨削装置的动力学仿真模型，主要包括工件振动位移模块、工件等效刚度模块、磨削接触力模块。仿真中磨削接触力设置为 10N，仿真相关参数如表 3-2 所示。

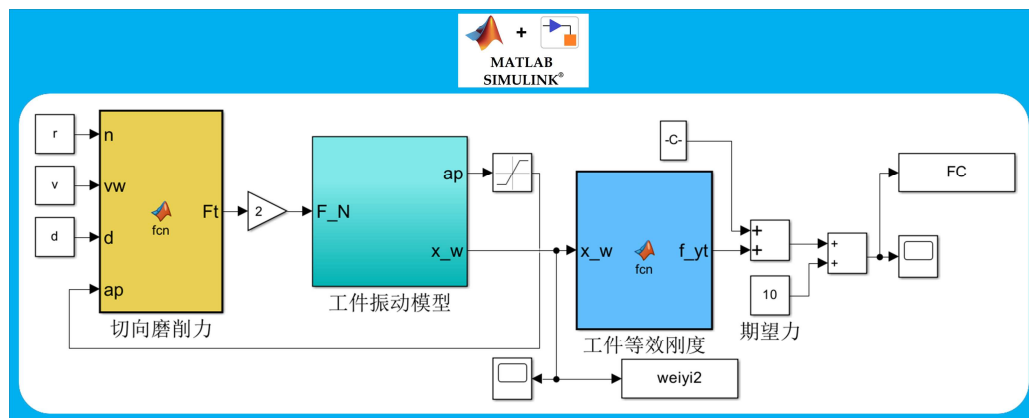


图 3-15 工件磨削系统动力学仿真模型

表 3-2 仿真模型参数

参数	数值
砂轮直径 d	0.35m
砂轮转速 n	12000r/min
切削深度 a_{p0}	0.05mm
磨削进给速度 v_w	0.05m/s
梁构件长度 l	0.5m
梁构件宽度 b	0.2m
梁构件厚度 h	0.008m
期望力 F_e	10N

如图 3-16 所示为不同厚度工件磨削振动响应，能够看出，在磨削过程中工件随磨削位置的变化具有明显的时变特性，在工件中心位置振幅最大，对不同厚度工件的振动特性进行分析，工件越薄，振动幅值越大。

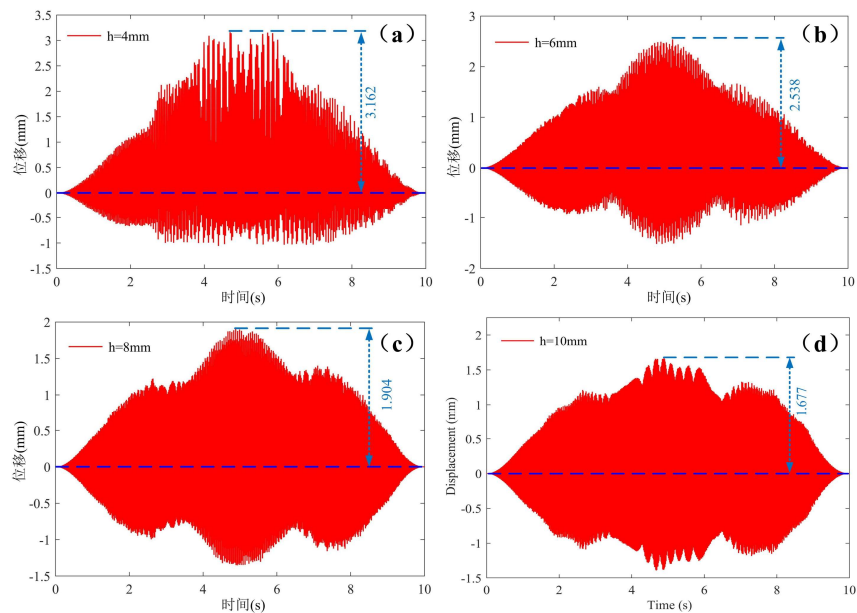


图 3-16 不同厚度的工件磨削振动响应：（a）工件厚度 4mm；（b）工件厚度 6mm；
（c）工件厚度 8mm；（d）工件厚度 10mm

如图 3-17 所示为不同厚度工件在振动耦合下的磨削力波动，能够看出工件在磨削过程中磨削力存在明显波动，在工件中间位置的磨削接触力振幅最大，间接说明此处耦合作用最强。

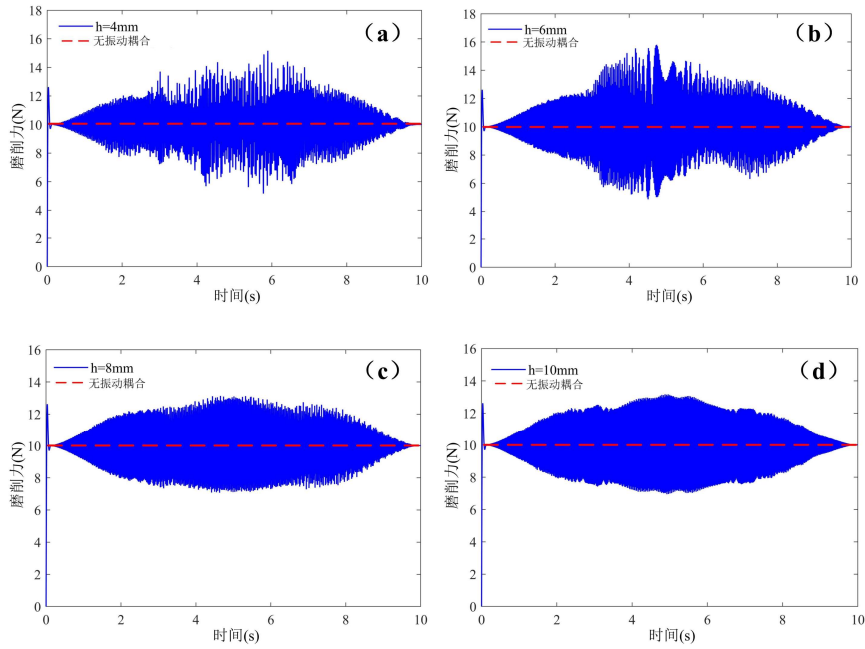


图 3-17 不同厚度工件的磨削接触力：（a）工件厚度 4mm；（b）工件厚度 6mm；（c）工件厚度 8mm；（d）工件厚度 10mm

3.4 本章小结

本章根据机器人磨削耦合系统构成，构建了机器人磨削耦合系统的动力学模型，在此基础上建立了工件等效刚度约束模型，指出了工件振动位移与磨削力之间的耦合关系；研究了磁流变阻尼磨削装置的振动传递特性，分析了工件磨削系统的振动特性以及在工件振动耦合作用下的磨削力波动特性，揭示了工件振动与磨削力之间的耦合机理，为后续搭建控制策略并验证提供了理论基础。

第四章 基于模糊PID的机器人磨削系统振动控制策略

4.1 引言

在第三章的研究结果显示，机器人在磨削过程中工件与磨削装置之间存在着动态实时交互的作用，在磨削力的作用下工件会发生较为强烈的振动，工件振动进一步影响到磨削力产生波动。本章在工件振动与磨削力动态耦合的基础上，设计了机器人磨削系统的模糊PID控制器，实现机器人磨削的磨削力控制以及工件的振动抑制，本章设计的控制策略的框图如图 4-1 所示。

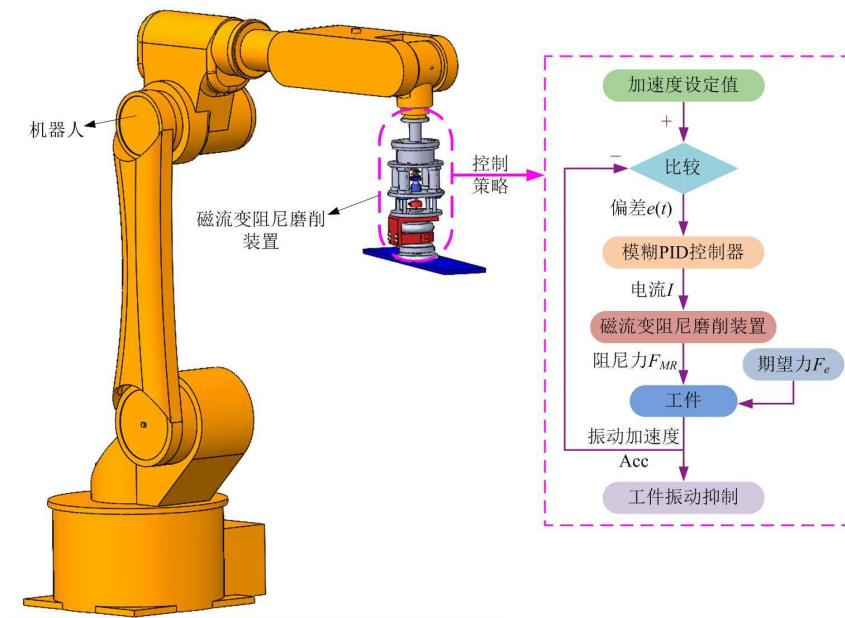


图 4-1 控制策略框图

4.2 振动控制策略设计

机器人在磨削过程中，磨削装置负责实现工件的振动控制，机器人负责磨削轨迹的控制。当机器人沿着磨削轨迹进行移动作业时，由于工件的振动响应是时变、非线性的，并考虑到磁流变液存在的迟滞效应，因此，需设计出合理的控制器配合磁流变阻尼磨削装置来满足机器人磨削的加工需求。本文将模糊逻辑推理与PID控制相结合，设计了基于模糊PID的机器人磨削系统振动控制策略，用来实现磨削过程中工件的振动控制。

4.2.1 模糊PID原理

尽管传统PID控制在工业场景^[64]中凭借结构简单、鲁棒性强等优势被广泛应用,但其固定参数特性难以适应机器人磨削过程中的动态时变工况——磨削负载波动、工件材料特性变化等复杂因素会显著改变系统动态特性,导致固定参数的PID控制器易出现超调、振荡或稳态误差。因此,本文引入基于模糊PID的机器人磨削系统振动控制策略,通过将模糊逻辑推理与PID控制相结合,构建以振动加速度误差 e 及其变化率 e_c 为输入、以 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 为输出的自适应调节机制,如图 4-2 所示,可以实现控制器参数对磨削工况的实时动态跟踪。

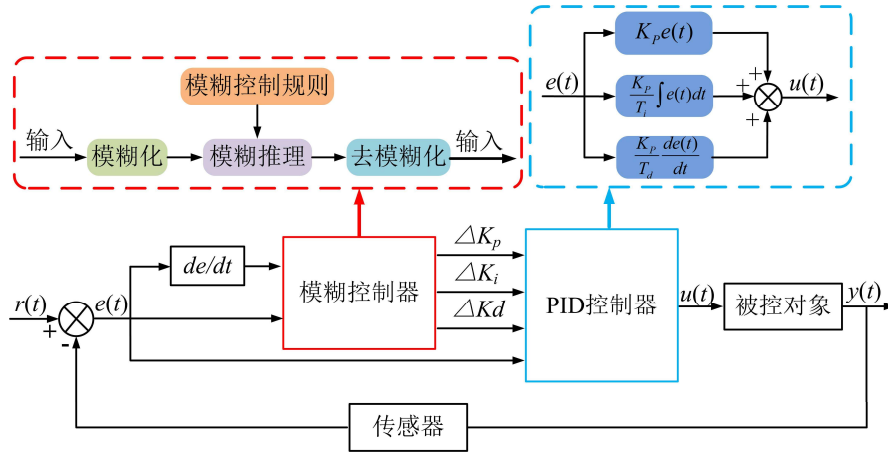


图 4-2 模糊PID控制系统结构框图

PID控制器作为一种线性控制器^[65],其控制规律如下:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.1)$$

式中, $u(t)$ 为输出控制量, K_p 为比例增益系数, K_i 为积分增益系数, K_d 为微分增益系数, $e(t)$ 为偏差量。通过对模糊控制器进行设计来调整PID控制器中的系数 K_p 、 K_i 和 K_d 。模糊控制一般包含四个组成部分,即模糊化,模糊控制规则设定、模糊推理以及去模糊化,最后,输出PID的控制调节参数 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 。

$$\begin{cases} K_e = \frac{2 \times 3}{b_e - a_e}, K_{e_c} = \frac{2 \times 3}{b_{e_c} - a_{e_c}} \\ K_{\Delta K_p} = \frac{2 \times 3}{b_{\Delta K_p} - a_{\Delta K_p}}, K_{\Delta K_i} = \frac{2 \times 3}{b_{\Delta K_i} - a_{\Delta K_i}}, K_{\Delta K_d} = \frac{2 \times 3}{b_{\Delta K_d} - a_{\Delta K_d}} \end{cases} \quad (4.2)$$

模糊PID控制器的控制流程:获取系统误差信号 e 和误差变化率 e_c ,选取 e 、 e_c 、

ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的变化范围分别为 $[a_e, b_e]$ 、 $[a_{e_c}, b_{e_c}]$ 、 $[a_{\Delta K_p}, b_{\Delta K_p}]$ 、 $[a_{\Delta K_i}, b_{\Delta K_i}]$ 、 $[a_{\Delta K_d}, b_{\Delta K_d}]$ ，设定论域的变化范围为 $[-3, 3]$ ，量化因子的计算如式(4.2)所示。

将模糊子集划分为[负大，负中，负小，零，正小，正中，正大]，记为[NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB]，模糊子集均选用三角隶属函数。表 4-1、表 4-2 以及表 4-3 为设计的模糊推理系统规则表。

图 4-3 所示为本文设计的基于模糊PID的机器人磨削系统振动控制框图，图中法向切削力作用在工件上，工件产生振动经过工件刚度模型转化为磨削接触力，磨削接触力与装置阻尼力产生的误差促使工件产生振动，模糊PID控制器将工件振动加速度误差信号通过计算转化为电流信号传入到磁流变阻尼磨削装置中产生相应的阻尼力来消除误差。

表 4-1 ΔK_p 模糊规则表

ΔK_p		e						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
e_c	NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZE
	NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
	NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NM
	ZE	PM	PS	PS	ZE	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
	PM	ZE	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	ZE	NS	NS	NM	NM	NB	NB

表 4-2 ΔK_i 模糊规则表

ΔK_i	e						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
e_c	NB	NB	NB	NM	NM	ZE	ZE
	NM	NB	NB	NM	NS	ZE	ZE
	NS	NM	NM	NS	ZE	PS	PS
	ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PM
	PS	NS	NS	ZE	PS	PM	PM
	PM	ZE	ZE	PS	PM	PB	PB
	PB	ZE	ZE	PS	PM	PB	PB

表 4-3 ΔK_d 模糊规则表

ΔK_d	e						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
e_c	NB	PS	PS	ZE	ZE	ZE	PB
	NM	NS	NS	NS	ZE	NS	PM
	NS	NB	NB	NM	NS	PS	PM
	ZE	NB	NM	NM	NS	PS	PM
	PS	NB	NM	NS	NS	PS	PS
	PM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
	PB	PS	ZE	ZE	ZE	PB	PB

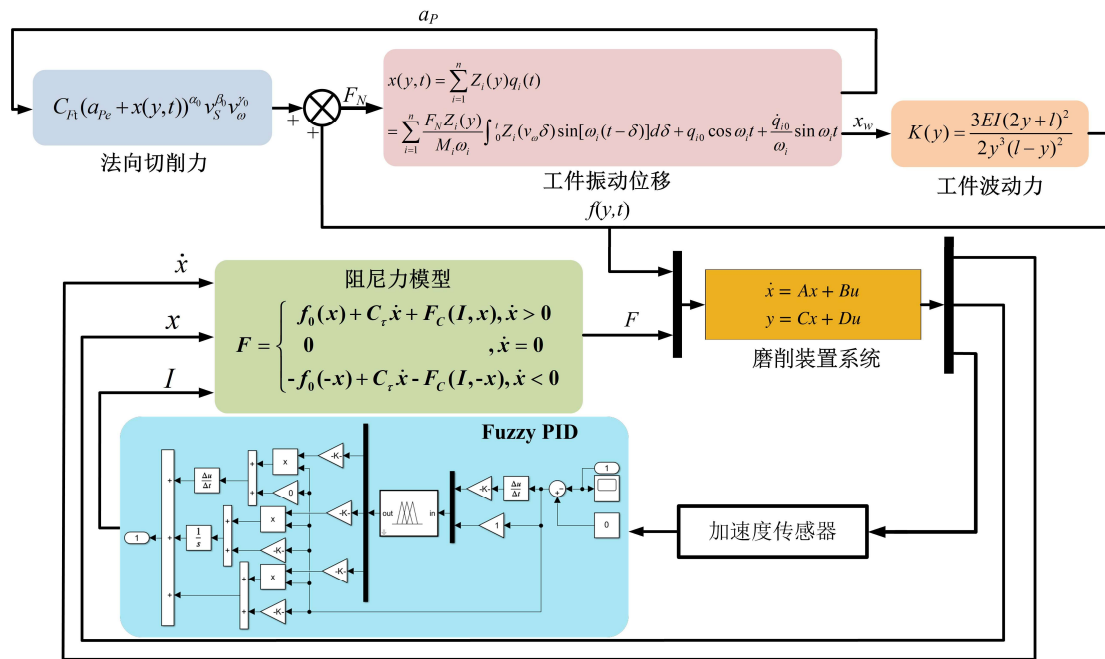


图 4-3 磨削振动控制原理图

4.2.2 控制器设计

如图 4-4 所示，根据隶属函数和模糊规则在 Matlab 中调用模糊控制工具箱来设计模糊控制器，得到 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 输出曲面如图 4-5 所示，曲面呈现连续、无明显突变或锯齿状波动，相邻规则区域的输出值过渡平滑，避免了较小的超调量和振荡风险，适合机器人稳定磨削，反映模糊规则库设计的合理性。

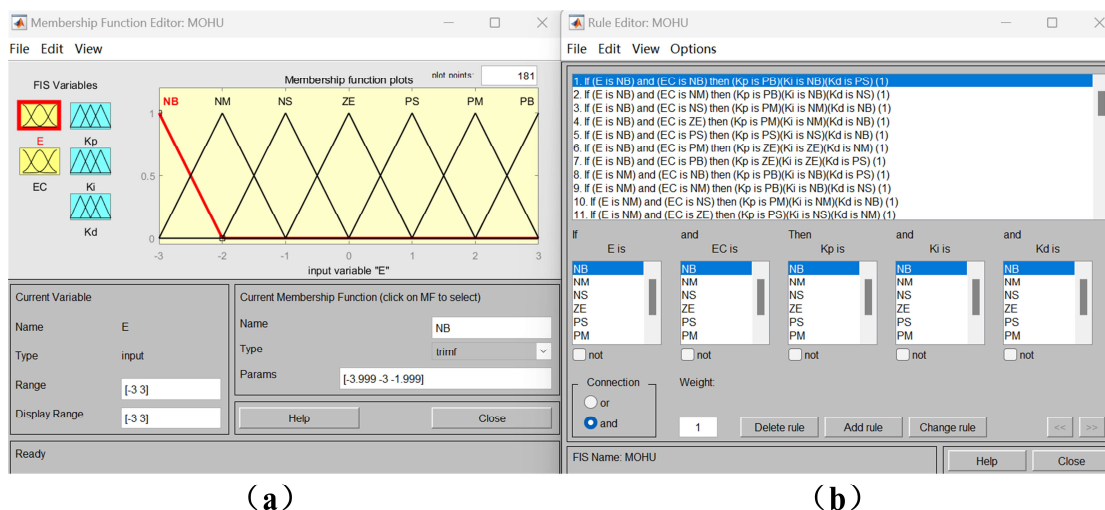
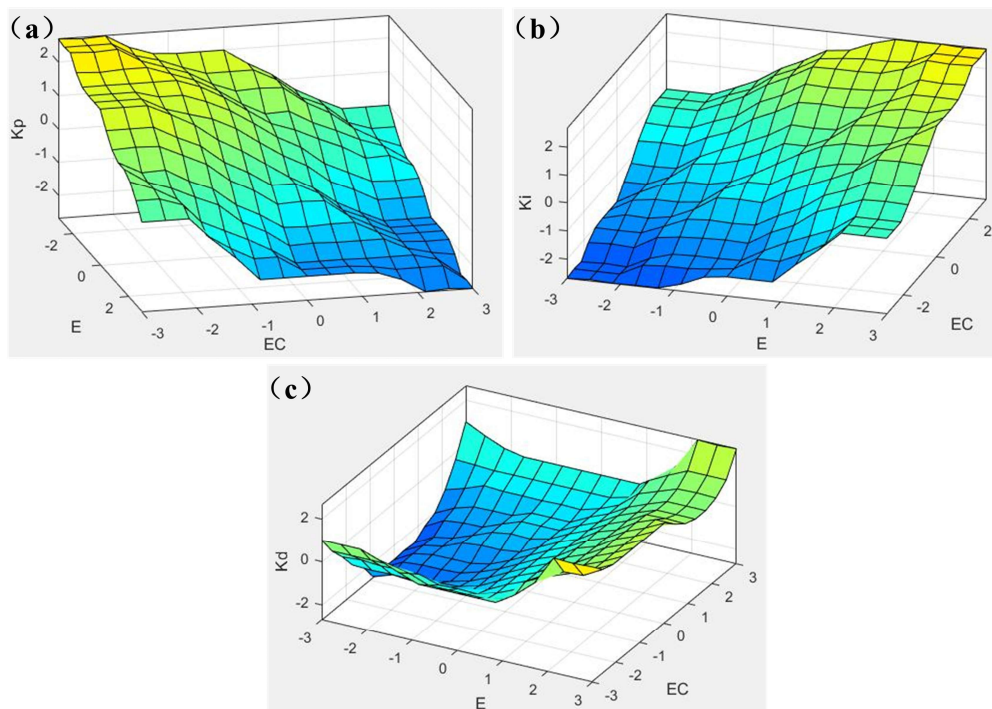


图 4-4 模糊规则设定：（a）模糊隶属函数图；（b）模糊规则图

图 4-5 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 在模糊论域上的三维网格图：（a） ΔK_p 的模糊论域三维网格；（b） ΔK_i 的模糊论域三维网格；（c） ΔK_d 的模糊论域三维网格

为分析模糊PID控制器的控制效果，利用Matlab/Simulink搭建了机器人磨削系统的仿真控制模型，如图 4-6 所示。在Matlab中调Fuzzy的命令，将设置好的隶属函数与模糊规则的.fis文件导入模糊PID控制器中进行仿真。

本文选取材质为聚丙烯的PP塑料工件作为机器人磨削的工件，具体仿真参数如表 4-4 所示。

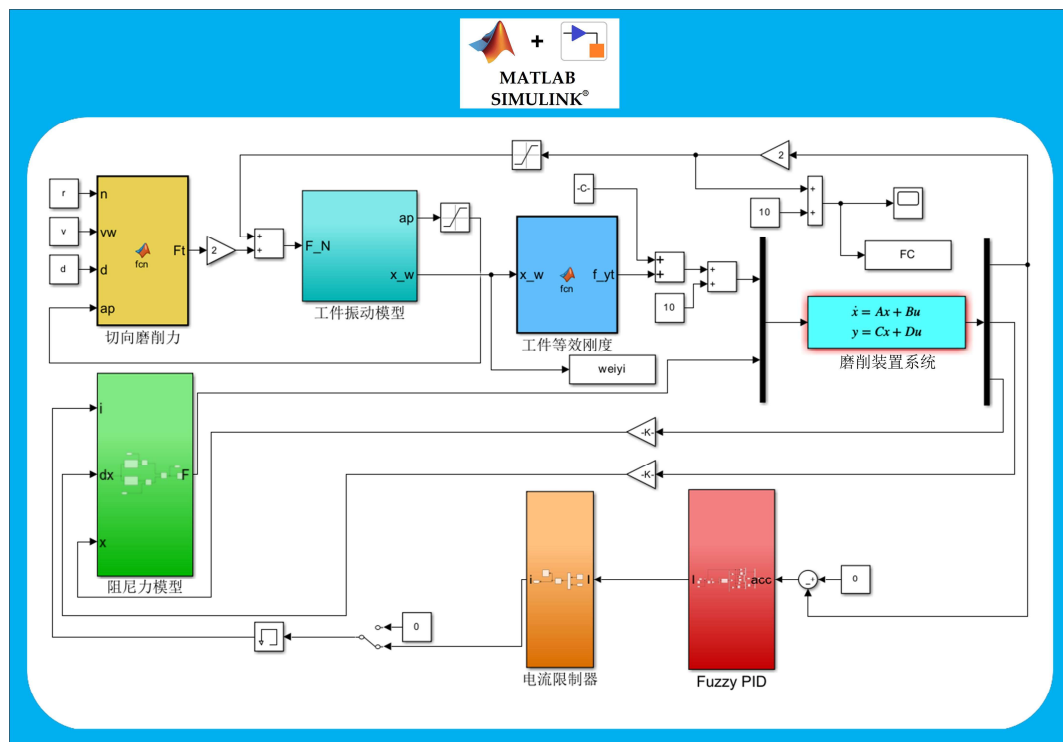


图 4-6 机器人磨削系统控制仿真模型

表 4-4 工件仿真模型参数

参数	数值
长度 l	0.5m
宽度 b	0.2m
厚度 h	0.008m
杨氏模量 E	2GPa
密度 ρ	900kg/m ³
泊松比 μ	0.4203

4.3 性能仿真及结果分析

本文对机器人磨削PP塑料工件展开主被动控制研究，主动控制方面，在磁流变阻尼磨削装置的基础上施加模糊PID自适应控制；被动控制则仅依靠磨削装置对工件进行磨削。为探究不同磨削参数下机器人磨削主被动控制的差异，本文采用控制变量法，分别针对打磨机的砂轮转速、磨削进给速度以及工件厚度，展开主被动控制的对比分析。

4.3.1 磨削力控制

如图 4-7 所示, 在不同砂轮转速下, 对磨削力进行主被动控制对比, 设置磨削进给速度 $v_s=10\text{mm/s}$, 工件厚度 $h=8\text{mm}$, 打磨机砂轮转速分别为 $n=3000\text{r/min}$ 、 $n=6000\text{r/min}$ 、 $n=9000\text{r/min}$ 和 $n=12000\text{r/min}$ 。从图中可以看出, 相较于被动控制, 施加模糊PID自适应控制能够有效抑制磨削力的波动并维持磨削力的稳定输出。

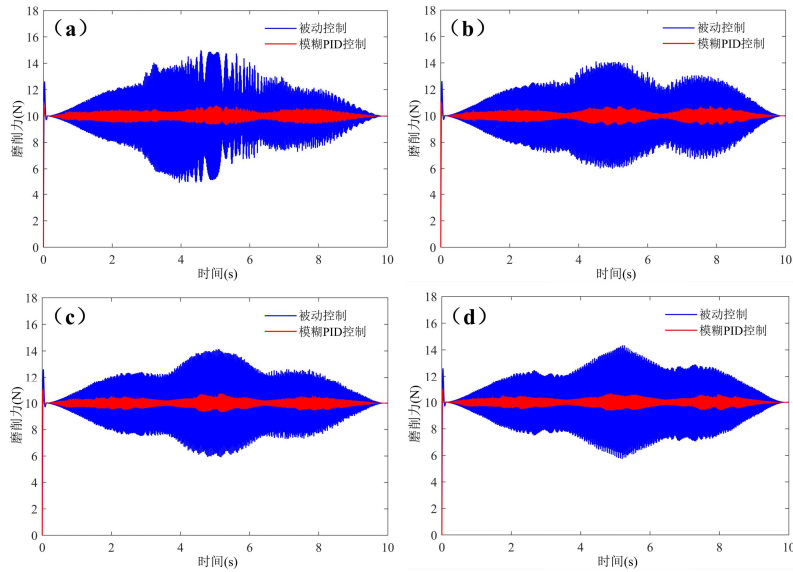


图 4-7 不同转速下磨削力控制效果: (a) 砂轮转速 $n=3000\text{r/min}$; (b) 砂轮转速 $n=6000\text{r/min}$; (c) 砂轮转速 $n=9000\text{r/min}$; (d) 砂轮转速 $n=12000\text{r/min}$

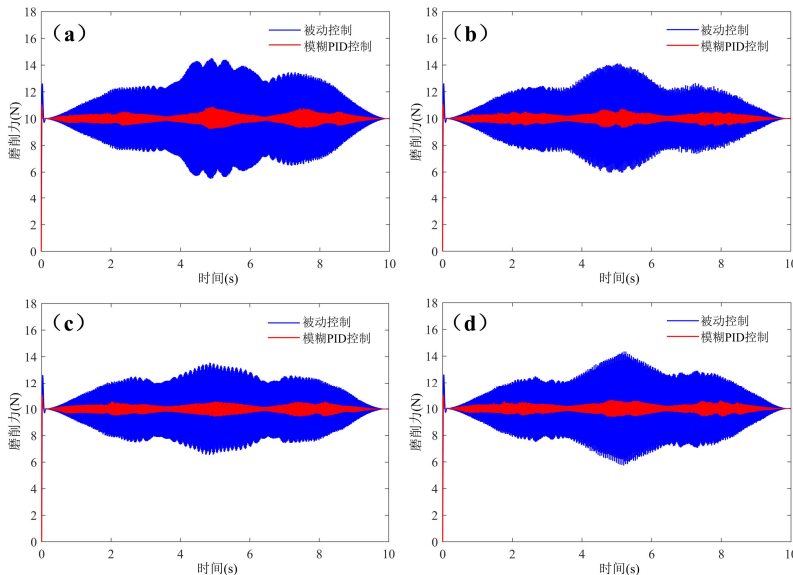


图 4-8 不同磨削进给速度下磨削力控制效果: (a) 磨削进给速度 $v_s=5\text{mm/s}$; (b) 磨削进给速度 $v_s=10\text{mm/s}$; (c) 磨削进给速度 $v_s=15\text{mm/s}$; (d) 磨削进给速度 $v_s=20\text{mm/s}$

如图 4-8 所示, 在不同磨削进给速度下对磨削力进行主被动控制对比, 设置打磨机砂轮转速 $n=12000\text{r/min}$, 工件厚度 $h=8\text{mm}$, 磨削进给速度分别为 $v_s=5\text{mm/s}$, $v_s=10\text{mm/s}$, $v_s=15\text{mm/s}$ 和 $v_s=20\text{mm/s}$ 。从图中能够明显看出, 在不同的磨削进给速度下, 相较于被动控制, 施加模糊PID自适应控制能够有效抑制磨削力的波动, 实现对工件振动耦合状态下磨削力的精确控制。

为了进一步验证控制策略的有效性, 设置打磨机砂轮转速 $n=12000\text{r/min}$, 磨削进给速度 $v_s=10\text{mm/s}$, 选取磨削工件的厚度分别为 $h=4\text{mm}$, $h=6\text{mm}$, $h=8\text{mm}$ 和 $h=10\text{mm}$ 进行仿真分析。从图 4-9 中能够明显看出, 在不同的工件厚度下, 相较于被动控制, 采用模糊PID自适应控制能够有效抑制磨削力的波动。

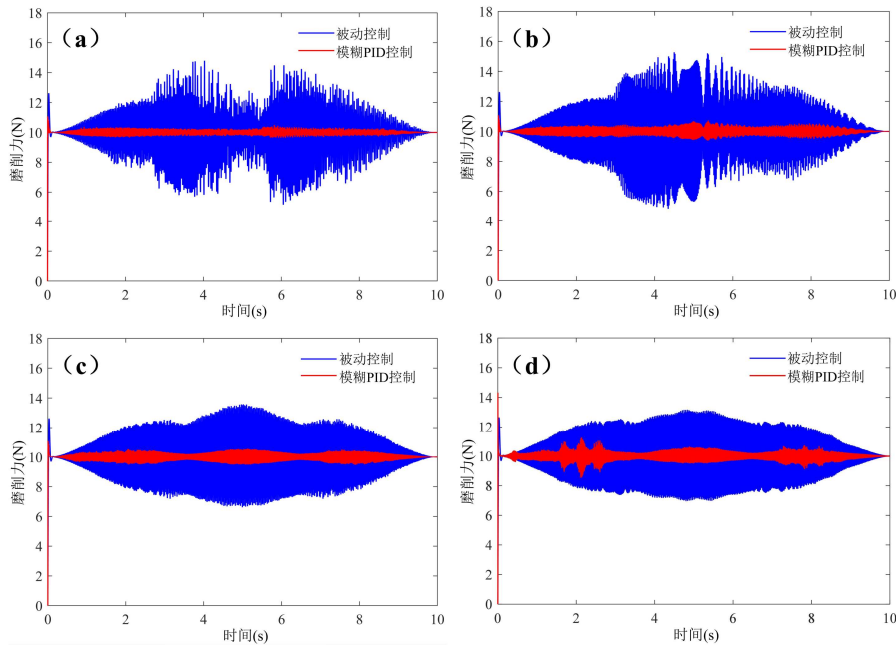


图 4-9 不同工件厚度下磨削力控制效果: (a) 工件厚度 $h=4\text{mm}$; (b) 工件厚度 $h=6\text{mm}$;
(c) 工件厚度 $h=8\text{mm}$; (d) 工件厚度 $h=10\text{mm}$

4.3.2 工件振动控制

图 4-10 为工件振动位移在不同砂轮转速下的主被动控制对比, 设置磨削进给速度 $v_s=10\text{mm/s}$, 工件厚度 $h=8\text{mm}$, 打磨机的砂轮转速分别为 $n=3000\text{r/min}$, $n=6000\text{r/min}$, $n=9000\text{r/min}$ 和 $n=12000\text{r/min}$ 。从图中能够看出, 采用模糊PID自适应控制对比被动控制具有很好的工件振动抑制效果, 控制后的工件振动位移较控制前明显降低, 验证了控制策略的有效性。

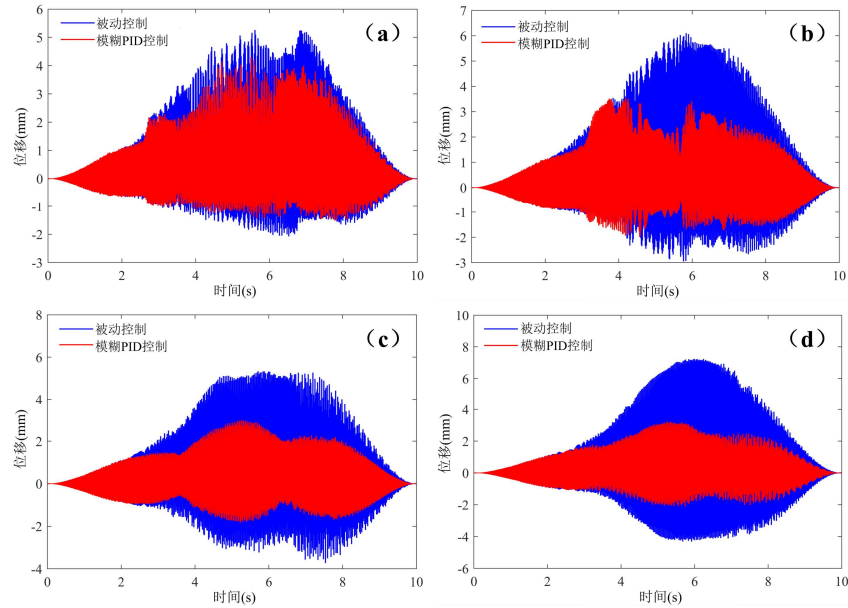


图 4-10 不同转速下工件振动抑制效果：（a）砂轮转速 $n=3000\text{r/min}$ ；（b）砂轮转速 $n=6000\text{r/min}$ ；（c）砂轮转速 $n=9000\text{r/min}$ ；（d）砂轮转速 $n=9000\text{r/min}$

如图 4-11 所示，在不同磨削进给速度下对工件振动位移进行主被动控制对比，设置打磨机砂轮转速 $n=12000\text{r/min}$ ，工件厚度 $h=8\text{mm}$ ，磨削进给速度分别为 $v_s=5\text{mm/s}$ ， $v_s=10\text{mm/s}$ ， $v_s=15\text{mm/s}$ 和 $v_s=20\text{mm/s}$ 。从图中能够看出，在不同的磨削进给速度下，施加模糊PID自适应控制的工件振幅相较于被动控制均得到抑制。

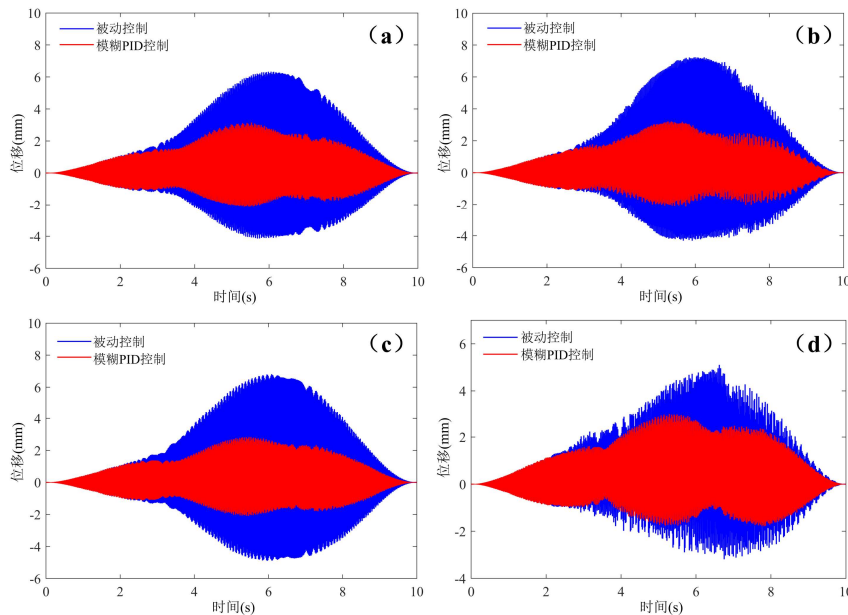


图 4-11 不同磨削进给速度下工件振动抑制效果：（a）磨削进给速度 $v_s=5\text{mm/s}$ ；（b）磨削进给速度 $v_s=10\text{mm/s}$ ；（c）磨削进给速度 $v_s=15\text{mm/s}$ ；（d）磨削进给速度 $v_s=20\text{mm/s}$

图 4-12 所示为不同工件厚度下工件振动位移的主被动控制对比，设置打磨

机砂轮转速 $n=12000\text{r/min}$ ，磨削进给速度 $v_s=10\text{mm/s}$ ，磨削工件的厚度分别为 $h=4\text{mm}$ ， $h=6\text{mm}$ ， $h=8\text{mm}$ 和 $h=10\text{mm}$ 。从图中能够明显看出，对不同厚度的磨削工件进行磨削仿真，相较于被动控制，采用模糊PID自适应控制能够有效抑制工件磨削过程中的振动位移，进一步验证了控制策略的有效性。

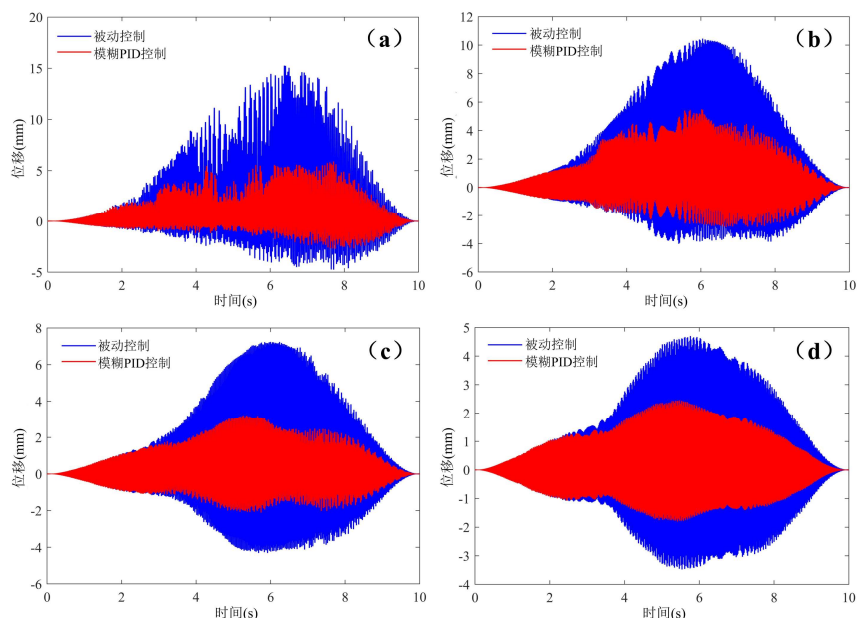


图 4-12 不同工件厚度下工件振动抑制效果：（a）工件厚度 $h=4\text{mm}$ ；（b）工件厚度 $h=6\text{mm}$ ；（c）工件厚度 $h=8\text{mm}$ ；（d）工件厚度 $h=10\text{mm}$

4.4 本章小结

本章根据机器人磨削耦合系统构成以及工件振动与磨削力之间的耦合关系，设计了机器人磨削系统振动控制的模糊PID自适应控制器，在Matlab/Simulink中搭建了机器人磨削系统的仿真控制模型，仿真结果显示，本文设计的机器人磨削系统振动控制策略在不同磨削参数下均能实现磨削力的恒定及工件的振动抑制。

第五章 机器人磨削系统振动控制实验研究

5.1 引言

为验证第四章所搭建的机器人磨削耦合系统控制策略的有效性,本章搭建了机器人磨削实验平台,完成了实验平台的硬件设备选型、控制界面和软件程序设计,开展了不同磨削力和磨削参数下的机器人磨削振动控制实验测试,并进一步验证所设计的机器人磨削系统振动控制策略。

5.2 实验方案

在不同接触力下对机器人磨削实验的主被动控制效果进行对比,通过示教的方式分别设置机器人下压力为 10N、20N 和 30N,控制开启时,加速度传感器反馈工件的振动信号给 Labview 控制系统,Labview 控制电流源输出电流给磁流变阻尼磨削装置产生阻尼力作用在工件上,力传感器和 PZT 压电陶瓷分别测试磨削过程中的磨削力和工件振动位移;控制关闭时,电流源不给磨削装置供电,工件磨削仅依靠磨削装置,此时,只需测试机器人磨削过程中的磨削力和工件振动位移;分别采集主动和被动控制下的磨削力和工件振动位移,形成不同接触力下的三组对比实验。

将磨削执行器中打磨机砂轮转速和机器人磨削进给速度作为不同磨削参数来对机器人磨削实验的主被动控制效果进行对比。分别设置打磨机砂轮转速 $n=6000\text{r/min}$ 、 $n=9000\text{r/min}$ 以及 $n=12000\text{r/min}$,机器人的磨削进给速度 $v_s=5\text{mm/s}$ 、 $v_s=10\text{mm/s}$ 以及 $v_s=20\text{mm/s}$,控制开启时 Labview 将工件振动信号转化为控制磁流变阻尼磨抛装置所需要的电流信号,磨削装置输出阻尼力作用在工件上,力传感器和 PZT 压电陶瓷分别测试磨削过程中的磨削力和工件振动位移;关闭控制,采集磨削过程中的磨削力与工件振动位移形成不同磨削参数下的六组对比实验;如图 5-1 所示为机器人磨削系统整体结构控制流程图。

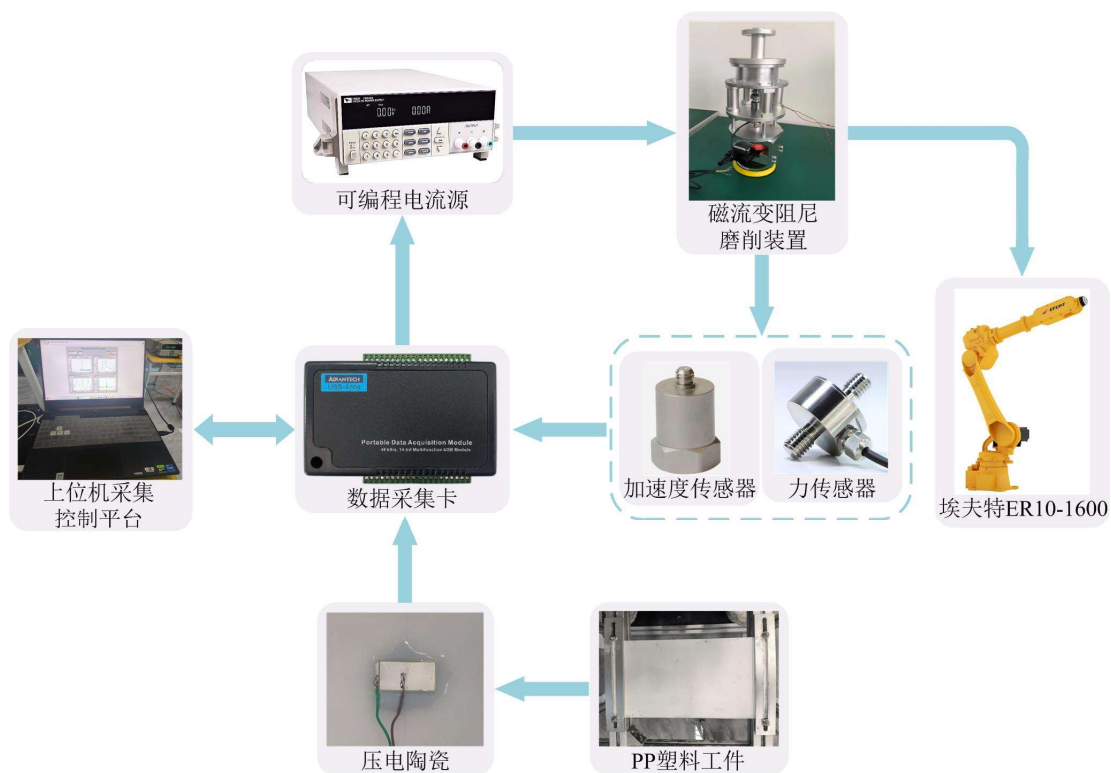


图 5-1 机器人磨削系统控制流程图

5.3 实验平台搭建

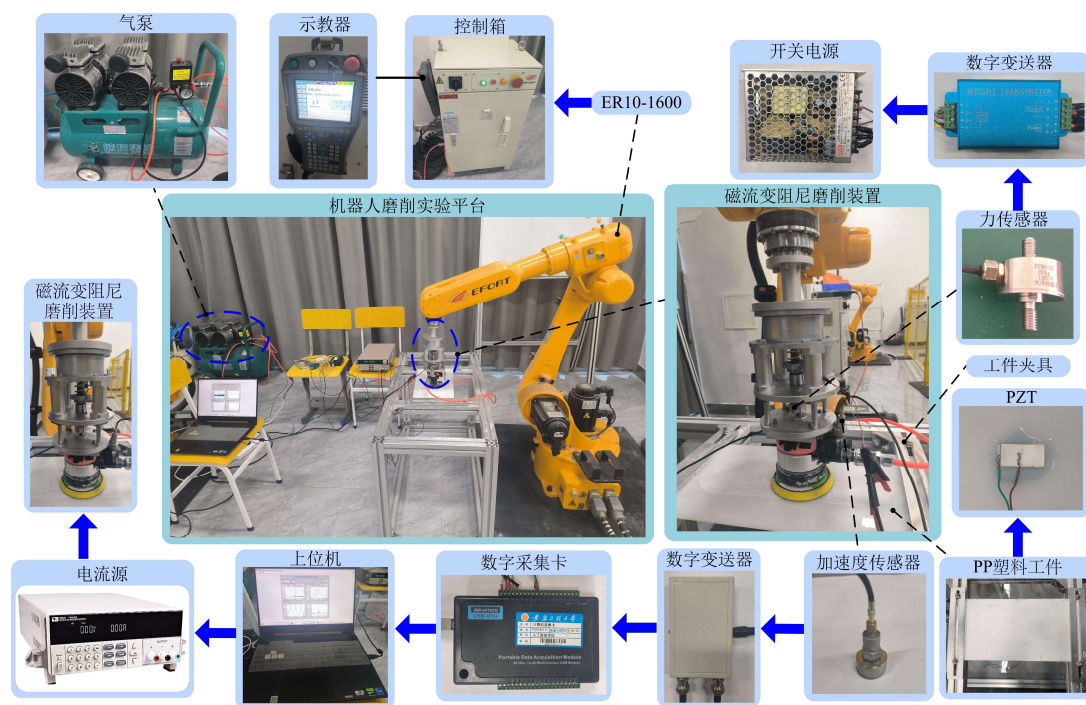


图 5-2 机器人磨削实验平台

如图 5-2 所示, 机器人磨削实验平台主要由机械臂、磁流变阻尼磨削装置、可编程电流源、型台架、PP塑料工件、加速度传感器、力传感器、采集卡、数字变送器、动力源气泵以及上位机组成。磁流变阻尼磨削装置中的柔顺联接装置上端通过联接法兰与机器人末端连接, 下端与固定手持式气动打磨机的夹具进行连接。实验过程中通过示教器控制机器人的行进轨迹, 加速度传感器用于测量磨削过程中工件的振动信号, 数据采集卡用于采集磨削过程中的加速度和力信号。将采集到的加速度信号输入到搭建的Labview控制平台, Labview会输出相应的控制电流到可编程电流源中, 通过实时改变电流调控阻尼力实现振动控制。在Labview中搭建机器人磨削实验的监测平台, 实时观测工件振动与磨削力变化。

5.2.1 硬件设备选型

(1) 工业机器人

本文选用埃夫特公司生产的ER10-1600 型号机器人, 如图 5-3 所示, 该机器人为六自由度串联机械臂, 承受的额定负载 10kg, 机器人本体质量 185kg, 手臂的工作半径可达 1640mm, 在空载下的重复精度为 $\pm 0.05\text{mm}$, 采用伺服驱动的方式。该型号机器人能够在承载磨削装置重量和施加一定负载的前提下, 保证足够的加工精度。

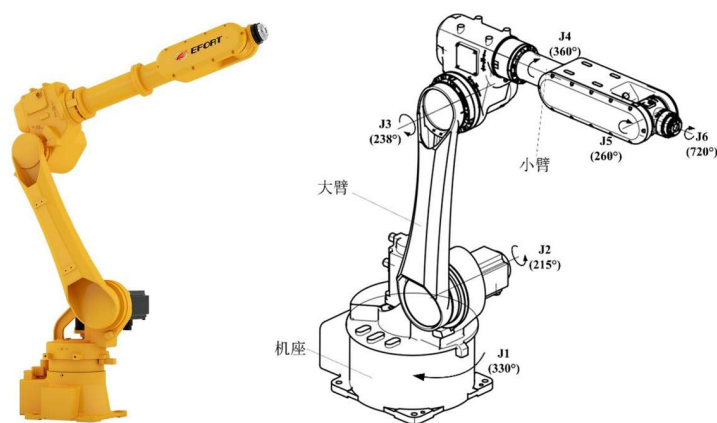


图 5-3 埃夫特 10kg工业机器人ER10-1600

(2) 手持式气动打磨机

磨削工具选择国产的威马牌 8523-3A气动打磨机, 如图 5-4 所示, 空载下气动打磨机空转最高转速为 12000r/min, 打磨机工作压力为 6kg/cm^2 , 气动打磨机重量为 0.87kg, 气动打磨机为偏心式, 偏心距为 5mm。该打磨机外面包裹一层

橡胶材质，内部采用合金钢材质，该打磨机适用于材料去除量低的场合，如铝合金、木材、橡胶塑料等表面的打磨、抛光作业。可根据作业需求更换打磨机下面的砂盘以及其对应的砂纸。该打磨设置有调节阀，通过控制调节阀来改变其内部流量进而起到调节转速的作用。打磨机的头部设有压板来控制打磨机的启停，该打磨机需要一个独立的气泵为其提供气源。



图 5-4 威马牌 8523-3A 气动打磨机

(3) 夹具

本文针对手持式气动打磨机专门设计了一套夹具，该夹具一方面能够对打磨机夹持固定，另一方面能够连接柔顺联接装置。该夹具由L-型板、左夹持件和右夹持件组成，如图 5-5 所示。L-型板上端留有阶梯孔，用于连接柔顺联接装置，左侧留有U-型槽与左夹持件进行配合固定；左夹持件与右夹持件通过螺钉对打磨机进行夹紧固定；此外，L-型板压紧打磨机的压板，打磨机与夹具固定并始终保持常开状态，L-型板的U-型槽能够调节打磨机的高度。因此，本文设计的夹具能够适用于不同直径、高度尺寸的打磨机。

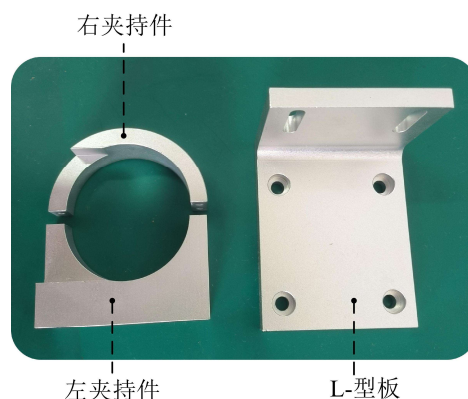


图 5-5 气动打磨机夹具

(4) 柔顺联接装置

如图 5-6 为柔顺联接装置，该装置主要由联接法兰、磁流变阻尼单元、支撑

柱、支撑板导向杆、力传感器及磨削联接法兰组成,联接法兰与机器人末端连接,柔顺联接装置的末端与夹具和气动打磨机连接。

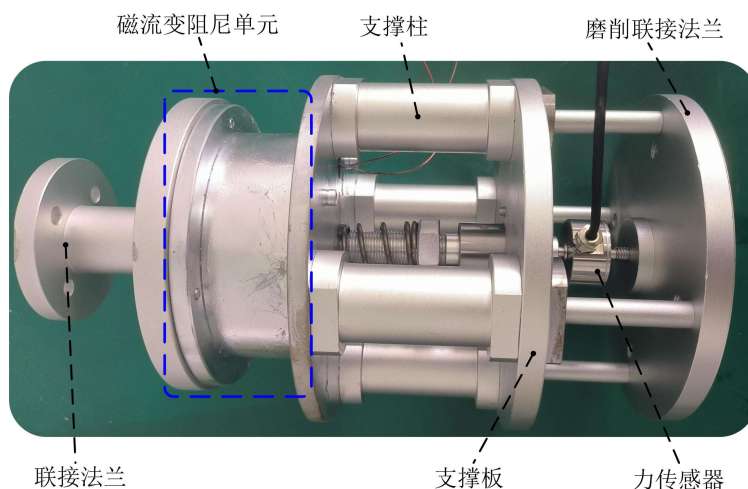


图 5-6 柔顺联接装置

(5) 可编程直流电源

如图 5-7 所示,可编程直流电源用于为磁流变阻尼单元中的励磁线圈提供电流,可编程直流电源选择艾德克斯电子(南京)有限公司生产的IT6833A可编程直流电源,输出电压 0~72V,输出电流 0~3A,动态响应时间 100 μ s,电压稳定时间上升阶段小于 150ms,下降阶段小于 550ms,该电流源内置RS232、USB通信接口,能够与计算机进行通讯。



图 5-7 IT6833A可编程电流源

(6) 力传感器与数字通信模拟放大器

如图 5-8 所示,力传感器与数字通信模拟放大器,力传感器嵌在柔顺联接装置内部,力传感器实时检测磨削过程中磨削力的波动,采集到的数据通过数字通信模拟放大器处理,再输入到数据采集卡中。力传感器选用蚌埠大洋传感系统工程有限公司生产的DYM H-103 力传感器,测量范围 ± 1000 N,供电电压 5~15V,输出灵敏度 1.1mV/V,综合误差 0.3%F.S。

数字通信模拟放大器选用蚌埠米优衡器有限公司生产的DY510 单通道模拟量称重变送器，采样频率 $\geq 1\text{KHz}$ ，输入信号 $0.5\sim 4\text{mV/V}$ ，输出电压 $\pm 10\text{V}$ 内，工作温度 $-30^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ ，综合精度 0.05% 。

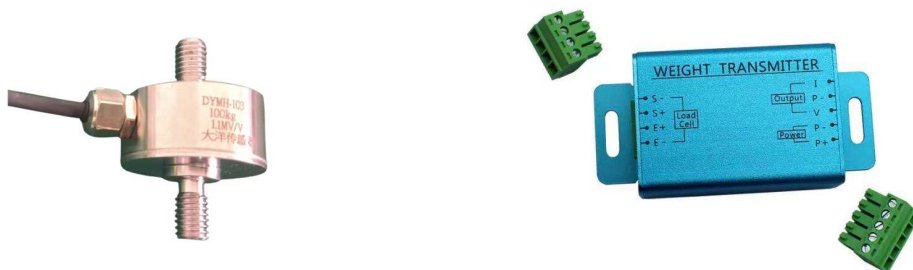


图 5-8 力传感器与数字通信

(7) 加速度传感器与数字通信模拟放大器

如图 5-9 所示为加速度传感器与数值通信模拟放大器，加速度传感器通过磁铁吸附在磨削夹具上用来获得磨削过程中的振动信息并进行反馈控制，采集到信息通过数字通信模拟放大器处理，并将数据输入到采集卡中。加速度传感器选择振臣电子设备有限公司生产的型号ZC1010LA振动加速度传感器，其接口为IEPE，输出电压 $\pm 5\text{V}$ ，使用频率 $0.5\sim 5\text{KHz}$ ，电压灵敏度为 100mV/g ，量程为 50g ，其配合 24V 恒流源使用。恒流源选择振臣生产的型号为ZC5201 单通道恒流适配器，频率范围 $1\text{Hz}\sim 100\text{KHz}$ ，其增益可 $\times 1$ 或 $\times 10$ 可调，精度误差小于 5% 。



图 5-9 加速度传感器与 24V 恒流适配器

(8) 数据采集卡

如图 5-10 所示，使用的采集卡是研华科技(中国)有限公司生产的USB-4704，其通过USB数据线与上位机连接，该数据采集卡拥有 14 位A/D、D/A转换器，采样速率 48KHz ，有 8 路单端模拟和 4 路差分模拟量输入， 2 路模拟量输出，同时具有 14 位A/D转换器，可编程各个通道的增益。



图 5-10 研华USB-4704 数据采集卡

(9) 24V力传感器电源

如图 5-11 所示,力传感供电电源选择明纬企业股份有限公司生产的LRS-100-24 直流电源,其能够将 220V交流电转化为 24V直流电,输入电压 85~264VAC,输出电压 24V,输出功率 100W,输出电流 4.5A,输出电压精度 $\pm 0.1\%$,工作温度 $-30^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$,工作效率 86%~91%。

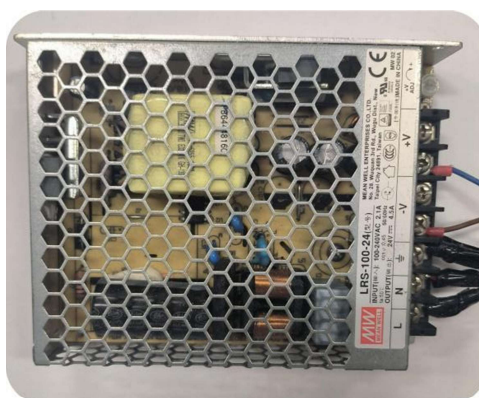


图 5-11 24V开关电源

(10) 气泵空气压缩机



图 5-12 气泵空气压缩机

空气压缩机将空气在气泵内压缩进行增压，为气动打磨机提供稳定气压，空气压缩机选择上海熊猫机械集团通用设备有限公司生产的550*2-50L无油全铜空压机，如图5-12所示，工作压力0.8MPa，容积流量220L/min，电机功率1100W，转速1400r/min，气罐容积50L，重量30kg。

(11) 传感元件

如图5-13所示为PZT压电陶瓷，其材质为铌酸钴复合材料，将该压电陶瓷贴在磨削工件的背面用AB胶固定，其正极为面积较大面，负极为面积小面，将信号线通过焊枪含在其表面，信号线另一端连接采集卡。

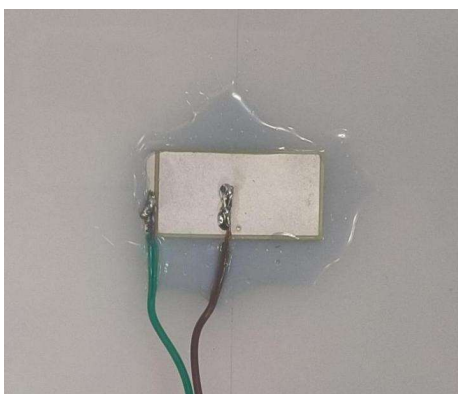


图 5-13 PZT压电陶瓷

5.2.2 上位机程序开发

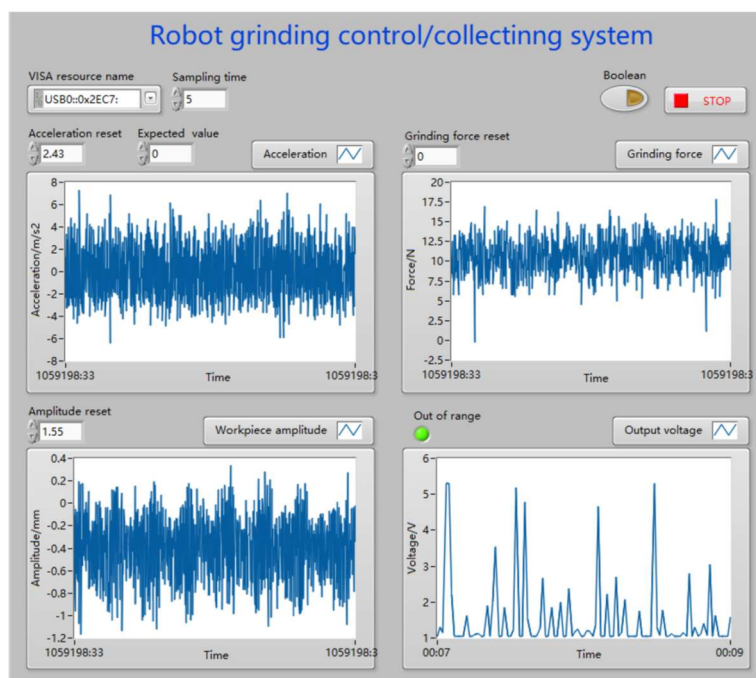


图 5-14 Labview采集/控制界面

本文使用美国NI公司研发的Labview对上位机的软件进行开发,Labview通过USB串口与采集卡、电流源之间进行通讯,数据采集卡将采集到的数据通过USB串口反馈到上位机的Labview,Labview中的控制系统对信号计算并控制电流源输出电流给磨削装置对工件进行振动控制。图 5-14 为在Labview软件中搭建的机器人磨削实验的采集/控制系统前面板,面板中的显示控件主要由工件振动加速度窗口、磨削力窗口、工件振动位移、输出电压窗口、布尔开关、停止按钮、调零串口以及采样率串口组成,可实时检测磨削过程中的磨削力和工件振动状态。

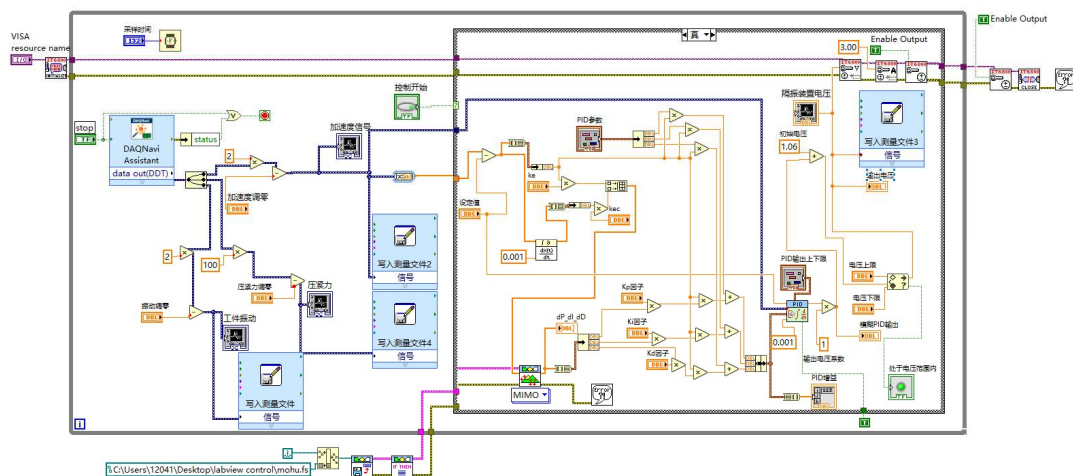


图 5-15 上位机程序框图

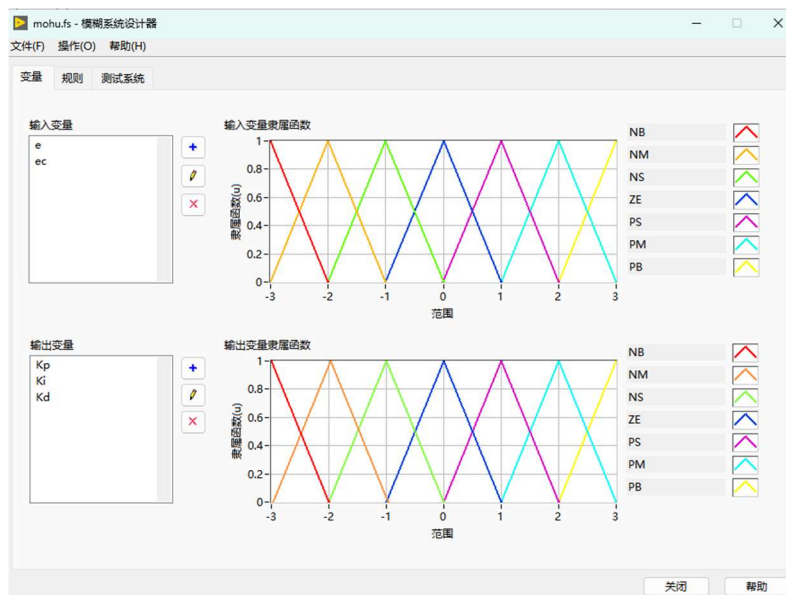


图 5-16 Labview模糊规则设计

图 5-15 为在Labview软件中搭建的机器人磨削系统的控制程序框图,除前面板中显示控制对应的程序模块之外,还需建立系统的模糊控制规则并将其导入到

模糊控制器模块中；如图 5-16 所示，在Labview—控制与仿真—Fuzzy System Designer工具中建立模糊控制规则，Labview将模糊控制规则保存为.fs文件；由图 5-17 能够看出由模糊规则得到的 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 输出曲面呈现连续、无明显突变，避免了较小的超调量和振荡风险。利用创建路径（函数）读取.fs文件，模糊控制规则模块经过模糊逻辑模块连接到PID模块中，PID模块接收到误差信号并通过计算转化为控制需要的电压信号。

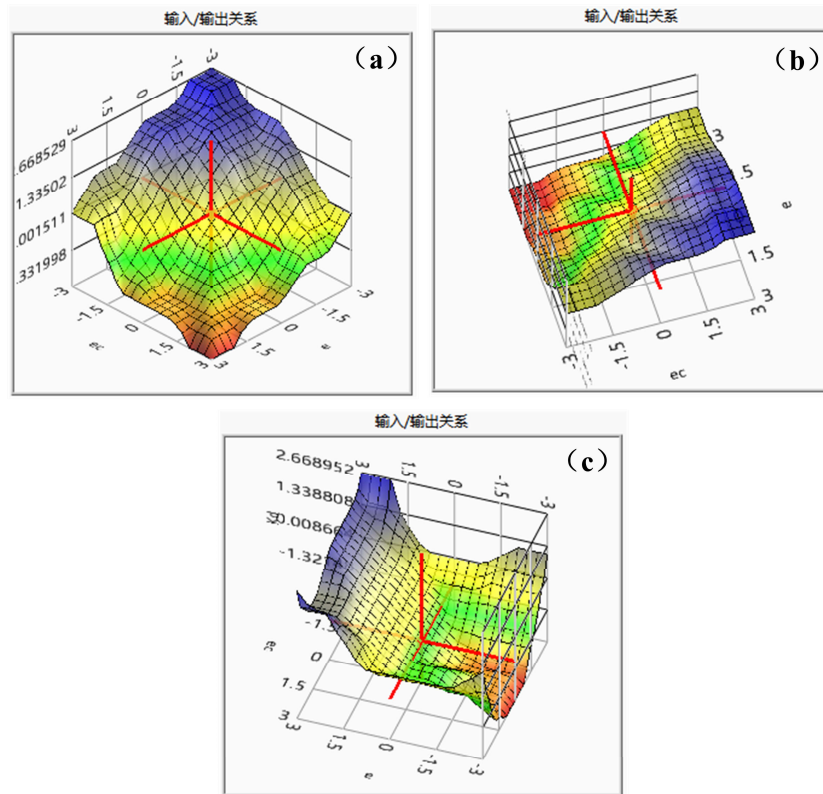


图 5-17 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 在模糊论域上输出量：（a） ΔK_p 在模糊论域上输出量；（b） ΔK_i 在模糊论域上输出量；（c） ΔK_d 在模糊论域上输出量

5.4 实验测试

5.4.1 测试流程

为验证磁流变阻尼磨削装置的抑振效果和控制策略的有效性，进行多次磨削对比实验。加速度传感器固定在夹具上，力传感器嵌入在装置内部，将传感器与数据采集卡、电源之间接线并通入上位机。具体流程如下：

（1）被动控制时，机器人末端连接磁流变阻尼磨削装置，磨削装置中的励

磁线圈接通电流源，电流源通过USB串口连接上位机；将铝合金板固定在型台架上，手持式气动打磨机接通气源，设定好磨削起点和终点，通过示教器控制机器人下压至期望磨削力附近，然后按照设定的移速进行移动；关闭Labview中的布尔开关，电流源不给装置供电，PZT压电陶瓷和力传感器检测到信号经过数据采集卡传递给上位机的Labview采集系统，保存数据。

(2) 主动控制时，机器人与磨削装置连接，磨削装置接通电流源，固定铝合金板，接通气源，设定好机器人磨削轨迹，采用示教的方法控制机器人下压至期望磨削力附近，机器人按照设定的移速进行磨削。开启Labview中的布尔开关，磨削过程中，加速度传感器检测到振动信号并输入到Labview的控制程序中，在模糊PID自适应控制下Labview会输出相应的电流信号给电流源，此时，电流源给装置供电，记录PZT压电陶瓷和力传感器的数据，与被动控制进行对比分析。

5.4.2 测试过程

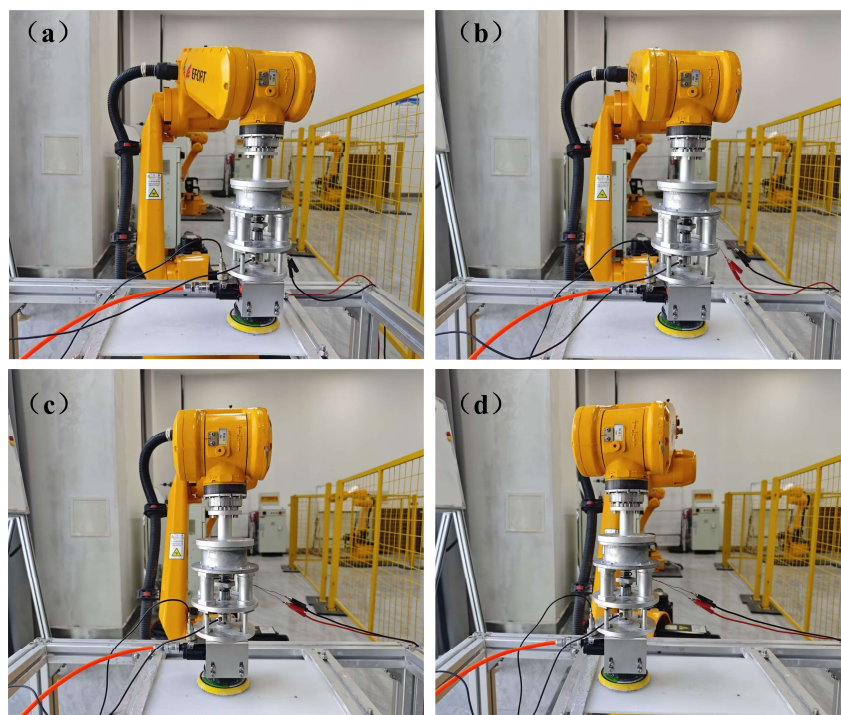


图 5-18 机器人磨削过程图：（a）接触工件；（b）磨削过程I；（c）磨削过程II；（d）磨削完成

如图 5-18 为机器人在磨削PP塑料的完整过程图，设定好机器人的行进方向沿工件从右向左开始磨削，调整好机器人的移动速度（磨削进给速度）以及打磨

机的调速阀（砂轮转速），机器人通过示教方式控制磨削轨迹，磨削装置从刚开始接触工件，历经磨削过程I到磨削过程II，最终完成整个磨削实验。上位机控制磁流变阻尼磨削装置输出阻尼力，并采集磨削过程中的磨削力和工件振动信号。

5.5 结果分析

5.5.1 不同磨削接触力控制结果分析

（1）磨削力控制结果分析

在机器人磨削实验中，设置打磨机砂轮转速 $n=12000\text{r/min}$ ，磨削进给速度 $v_s=10\text{mm/s}$ ，选取磨削工件厚度 $h=8\text{mm}$ ，对磨削工件分别施加 10N、20N和 30N的接触力，形成 3 组磨削对比实验，如图 5-19 所示。从图中可以看出，随着接触力的增大，磨削力在主被动控制（模糊PID自适应控制与被动控制）下也随之增大，并且能够看出磁流变阻尼磨削装置采用模糊PID自适应控制相较于被动控制，其能有效抑制不同接触力下磨削力的波动并且实现磨削力的恒定。

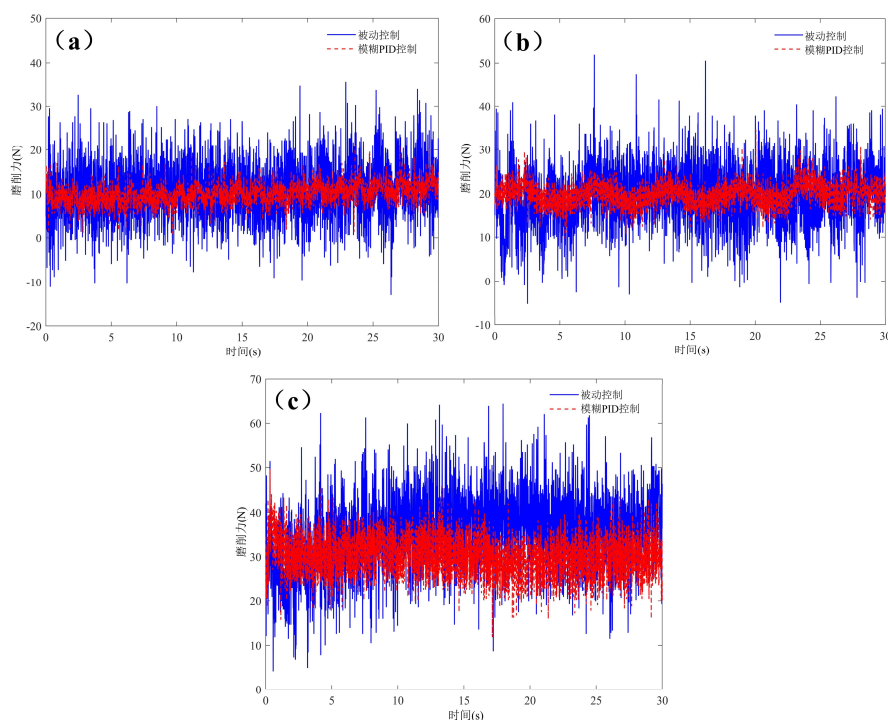


图 5-19 不同接触力下的磨削力控制效果：（a）接触力 10N磨削力控制效果；（b）接触力 20N磨削力控制效果；（c）接触力 30N磨削力控制效果

(2) 工件振动控制结果分析

如图 5-20 所示, 在 10N、20N 和 30N 接触力下对机器人磨削实验分别施加模糊PID自适应控制与被动控制, 设置打磨机砂轮转速 $n=12000\text{r/min}$, 磨削进给速度 $v_s=10\text{mm/s}$, 磨削工件厚度 $h=8\text{mm}$, 研究磨削工件在施加主被动下的振动控制效果。从图中可以明显看出, 当接触力增大时, 工件振动位移在主被动控制下也相应增大。同时, 从不同接触力下的机器人磨削实验情况来看, 当施加被动控制时, 工件振动剧烈; 而在施加模糊PID自适应控制后, 工件的振动位移相较于被动控制状态得到了明显抑制。

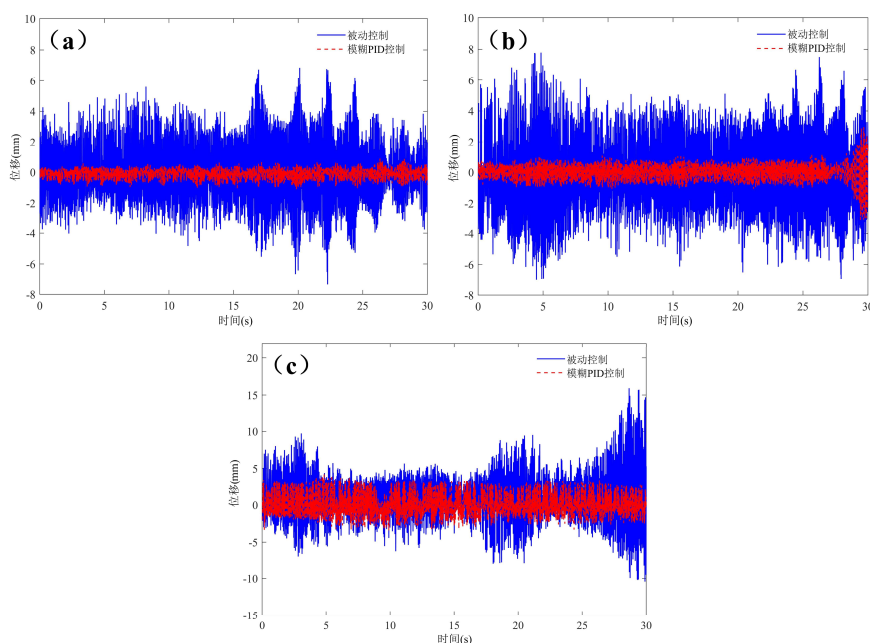


图 5-20 不同接触力下工件振动控制效果: (a) 接触力 10N 工件振动控制效果; (b) 接触力 20N 工件振动控制效果; (c) 接触力 30N 工件振动控制效果

如图 5-21 所示, 对不同接触力下磨削工件的振动加速度信号进行傅里叶变换, 得出不同接触力下工件振动加速度频谱图, 图中的信号变化可以反映出系统状态的变化, 直观呈现了不同频率下的能量分布情况, 有助于分析系统在不同接触力下的频域特征。

从图 5-21 中能够看出, 低频段 (0-20Hz): 在接触力为 10N 和 20N 时, 两种控制方式的能量值都相对较小且差异不大。当接触力增加到 30N, 模糊PID控制的能量略高于被动控制, 说明此时模糊PID控制在低频段的振动抑制效果有所减弱。

中频段（20-60Hz）：被动控制在各接触力下的能量值都明显高于模糊PID控制，且存在多个能量峰值，表明被动控制下系统在中频段的振动较为强烈，而模糊PID控制能够有效地抑制中频段的振动，有助于提高磨削过程的稳定性和加工精度。

高频段（60-100Hz）：随着接触力增大，模糊PID控制在高频段的能量增长更为显著，尤其在 30N接触力时出现了较高的能量峰值；而被动控制的能量分布相对较为分散。这说明在高接触力工况下，模糊PID控制可能会激发系统的高频振动。

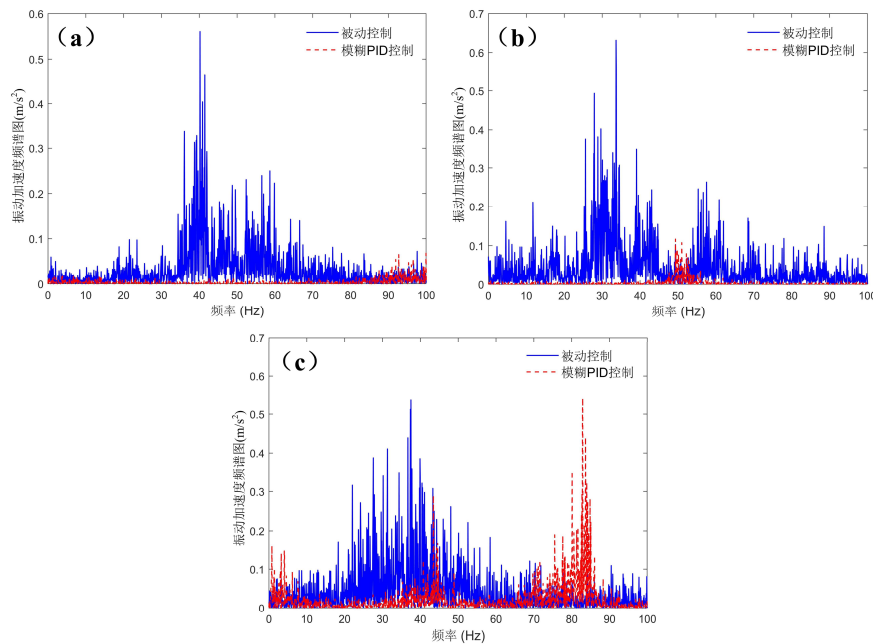


图 5-21 不同接触力下磨削工件振动加速度频谱图：（a）接触力 10N 磨削装置的加速度频谱图；（b）接触力 20N 磨削装置的加速度频谱图；（c）接触力 30N 磨削装置的加速度频谱图

5.5.2 不同磨削参数控制结果分析

（1）磨削力控制结果分析

为进一步验证控制策略的有效性，设置相同接触力，分别对不同磨削参数（磨削进给速度、砂轮转速）下的磨削力、工件振动位移进行分析验证。

如图 5-22 所示，设置砂轮转速 $n=9000\text{r/min}$ ，磨削进给速度分别为 $v_s=5\text{mm/s}$ 、 $v_s=10\text{mm/s}$ 和 $v_s=20\text{mm/s}$ ，研究磨削力在不同磨削进给速度下施加主被动控制的对比效果。从图中可清晰看出，随着磨削进给速度的增大，在主动控制和被动控制

下，磨削力波动幅值均随之上升。同时，能够明显发现，相较于被动控制，对磁流变阻尼磨削装置施加模糊PID自适应控制，可以实现磨削过程中磨削力的恒定，以及磨削力波动幅值的降低。

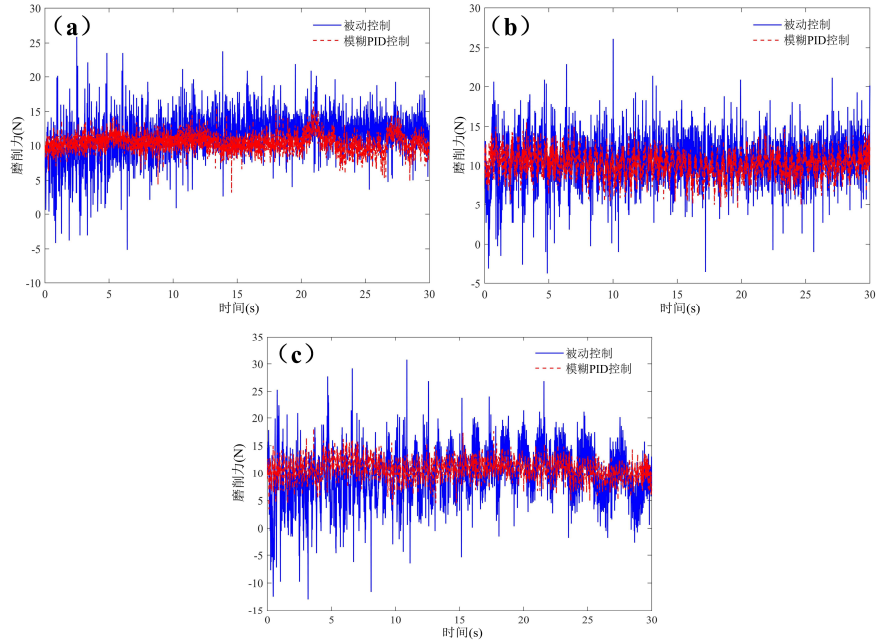


图 5-22 不同进给速度下磨削力控制效果：（a）进给速度 $v_s=5\text{mm/s}$ ；（b）进给速度 $v_s=10\text{mm/s}$ ；（c）进给速度 $v_s=20\text{mm/s}$

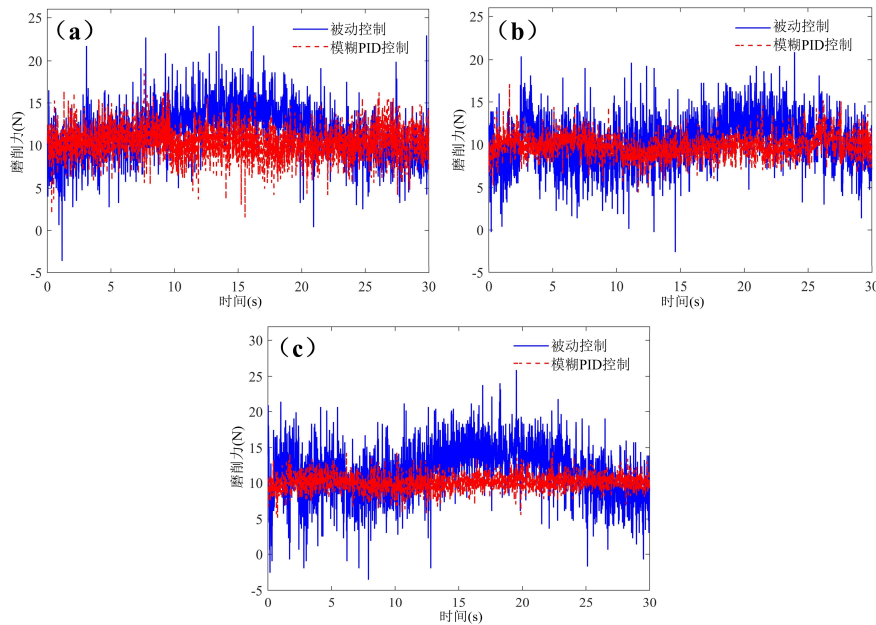


图 5-23 不同磨削转速下磨削力控制效果：（a）磨削转速 $n=6000\text{r/min}$ ；（b）磨削转速 $n=9000\text{r/min}$ ；（c）磨削转速 $n=12000\text{r/min}$

如图 5-23 所示，设置磨削进给速度 $v_s=10\text{mm/s}$ ，打磨机砂轮转速分别为

$n=6000\text{r/min}$ 、 $n=9000\text{r/min}$ 和 $n=12000\text{r/min}$ ，分析在机器人磨削实验中分别施加模糊PID自适应控制与被动控制的磨削力对比效果。从图中可以看出，随着砂轮转速的增大，磨削力波动幅值在主被动控制下均逐渐降低。同时，也可以看出相较于被动控制，对磁流变阻尼磨削装置施加模糊PID自适应控制，能明显降低磨削力波动幅值，维持磨削力恒定。

(2) 工件振动控制结果分析

如图 5-24 所示，设置打磨机砂轮转速 $n=9000\text{r/min}$ ，磨削进给速度分别为 $v_s=5\text{mm/s}$ 、 $v_s=10\text{mm/s}$ 和 $v_s=20\text{mm/s}$ ，研究工件振动位移在主被动控制下的对比效果。从图中能够明显看出，随着磨削进给速度的增大，无论是模糊PID自适应控制还是被动控制，工件的振动位移均随之变大。同时，从实验结果中可以明显看出，当磁流变阻尼磨削装置采用被动控制进行磨削实验时，会导致工件产生强烈振动，而在施加模糊PID自适应控制开展磨削实验时，相较于被动控制，该磨削装置能够有效抑制磨削过程中的工件振动位移。

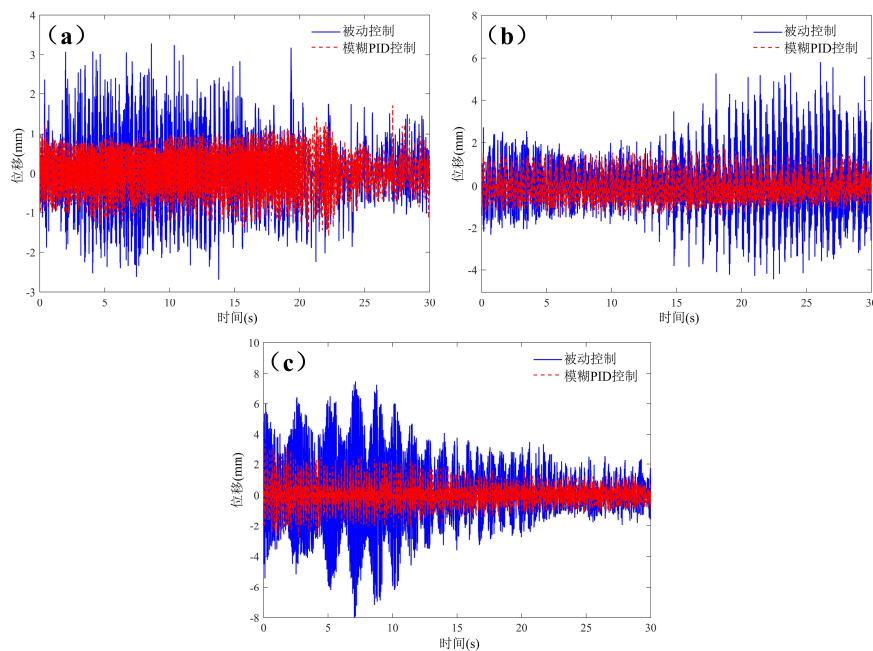


图 5-24 不同磨削进给速度下工件振动控制效果：（a）磨削进给速度 $v_s=5\text{mm/s}$ ；（b）磨削进给速度 $v_s=10\text{mm/s}$ ；（c）磨削进给速度 $v_s=20\text{mm/s}$

如图 5-25 所示，设置磨削进给速度 $v_s=10\text{mm/s}$ ，砂轮转速分别为 $n=6000\text{r/min}$ 、 $n=9000\text{r/min}$ 以及 $n=12000\text{r/min}$ ，研究工件振动位移在不同砂轮转速下施加主被动控制的对比效果。从实验结果看出，随着砂轮转速的增大，无论是在主动控制还

是被动控制下，工件的振动位移均逐渐减小。同时，当磁流变阻尼磨削装置采用被动控制进行磨削实验时，工件会产生剧烈振动，而施加模糊PID自适应控制后，与被动控制相比，工件振动位移的幅值明显降低，进一步验证了本文所提出的磁流变阻尼磨削装置以及相应控制策略的有效性。

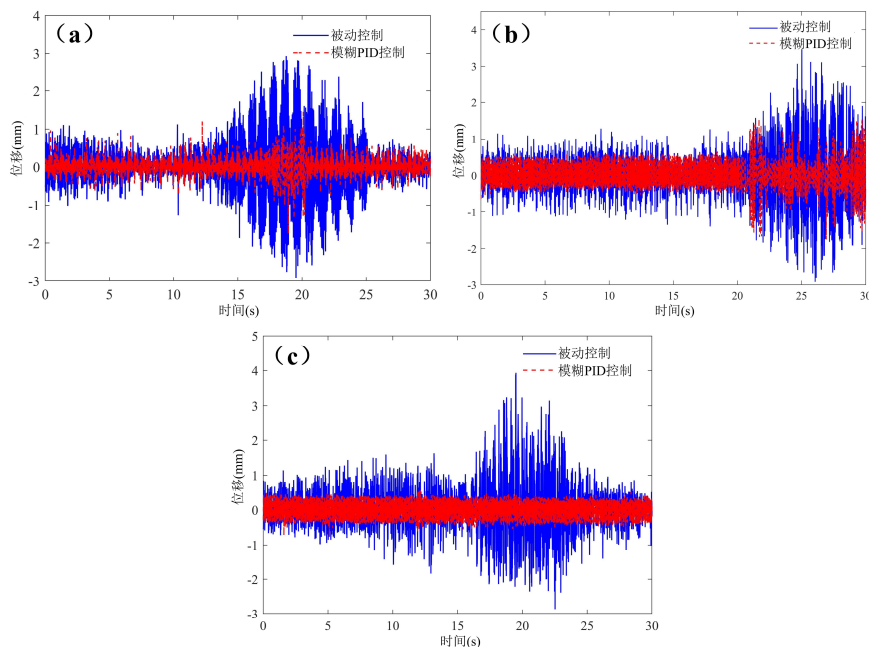


图 5-25 不同磨削转速下工件振幅控制效果：（a）磨削转速 $n=6000\text{r/min}$ ；（b）磨削转速 $n=9000\text{r/min}$ ；（c）磨削转速 $n=12000\text{r/min}$

5.6 本章小结

本章设计了机器人磨削系统的实验方案，分析了机器人磨削系统振动抑制的实验原理，完成了机器人磨削实验系统的硬件设备选型和上位机程序开发，搭建了机器人磨削实验平台，开展了基于模糊PID自适应控制的机器人磨削振动控制实验，通过采集磨削力信号和工件振动信号，来验证机器人磨削实验的主被动控制效果。实验结果显示，本文设计的磁流变阻尼磨削装置配合模糊PID自适应控制器能够有效抑制磨削过程中工件的振动和磨削力的波动，实现机器人的稳定磨削。

第六章 结论与展望

6.1 结论

本文针对机器人磨削耦合系统的振动问题,开展了机器人磨削耦合系统的振动特性分析以及机器人磨削系统振动控制策略研究,得出如下主要结论:

(1) 根据磁流变阻尼原理,设计了一种磁流变阻尼磨削装置,研制了磁流变阻尼磨削装置的实物样机;对装置内部的磁流变阻尼单元进行电磁特性和力学性能分析,基于电子万能试验机的实验平台对磁流变阻尼单元进行了力学实验测试,在此基础上拟合出磁流变阻尼单元的阻尼力公式;经实验测试与验证,拟合得到的阻尼力模型具有较好的预测性能,能够为机器人磨削的振动控制提供装置和理论基础。

(2) 分析了机器人磨削耦合系统构成,在此基础上,建立了机器人磨削耦合系统的动力学模型,构建了工件的等效刚度约束模型;分析了磁流变阻尼磨削装置系统的振动传递特性,研究了工件磨削系统在振动耦合作用下的磨削力波动特性,并揭示了工件振动与磨削力之间的动态耦合机制,为机器人磨削的振动控制提供坚实的理论基础。

(3) 针对机器人磨削耦合系统设计了机器人磨削系统振动控制的模糊PID控制器,搭建了机器人磨削系统振动控制的虚拟样机仿真模型,开展了仿真研究,仿真结果表明,本文设计的基于模糊PID的机器人磨削系统振动控制策略能够实现不同磨削参数下磨削力的恒定以及工件的振动抑制。

(4) 设计了机器人磨削系统的实验方案,完成了磨削系统的硬件设备选型和软件系统设计,搭建了机器人磨削实验平台,开展了机器人磨削实验研究,验证了磁流变阻尼磨削装置和控制策略的有效性,为机器人磨削振动控制的研究提供了一种思路。

6.2 展望

本文采用实验与理论仿真分析的手段来研究机器人磨削耦合系统振动特性

与机器人磨削系统振动控制策略，尽管本文在该领域进行了一定的探索和尝试，但研究内容仍有较大的改进空间。为了进一步提升研究的深度和广度，后续研究可以在多个方面进行深入的探讨和优化：

（1）本文所研制的磨削装置及设计的机器人磨削系统振动控制策略，其分析以及验证过程主要针对单一的磨削工况，缺乏考虑磨削过程中的动态扰动情况，后续可采用智能算法对未知工件下的磨削工况进行负载预测并设计动态自适应控制策略，来实现机器人磨削过程中的稳定控制。

（2）机器人磨削耦合系统是机器人、磨削装置、工件三者耦合的动力学系统，本文主要考虑了磨削装置与工件之间的动态耦合关系，将机器人考虑为刚性件，并没有考虑机器人自身的耦合动力学特性，在后续的工作中可以建立机器人-磨削装置-工件的耦合系统动力学模型，完整全面地分析系统的振动耦合特性。

参考文献

- [1] 高峰, 郭为忠. 中国机器人的发展战略思考 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(07): 1-5.
- [2] 孙廉策, 陈炳发. 复合材料蒙皮的打磨工艺技术研究 [J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(05): 62-67.
- [3] 李文辉, 温学杰, 李秀红, 等. 整体叶盘抛磨技术研究现状及其发展趋势 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(17): 88-102.
- [4] 董家候, 郑甲红, 何凯, 等. 一种基于磁力吸附的焊缝打磨爬壁机器人设计 [J]. 机床与液压, 2023, 51(03): 35-43.
- [5] Chong Z H, Xie F G, Liu X J, et al. Design of the parallel mechanism for a hybrid mobile robot in wind turbine blades polishing [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 61: 101857.
- [6] 邓建新, 袁邦颐, 黄秋林, 等. 基于工业机器人的复杂曲面磨抛关键技术综述 [J]. 机械工程学报, 2024, 60(07): 1-21.
- [7] Dai S, Wang X, Zhang H, et al. Research on variation of grinding temperature of wind turbine blade robotic grinding [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2021, 235(3): 367-377.
- [8] Yu Z, Lin H-I. Development of robotic polishing/fettling system on ceramic pots [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2021, 18(3): 17298814211012851.
- [9] 李杰, 杨泽源, 时强胜, 等. 基于小样本数据驱动模型的橡胶材料机器人磨抛去除廓形预测方法 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(14): 15-24.
- [10] 谢福贵, 梅斌, 刘辛军, 等. 一种大型复杂构件加工新模式及新装备探讨 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(19): 70-78.
- [11] 刘晓飞, 张堃, 王志刚, 等. 大型螺旋桨双机器人自动磨削系统的研究 [J]. 机电工程技术, 2020, 49(03): 30-32.

- [12] 刘祺, 郭梦娜, 山显雷, 等. 基于双混联机器人的镜像铣削系统运动学分析与加工路径生成方法 [J]. 航空制造技术, 2024, 67(05): 46-52.
- [13] 熊伟尉, 毛永杰, 高雪峰, 等. Cfrp构件双机器人激光复合铣边技术研究 [J]. 南京理工大学学报, 2024, 48(06): 692-698.
- [14] KUKA. Mobile robot[EB/OL]. <https://www.kuka.com/en-cn/products/mobility/mobile-robot-systems/kmr-quantec> [Z]. 2019-10-23.
- [15] Wen K, Zhang Z, Zhang J, et al. A multi-objective optimization method of a mobile robot milling system construction for large cabins [J]. Applied Sciences, 2023, 13(4): 2288.
- [16] Ge J, Deng Z, Wang S, et al. Automated grinding system and method for robotic weld seams based on point cloud [J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(07): 1253.
- [17] Hsueh I-C, Lan Y-H, Lin D-H, et al. A compact compliant robot for the grinding of spherical workpieces with high force control accuracy [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2025, 91: 102856.
- [18] Li M, Du Z, Ma X, et al. System design and monitoring method of robot grinding for friction stir weld seam [J]. Applied Sciences, 2020, 10(8): 2903.
- [19] Liu Q, Liu H, Xiao J, et al. Open-architecture of cnc system and mirror milling technology for a 5-axis hybrid robot [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2023, 81: 102504.
- [20] Ding B, Kong J, Wang W, et al. Investigation on a semi-active vibration attenuation device with follow-up support technology for mirror milling of thin-walled workpieces [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 224: 112053.
- [21] Wu B, Zheng Z, Wang J, et al. Layout optimization of auxiliary support for deflection errors suppression in end milling of flexible blade [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(5): 1889-1905.

- [22] Zhang S, Ma J, Wang S, et al. Milling force prediction of inclined rib with low rigidity in milling process of hollow thin-walled structural parts [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127(1): 815-830.
- [23] Ma J, Zhang S, Ma F, et al. Research on prediction model of slot milling forces for hollow thin-walled welded structural parts [J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2023, 17(5): JAMDSM0056-JAMDSM0056.
- [24] Li L, Wang Z, Zhu G, et al. Position - based force tracking adaptive impedance control strategy for robot grinding complex surfaces system [J]. Journal of Field Robotics, 2023, 40(5): 1097-1114.
- [25] Xu D, Lu X, Xu B. Design and modeling of a passive magnetic vibration absorber for robotic polishing process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 95: 204-216.
- [26] Dai J, Chen C-Y, Zhu R, et al. Suppress vibration on robotic polishing with impedance matching [C], Actuators, 2021, 10(3): 59.
- [27] Dai S, Liu S, Ji W, et al. Vibration suppression in macro-micro grinding system of aeroengine blade based on impedance compensation prediction control strategy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(1): 793-807.
- [28] 祁若龙, 姚凤阳, 刘殿海, 等. 机器人磨削力控变速积分自适应阻抗控制 [J]. 机器人, 2025: 1-10.
- [29] Zhu Z, Zhang H, Liu G, et al. Adaptive variable impedance force/position hybrid control for large surface polishing [J]. Industrial Robot: the international journal of robotics research and application, 2024, 51(5): 747-760.
- [30] Zhang H, Li L, Zhao J, et al. The hybrid force/position anti-disturbance control strategy for robot abrasive belt grinding of aviation blade base on fuzzy pid control [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,

- 2021, 114(11-12): 3645-3656.
- [31] Liu J, Zhang J, Li J, et al. Research on fuzzy impedance force control technology of robot-assisted abrasive cloth wheel polishing blade [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127(5): 2537-2551.
- [32] Xie F, Chong Z, Liu X-J, et al. Precise and smooth contact force control for a hybrid mobile robot used in polishing [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2023, 83: 102573.
- [33] Jia Y-Q, Wang C, Zhang R-F, et al. A double shape memory alloy damper for structural vibration control [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2021, 21(07): 2150098.
- [34] Djemal F, Chaari R, Gafsi W, et al. Passive vibration suppression using ball impact damper absorber [J]. Applied Acoustics, 2019, 147: 72-76.
- [35] Zhang J, Zhao L, Li L, et al. Design of passive constant-force end-effector for robotic polishing of optical reflective mirrors [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35(1): 141.
- [36] Wan S, Li X, Su W, et al. Active chatter suppression for milling process with sliding mode control and electromagnetic actuator [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 136: 106528.
- [37] Chen F, Zhao H, Li D, et al. Contact force control and vibration suppression in robotic polishing with a smart end effector [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 57: 391-403.
- [38] Zhang X, Sun Y. Development of pneumatic force-controlled actuator for automatic robot polishing complex curved plexiglass parts [J]. Machines, 2023, 11(4): 446.
- [39] 张国龙, 杨桂林, 邓益民, 等. 三平动力控末端执行器鲁棒自适应力跟踪导纳控制方法 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(01): 71-81.
- [40] Bozorgvar M, Zahrai S M. Semi-active seismic control of a 9-story benchmark building using adaptive neural-fuzzy inference system and fuzzy cooperative

- coevolution [J]. *Smart Structures and Systems*, 2019, 23(1): 1-14.
- [41] Deng Z, Wei X, Li X, et al. Design and multi-objective optimization of magnetorheological damper considering vehicle riding comfort and operation stability [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2022, 33(9): 1215-1228.
- [42] Warke V, Kumar S, Bongale A, et al. Enhancement of tool life using magnetorheological fluid damping and tool wear prediction through deep learning model in milling [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, 137: 109265.
- [43] YongLiang Z, KeYi W, ShuaiShuai Z. Research on milling of weak stiffness parts based on magnetorheological fluid auxiliary support [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2022, 44(5): 1057-1063.
- [44] Jiang X, Zhang Y, Lu W, et al. Characteristics of shear stress based on magnetorheological fluid flexible fixture during milling of the thin-walled part [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 108(7-8): 2607-2619.
- [45] Bo Q, Wang P, Hou B, et al. Mirror supporting device based on magnetorheological fluid and control strategy based on force signal feedback for mirror milling [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 212: 111309.
- [46] Saleh M K, Nejatpour M, Acar H Y, et al. A new magnetorheological damper for chatter stability of boring tools [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 289: 116931.
- [47] Jiang X, Wu K, Zhang Y, et al. Improved vibration suppression modeling for reinforcement clamping by eco-friendly magnetorheological fluid during milling of annular thin-walled workpiece [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2022, 9(6): 1511-1526.
- [48] Sridhar R, Rajenthirakumar D. Development of mr fluid assisted novel vibration damping fixture for milling machine [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023.

- [49] Zhang L, Zhang C, Fan W. Robotic magnetorheological finishing technology based on constant polishing force control [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(8): 3737.
- [50] Hou M, Shi J, Cao H. Chatter suppression for robotic milling using a novel magnetorheological fluid absorber [J]. *MM Science Journal*, 2023: 6881-6886.
- [51] Xu D, Hu T. Modelling and vibration control of magnetorheological-based polishing tool for robotic polishing process [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 195: 110290.
- [52] Hu G, Wu L, Deng Y, et al. Optimal design and performance analysis of magnetorheological damper based on multiphysics coupling model [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 558: 169527.
- [53] 何川. 流体力学 [M]. 重庆大学出版社, 2018.
- [54] 晏茂森. 基于压力增强的挤压模式磁流变减振器中高频隔振性能研究 [D]. 重庆大学, 2022.
- [55] 叶青, 姜笑, 张垚, 等. 考虑响应时滞的磁流变半主动悬架 h_∞ 控制与试验研究 [J]. *机械工程学报*, 2024, 60(18): 276-287.
- [56] 黄腾逸. 磁流变悬架系统模型修正与阻尼器性能及优化研究 [D]. 南京航空航天大学, 2020.
- [57] Wang D, Fan H, Xu D, et al. Research on grinding force of ultrasonic vibration-assisted grinding of c/sic composite materials [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(20): 10352.
- [58] Yin C, Zhou Z. Concise and quick reference manual of machining process [M]. Beijing, China: Chemical Industry Press, 2017.
- [59] Qiu Z-C, Wang T-X, Zhang X-M. Sliding mode predictive vibration control of a piezoelectric flexible plate [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2021, 32(1): 65-81.
- [60] Liu Y, Wu L, Lu E, et al. Vibration coupling characteristics and grinding force control of an elastic component grinding system [J]. *Mechanical Sciences*, 2024,

- 15(1): 123-136.
- [61] Singiresu S R. Mechanical vibrations, 5th ed. [M]. 5th ed. New York, NY, USA: Pearson Education Inc, 2011.
- [62] Liu Y, Tang D, Ju J. Electromechanical coupling dynamic and vibration control of robotic grinding system for thin-walled workpiece [C], Actuators, 2023, 12(1): 37.
- [63] 何瀚文. 墙面打磨机器人打磨执行器研制及减振特性研究 [D]. 广州大学, 2023.
- [64] Dong J, Shi J, Ma Z, et al. Research of the flc+ pid switching control strategy based on real-time error for the pneumatic polishing force regulating system [J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2024, 51: 101659.
- [65] Izadbakhsh A, Khorashadizadeh S. Single-loop pid controller design for electrical flexible-joint robots [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42(2): 91.

攻读硕士学位期间的主要学术成果

1.发表的学术论文

- [1] Design and analysis of magnetorheological damping vibration isolation device for robotic grinding system [J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2025. (SCI:001454364800001) (第二作者, 导师第一)
- [2] Research on vibration control in robotic grinding based on magnetorheological damping. (在投, 第二作者, 导师第一)

2.申请的知识产权

- [1] 一种机器人柔顺磨抛装置 [P]. 发明专利: ZL202410138418.2, 2025, 授权, 第二发明人(导师第一)。
- [2] 一种具有减振功能的变刚度联接装置及其使用方法 [P]. 发明专利: ZL202410138420.X, 2025, 授权, 第二发明人(导师第一)。
- [3] 一种机器人磨抛装置 [P]. 实用新型: ZL202420377924.2, 2024, 授权, 第二发明人(导师第一)。
- [4] 一种电磁驱动的机器人柔顺搬运装置及其使用方法 [P]. 发明专利: CN118003359A, 2024, 实审, 第二发明人(导师第一)。

3.参与的科研项目

- [1] 安徽省高校优秀青年科研项目: 弹性薄壁构件机器人磨抛系统柔顺交互控制机理研究, 2023AH030018。
- [2] 芜湖市科技项目(重点研发项目): 多源数据驱动的化纤纺丝高质高效智能落筒关键技术、装备研发及应用, 2022yf57。

致谢

时光荏苒，三年的研究生生活即将画上句号。在这段充满挑战与收获的旅程中，我深感幸运，因为有众多老师、同学、朋友及家人的陪伴与支持。在此，我谨向他们致以最诚挚的谢意！

首先，我要向我的导师刘玉飞老师表达深深的敬意和感谢。刘老师不仅在科研上为我提供了严谨的指导和宝贵的建议，更在生活上给予了我无微不至的关怀。他的学识渊博、视野广阔，为我打开了学术的大门，引领我在研究道路上稳步前行。从论文的选题到最终的撰写，每一步都离不开刘老师的精心指导。他的钻研精神和治学态度将永远是我学习的榜样。同时，我也要感谢课题组的鞠锦勇老师。在课题研究过程中，他始终关注我的进展，提供了许多专业的指导意见和帮助，使我在科研道路上少走了许多弯路。

此外，我还要感谢我的师兄吴朗、陈洋洋、纪旭阳以及严志川在科研和生活中给予我的悉心指点；感谢同门朱祖浩、包琪、金文丽的共同努力和相互支持，他们的刻苦学习和专心科研激励着我不断前进；感谢师弟王东、丁成龙、刘晓佳的并肩作战和共同进步，他们的陪伴让我的研究生生活更加充实和有意义；感谢室友赵恒、杨龙在生活上的关心和帮助，让我的三年科研生活更加丰富多彩。

最后，我要向我的父母和家人表达最深切的感谢。是你们一直在我身后默默支持、鼓励和理解我，让我能够专心致志地完成学业。无论我遇到什么困难和挑战，你们总是我最坚实的后盾和最温暖的港湾。

再次感谢所有帮助过我的人！这份感激将永远铭记在我心间，成为我未来前行的动力。

尚德敏学 唯实惟新

