

分类号: TH113

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2210120131



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 弹性构件机器人磨抛系统振动
耦合特性及控制策略研究

论 文 作 者 吴朗
校 内 导 师 刘玉飞（副教授）
校 外 导 师 崔岩
专业学位类别 机械
研究方向（领域） 机器人动力学与控制

论文提交日期: 2024 年 6 月 7 日

分类号：TH113

学校代码：10363

密 级：公开

学 号：2210120131

安徽工程大学

弹性构件机器人磨抛系统振动耦合特性 及控制策略研究

RESEARCH ON VIBRATION COUPLING CHARACTERISTICS AND CONTROL STRATEGY OF ROBOT GRINDING SYSTEM FOR ELASTIC COMPONENTS

学 生 姓 名： 吴朗

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：吴 钢

日期：2024 年 6 月 7 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：



日期： 2024 年 6 月 7 日

指导教师签名：



日期： 2024 年 6 月 7 日

弹性构件机器人磨抛系统振动耦合特性及控制策略研究

摘要

航空航天、高铁车身、风电叶片等领域存在大量的弹性构件。磨抛是弹性构件制造加工和性能维护表面涂层去除的重要工序，由于弹性构件的低刚度特征，在磨抛过程中极易发生弹性振动。基于机器人技术的弹性构件磨抛系统是典型的多维耦合系统，机器人通过磨抛装置与弹性构件之间存在动态交互作用。因此，需要揭示弹性构件机器人磨抛系统存在的振动耦合特性，在此基础上开展机器人磨抛振动控制及恒力控制研究。本文的研究内容主要包括：

（1）弹性构件机器人柔顺磨抛装置设计。根据磨抛系统构成分析，设计一种弹性构件机器人柔顺磨抛装置，在此进行柔顺磨抛装置伺服控制系统设计，通过搭建气缸流量连续性方程、气动伺服阀气体质量流量方程及气动力平衡方程，建立控制输入量与气缸输出力之间的理论模型，并对弹性构件机器人磨抛气动伺服控制系统稳态误差进行分析。

（2）弹性构件机器人磨抛系统振动耦合特性分析。构建弹性构件等效刚度弹性约束模型，在此基础上建立弹性构件磨抛系统的刚柔耦合动力学模型。基于系统的刚柔耦合动力学模型，分析弹性构件磨削过程存在的弹性振动行为，以及弹性构件振动耦合下磨削力的波动特性，揭示弹性构件弹性振动与磨削力之间存在的耦合关系，为弹性构件机器人磨抛控制策略设计提供基础。

（3）弹性构件机器人磨抛控制策略设计。设计弹性构件机器人磨抛系统磨抛恒力控制及振动控制的 PID 控制器和滑模变结构控制器，搭建控制策略理论仿真模型和联合仿真实验，通过虚拟样机联合仿真实验分析不同磨削参数下弹性构件振动抑制特性，验证控制策略的有效性。

（4）弹性构件机器人磨抛实验研究。搭建弹性构件机器人磨抛实验系统，开展弹性构件机器人磨抛实验测试分析，验证本文设计的弹性构件机器人磨抛恒力控制及振动控制策略的有效性。

关键词：弹性构件，机器人磨抛，耦合动力学，振动特性，恒力控制

RESEARCH ON VIBRATION COUPLING CHARACTERISTICS AND CONTROL STRATEGY OF ROBOT GRINDING SYSTEM FOR ELASTIC COMPONENTS

ABSTRACT

There are a large number of elastic components in aerospace, high-speed rail body, wind power blade and other fields. Grinding and polishing is an important process of surface coating removal in the manufacture and performance maintenance of elastic components. Due to the low stiffness of elastic components, elastic vibration is easy to occur during grinding and polishing. The grinding and polishing system of elastic component based on robot technology is a typical multi-dimensional coupling system, and there is dynamic interaction between the robot and the elastic component through the grinding and polishing device. Therefore, it is necessary to reveal the vibration coupling characteristics of the robot grinding and polishing system of elastic components, based on which the research on vibration control and constant force control of the robot grinding and polishing system is carried out. The research content of this paper mainly includes:

(1) Flexible grinding and polishing device design of flexible component robot. According to the analysis of the composition of the grinding and polishing system, a flexible grinding and polishing device of an elastic component robot is designed. The servo control system of the flexible grinding and polishing device is designed here. By establishing the cylinder flow continuity equation, the gas mass flow equation of the pneumatic servo valve and the aerodynamic balance equation, a theoretical model between the control input and the output force of the cylinder is established. The steady-state error of pneumatic servo control system for grinding and polishing robot with elastic components is analyzed.

(2) Analysis of vibration coupling characteristics of robot grinding and polishing system for elastic components. The elastic constraint model of the equivalent stiffness of the elastic member is established, and the rigid-flexible coupling dynamic model of the grinding and polishing system of the elastic member is established on this basis. Based on the rigid-flexible coupling dynamic model of the system, the elastic vibration behavior of the elastic component in the grinding process and the fluctuation characteristics of the grinding force under the vibration coupling of the elastic component are analyzed, and the coupling relationship between the elastic vibration and the grinding force is revealed, which provides the basis for the design of the robot grinding and polishing control strategy of the elastic component.

(3) Design of grinding and polishing control strategy for elastic component robot. PID controller and sliding mode variable structure controller for grinding constant force control and vibration control of elastic component robot grinding and polishing system were designed, and theoretical simulation model and co-simulation experiment of control strategy were built. The vibration suppression characteristics of elastic component under different grinding parameters were analyzed through virtual prototype co-simulation experiment, and the effectiveness of control strategy was verified.

(4) Experimental study on robot grinding and polishing of elastic components. The experimental system of robot grinding and polishing of elastic components was built, and the experimental test and analysis of robot grinding and polishing of elastic components were carried out to verify the effectiveness of the constant force control and vibration control strategies designed in this paper.

KEY WORDS : Elastic component, Robot grinding, Coupling dynamics, Vibration characteristic, Constant force control

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
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
1.2.1 课题研究背景.....	1
1.2.2 课题研究意义.....	2
1.3 国内外研究现状.....	3
1.3.1 机器人加工装备应用研究现状.....	3
1.3.2 机器人磨削恒力控制研究现状.....	4
1.3.3 弹性构件振动控制研究现状.....	6
1.4 主要研究内容.....	6
1.5 本章小结.....	7
第二章 弹性构件机器人柔顺磨抛装置设计分析.....	8
2.1 系统构成.....	8
2.2 柔顺磨抛装置结构设计.....	9
2.2.1 工作原理.....	9
2.2.2 选型设计.....	11
2.3 柔顺磨抛装置伺服控制系统设计.....	12
2.3.1 气缸流量连续性方程.....	12
2.3.2 气动伺服阀质量流量方程.....	14
2.3.3 气缸力平衡方程.....	17
2.3.4 控制系统稳态误差分析.....	19
2.4 本章小结.....	21
第三章 弹性构件机器人磨抛系统振动耦合特性分析.....	22
3.1 弹性构件磨抛系统耦合动力学模型.....	22
3.1.1 弹性构件动力学模型.....	23
3.1.2 弹性构件等效刚度模型.....	25

3.1.3 有限元仿真.....	28
3.2 弹性构件磨抛系统振动耦合特性.....	30
3.3 本章小结.....	33
第四章 弹性构件机器人磨抛控制策略设计.....	34
4.1 基于 PID 的磨抛恒力控制策略	34
4.1.1 控制原理.....	34
4.1.2 控制器设计.....	35
4.1.3 结果分析.....	36
4.2 磨抛恒力控制联合仿真分析.....	39
4.2.1 联合仿真实验系统设计.....	39
4.2.2 结果分析.....	40
4.3 基于滑模变结构的磨削振动控制策略.....	41
4.3.1 滑模变结构控制设计.....	41
4.3.2 振动控制结果分析.....	43
4.3.3 磨削力控制结果分析.....	45
4.4 磨削振动控制联合仿真分析.....	48
4.4.1 联合仿真实验系统设计.....	48
4.4.2 振动控制结果分析.....	48
4.4.3 磨削力控制结果分析.....	50
4.5 本章小结.....	52
第五章 弹性构件机器人磨抛实验研究.....	54
5.1 实验系统搭建.....	54
5.1.1 实验平台的搭建.....	54
5.1.2 硬件设备选型.....	54
5.1.3 控制系统的设计.....	58
5.1.4 上位机程序设计.....	59
5.2 实验结果分析.....	61
5.2.1 实验方案.....	61
5.2.2 实验结果.....	62

5.3 本章小结.....	67
第六章 总结与展望.....	68
6.1 总结.....	68
6.2 展望.....	68
参考文献.....	70
攻读学位期间发表的学术论文目录.....	77
致谢.....	78

第一章 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，旨在对弹性构件机器人柔顺磨抛恒力控制开展研究。

1.2 课题研究背景及意义

1.2.1 课题研究背景

随着以智能制造为主导的第四次工业革命的到来，我国提出了《中国制造2025》战略，并指出深入实施创新驱动发展作为制造业向智能化发展的主攻方向，是我国由“制造大国”向“制造强国”迈进的重要途径^[1-3]，机器人的研发、制造和应用是一个国家制造业水平的重要体现。工业机器人作为高端制作装备的重要组成部分，有效提高了生产效率，广泛应用在各个领域，如机器人打磨抛光、钻孔、去毛刺、焊接、装配、清洁等工业应用中^[4,5]。磨削加工作为零件生产实现质量要求最重要的一道工序，目前主要采用数控磨床，对于复杂的工件采用人工打磨^[6,7]。工业机器人的应用将制造过程简单化，智能化，实现低成本高质量生产^[8]。

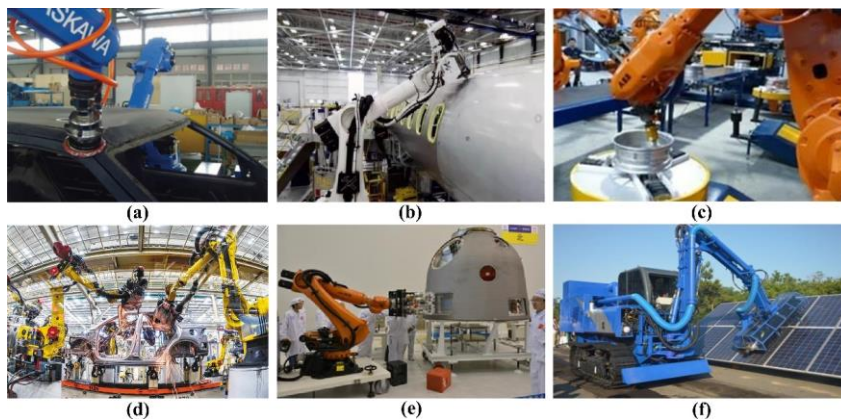


图 1-1 典型机器人工业应用

(a)打磨 (b)钻孔 (c)去毛刺 (d)焊接 (e)装配 (f)清洁

传统的磨削加工主要采用人工或磨床进行加工，以达到工件表面质量要求。在机床磨削加工中，虽然机床加工精度高，但是机床结构尺寸大，不能移动，只能在固定的地点进行磨削作业，并且对工件加工尺寸有一定的限制。随着制造业高速发展，大型一体的弹性构件应用越来越广泛，加工要求越来越高，针对大型构件，需要制造与之相匹配的大型磨床进行加工作业，极大的增加了加工成本。现阶段针对大型构件磨削作业主要还是依赖人工磨抛，如图 1-2 所示。人工磨削在磨削过程中砂轮等磨削工具作用工件表面会产生火花、粉尘和噪音，工作环境恶劣，对操作人员的身体健康危害极大，并且由于操作人员技术水平存在差异性，会导致同一批零件加工质量参差不齐，成品一致性差，效率低下，人工成本和废品率较高等问题。

随着工业机器人的迅速发展，工业机器人被大量应用在航空航天，金属加工等自动化生产中。机器人磨削相较于人工打磨，能够保证成品磨削精度一致，可适应长时间作业，其辅助的吸尘系统大幅度改善了磨削作业环境，极大的提高了生产效率，降低了成本。对于大型复杂构件磨削加工作业，机器人高灵活性，能够自主准确寻位、精确定位与原位检测，实现复杂大型曲面的磨削，特别是在航空航天等领域核心构件，该类构件通常结构尺寸大，形状复杂，刚性弱等特点，机器人磨削加工优势更加明显，已在工业领域应用广泛。如图 1-3 为机器人打磨风电叶片，结合了移动机器人与并联机器人的特点，通过导轨实现不同位置的磨削，保证了磨削精度一致，提高了工作效率。



图 1-2 人工打磨作业模式



图 1-3 机器人打磨作业模式

1.2.2 课题研究意义

随着智能制造的蓬勃发展，机器人应用越来越广泛。随着装备轻量化发展，弹性构件在生产制造过程的应用越来越广泛。由于弹性构件主要为薄壁结构，

具有刚度低显著特征，在磨削加工过程中极易发生振颤，磨削过程中弹性构件振动直接影响磨削力的波动特性，磨削接触力波动加剧弹性构件产生振动，影响工件加工质量。同时，由于机器人位置控制精度相对较低，刚度较大，且存在运动耦合关系。单纯的机器人控制不能满足弹性构件磨抛加工要求，需要通过增加末端柔顺关节装置，通过控制驱动系统来检测补偿磨削过程中的力的波动以及弹性构件的振动抑制。因此，研究弹性构件机器人磨抛系统振动耦合特性，揭示弹性构件磨削恒力控制与振动抑制之间的耦合关系具有重要意义。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 机器人加工装备应用研究现状

1959 年，德沃尔和美国发明家约塞尔·英格伯格发明制造了世界上第一台工业机器人，并命名为“UNIMATE”^[9]，并成立了世界上第一家工业机器人制造工厂 Unimation 公司，制造了世界上第一批商业化工业机器人，从此掀起了全世界对机器人的研究热潮。工业机器人经过几十年的发展，已经取得了巨大成就，并且在各个领域应用越来越广泛。Xiong 等人^[10]介绍了一种将五轴数控刀具路径转化为工业机器人轨迹的姿态的优化方法，并提出一种新的性能指标评估机器人特定姿态的刚度，提高了机器人的加工精度。如图 1-4 所示，张云志^[11]等人基于 AGV 搭载机器人可移动机翼装配数字化制孔系统，通过集成各子系统控制，实现了大飞机翼盒复合式机器人精准自动化制孔作业，并在航空制造中初步应用。德国 Metrom 公司^[12]开发了一种具有全并联结构且能实现五轴联动加工的工业机器人，如图 1-5 所示，该机器人实现了移动式加工和姿态耦合运动，提高了机器人加工精度。Yang 等人^[13]针对大型复杂构件加工提出一种可行走的并联机器人，兼备了移动机器人与并联机器人的特点。Tian 等人^[14]结合串联机器人与并联机器人的特点，设计了一种三自由度膝关节磨削机器人，提高全膝关节置换术中机器人辅助研磨的准确性。Zhu 等人^[15]设计了一种用于去除螺旋焊管末端外缝和内缝焊道的磨削机器人，提出了一种半闭环运动控制方法，提高了机器人研磨焊接管的可达性和灵活性。相比单机器人制造单元，多机器人协作能够实现多种加工需求，完成复杂的加工任务，如 KUKA 研制了一套飞机蒙皮多机器人装配系统^[16]，采用多机协作的方式，提高了工作效率，如图 1-6

所示。丁汉院士团队首次建立了大型风电叶片磨抛系统，提高了风电叶片打磨效率，提高了叶片打磨质量^[17]。谢富贵等人^[18]基于吸附式机器人和移动式机器人提出了一种多机协同原位加工模式，完成了大型复杂构件的加工，并能够完成自主准确定位加工作业及原位质量检测，实现大型复杂构件的多安装面并行铣削、制孔与打磨等加工，如图 1-7 所示。



图 1-4 并联机器人的移动式加工中心



图 1-5 Metrom 加工机器人



图 1-6 KUKA 飞机蒙皮制孔系统



图 1-7 多机协同原位加工新模式

1.3.2 机器人磨削恒力控制研究现状

与传统人工磨削和机床磨削方式相比，机器人磨削具有柔性化程度高、成本低等特点，尤其是在大型工件的制造加工中具有显著优势。对于机器人打磨、去毛刺^[19-21]、抛光^[22-24]等接触式加工作业，恒力控制是需要解决的关键问题之一。为实现机器人加工的恒力控制，目前主要采用 2 种方式^[25]：一种是主动控制，即通过机器人本体来实现力的控制；另一种是被动控制，通过在机器人末端增加一个柔顺装置，机器人实现位置控制，末端装置实现力的控制。

通过机器人本体实现恒力控制的主动控制，机器人本体存在力控制与位置控制的耦合关系，增加了控制的难度，很多学者对此进行了研究。Tian^[26, 27]基

于位置的显式力控制以及弹性海绵盘倾斜抛光工具的方法，建立了主动和被动顺应控制抛光模型，对提出的力-位置姿态解耦控制抛光策略进行机器人曲面自动抛光实验测试，实现了机器人磨削恒定力控制。Ding^[28]根据表面材料的去除原理，提出了一种基于表面法向量调节主轴速度的方法，并研究了抛光系统的刚度对力的跟踪性能的影响，通过位置的自适应力-位置混合控制算法，实现稳定的力控制和精确的位置控制。Dong^[29]提出一种基于内关节扭矩控制器的混合位置/力控制方法，缓解了偏心旋转抛光机扭矩信号的强烈振动扰动，实现了机器人在曲面实际抛光中的精确力控制。Zhang^[30]基于模糊 PID 力控制的混合力/位置控制策略，针对效率低、表面质量差的磨削叶片，提出了多源参数重力补偿算法来识别机器人磨削系统的未知参数，实现主动力的控制。Xu^[31, 32]提出了一种六维力/力矩传感器 PI/PD 主动控制方法，和一维力传感器 PID 被动控制方法，有效减小了机器人砂带磨削涡轮过切和欠切现象，实现了混合力控制。

被动柔顺控制能够降低对机器人本体的控制精度要求，实现力与位置控制的解耦，近年来在机器人加工力控制中得到广泛关注。Zhao^[33]设计了一种气动柔性抛光施力机构，并提出了一种双模切换复合自适应控制策略，实现了抛光力的高精度控制。Du^[34]针对使用倾斜抛光盘对弯曲部件进行自动抛光，设计了集成力传感器的柔性末端执行器，并开发了一种基于计算机辅助设计/计算机辅助制造的多轴机器人后处理器，通过设计的自适应抗饱和积分分离模糊 PI 控制器，实现了机器人抛光接触力的控制。Mohammad^[35, 36]提出了一种自动抛光的力控制末端执行器的新设计方法，将末端执行器集成在一个微型机器人抛光单元中，通过控制线性空心音圈执行器伸缩，减少可能导致的振动惯性效应，实现抛光力的控制。Chen^[37]提出了一种新型的智能末端执行器，将力传感器和设计的两个新颖的涡流阻尼器集成到智能末端执行器中，改善了系统动力学并抑制振动，实现了接触力控制和主轴的振动抑制。Wang^[38]设计了一种以气动人工肌肉与一对弹簧驱动的四杆连接机构为核心部件，将其集成到机器人磨削工作单元中的新型力控制末端执行器中，并基于力控制的薄壁磨削振动控制方法，实现工件振动的抑制。Ding^[39]针对工业去毛刺控制工件接触力问题，利用折叠梁和双稳态梁机构，提出了一种基于正负刚度机构相结合的恒力机构，实现了力的控制。Zhou^[40]设计了一种电动驱动的线性末端执行器，基于自适应阻抗控

制的抛光机器人混合控制策略，实现了抛光加工的自适应力控制和位置跟踪控制。Wang^[41]设计了一种配备气动恒力执行器的并联机器人，通过理论、仿真分析以及实验验证的方法，对 4-UPS/RPS 并联研磨机器人的姿态、位置和力解耦进行了研究，验证恒力装置的可行性。

1.3.3 弹性构件振动控制研究现状

通过分析可以看出，已有关于机器人加工系统的力控制的研究主要针对刚性构件，而对于弹性构件的研究还较少。众所周知，诸如弹性薄壁结构的弹性构件的应用越来越广泛，而大型弹性构件的制造加工对制造系统柔性化要求较高，现有相关研究已经表明，弹性薄壁工件具有结构尺寸大、刚度低等特征，在加工过程中极易产生弹性振动^[42-44]，这对机器人磨削系统具有一定的挑战。针对弹性薄壁件的振动控制问题，Jin^[45]考虑刀具的螺旋角效应和薄壁零件的动态特性，提出一种薄壁铣削三维稳定波瓣的获取方法，采用高阶时域方法解决动态磨削系统的颤振稳定性问题。Wang^[46]通过夹具和切削参数优化，降低了薄壁工件在加工过程中的弹性变形，提高了弹性薄壁件的加工精度。Jia^[47]针对微尺度薄壁零件在高速微铣削中发生的颤振，建立了考虑薄壁零件和微铣刀具弹性挠度的微铣削薄壁零件微铣削力模型，为选择切削参数实现稳定切削提供了依据。Jiang^[48]设计了一种磁流变阻尼夹具抑制航天薄壁零件半主动加工过程中产生的振动，通过动力学实验和铣削加工实验验证模型的可行性和有效性。Liu^[49]建立了弹性构件与加工主轴之间的耦合动力学模型，揭示了弹性构件磨削加工系统存在的振动耦合行为，为开展弹性构件加工过程的振动耦合控制提供了基础。可以看出，弹性构件机器人磨削系统是一个多维耦合系统，弹性构件磨削过程的恒力控制问题需要考虑系统存在的耦合作用，这与刚性构件机器人磨削的恒力控制存在明显区别。

1.4 主要研究内容

本文针对弹性构件机器人磨抛恒力控制以及振动控制进行研究，主要内容如下：

- (1) 介绍了课题的研究背景及意义，阐述了机器人作业研究发展现状，从

机器人磨削加工装备、机器人磨抛恒力控制、弹性构件振动抑制三个方面进行分析，提出了弹性构件磨削存在的问题，在此基础上提出了本文的研究内容。

(2) 根据磨抛系统构成分析，设计一种弹性构件机器人柔顺磨抛装置，并对气动柔顺磨抛装置系统进行建模。通过气缸流量连续性方程、气动伺服阀气体质量流量方程和气动力平衡方程，建立了控制输入量与气缸输出力之间的理论模型，分析了气动伺服系统的稳定性，并对弹性构件机器人磨抛气动伺服控制系统稳态误差进行了分析，为下一步弹性构件机器人恒力控制及振动抑制研究奠定基础。

(3) 构建弹性构件等效刚度弹性约束模型，搭建弹性构件磨抛系统刚柔耦合动力学模型，研究弹性构件磨抛系统动力学特性及耦合机理，分析了弹性构件机器人磨抛系统振动耦合机理下磨削接触力的波动特性，揭示弹性构件振动与磨削力之间存在的耦合关系，利用 MATLAB/Simulink 软件求解弹性构件磨削耦合系统的响应特性。为后续控制策略设计及验证提供了理论基础。

(4) 根据弹性构件磨抛系统构成及弹性构件振动与磨削力之间的耦合关系，基于弹性构件机器人气动伺服控制系统，设计弹性构件机器人磨抛系统磨抛恒力控制及振动控制的 PID 控制器和滑模变结构控制器，搭建控制策略理论仿真模型和联合仿真实验，通过虚拟样机联合仿真实验分析不同磨削参数下弹性构件振动抑制特性，验证控制策略的有效性。

(5) 搭建弹性构件机器人磨抛实验系统，开展弹性构件机器人磨抛实验测试分析，验证本文设计的弹性构件机器人磨抛恒力控制及振动控制策略的有效性。

(6) 总结与展望，对本文研究内容进行总结，对课题后期研究进行展望。

1.5 本章小结

针对弹性构件机器人打磨现阶段存在的问题，阐述了课题的背景及意义，分析了机器人加工制造研究现状，对机器人磨削主动控制和被动控制两种方式进行了总结，对弹性构件磨削加工振动控制进行了介绍，分析了现阶段研究存在的不足，最后提出了本文的主要研究内容。

第二章 弹性构件机器人柔顺磨抛装置设计分析

现有的机器人磨抛恒力控制方法主要包括机器人主动控制^[50-53]和末端磨抛装置被动控制^[54,55]两种方式。本文针对弹性构件机器人磨抛系统存在的振动耦合行为以及磨削力控制问题，采用被动控制思想设计一种机器人柔顺磨抛装置及其伺服控制系统，为后续机器人磨抛系统的振动控制和恒力控制提供装置基础。

2.1 系统构成

如图 2-1 所示为弹性构件机器人磨抛系统，该磨抛系统主要包含了埃夫特工业机器人及控制箱、空气压缩机、上位机、柔顺装置控制器，气动磨抛装置、磨抛工具。

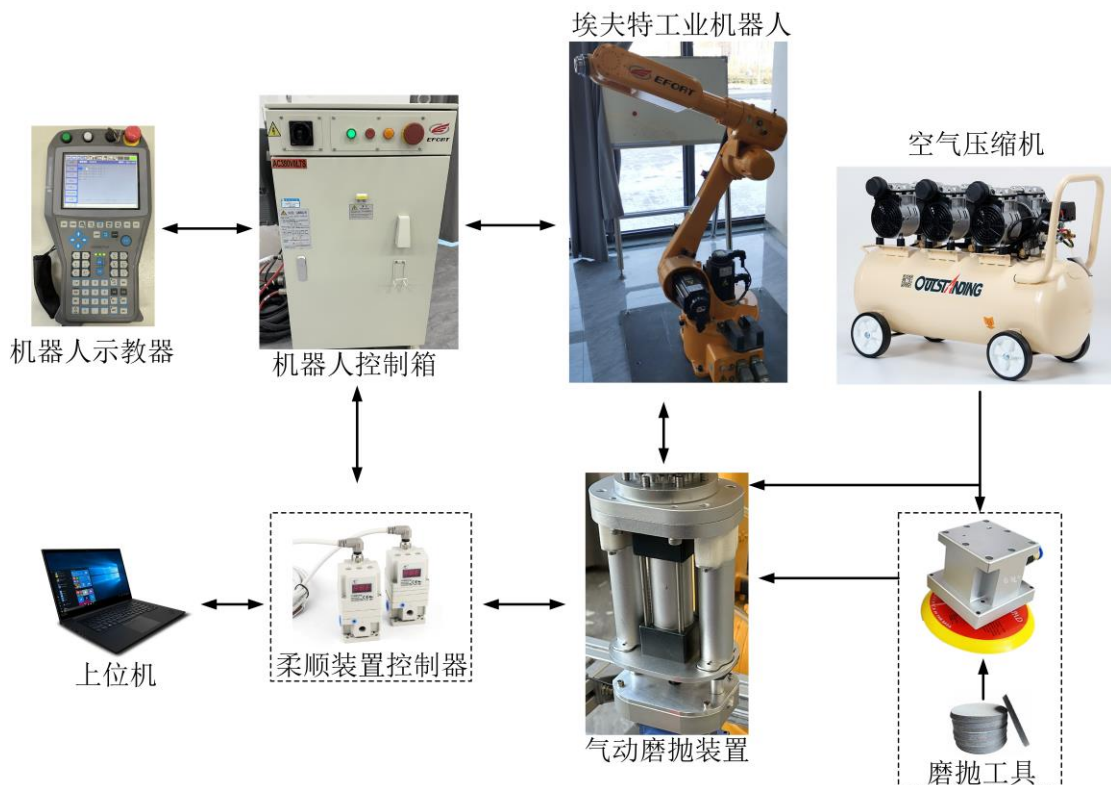


图 2-1 机器人磨抛系统图

在磨抛系统中，磨抛装置下端装有磨抛工具，上端通过设计的连接法兰安装于机器人末端，空气压缩机为气动打磨机和磨抛装置提供工作气源。系统的工作流程如下：根据弹性构件磨削加工要求设定机器人磨抛预定轨迹，获取磨

抛路径，在磨削过程中机器人根据规划好的路径位姿和速度运行。磨抛装置内置的压力传感器对磨抛工具末端接触力进行控制、检测和反馈，打磨机末端磨削接触力进行控制和检测反馈。当压力传感器检测反馈的数据比期望磨削力大时，控制磨抛装置减小压紧力，使接触磨削力在控制精度范围内稳定；当压力传感器检测反馈的数据比期望磨削力小时，控制磨抛装置增大压紧力，使接触磨削力在控制精度范围内稳定。因此，柔顺磨抛装置是实现机器人磨抛恒力控制的关键所在。

2.2 柔顺磨抛装置结构设计

2.2.1 工作原理

柔顺磨抛恒力装置的原理是针对弹性构件机器人磨削过程中发生剧烈振颤，导致磨削接触力产生波动，通过控制磨抛装置实现力的补偿，实现磨削接触力恒力控制，以及弹性构件振动抑制。本文所设计的磨抛装置能够随着弹性构件磨削位置变化实时对末端磨削接触力波动进行调节控制，实现弹性构件机器人磨抛恒力控制。弹性构件机器人磨削加工时，机器人实现预定磨抛轨迹，末端装置实现磨削接触力的控制。磨削加工过程中，磨削力控制精度越高，响应速度越快，磨削接触力波动越小，磨削加工效果越好。通过控制安装在机器人末端的磨抛装置，实现恒力磨削作业。根据磨削精度要求，力反馈装置性能指标如表 2-1 所示^[56]。

表 2-1 性能指标

性能	要求
力控制范围	0~100N
力控制精度	$\pm 1\text{N}$
响应时间	$\leq 100\text{ms}$
力控制分辨率	$\leq 0.5\text{N}$
位置调控范围	25mm

如图 2-2 所示为磨抛装置原理图，本文机器人末端磨抛装置采用缓冲气缸作为驱动单元，通过气缸输出压力补偿弹性构件磨削过程磨削接触力的波动以及抑制弹性构件振动。磨削过程中弹性构件极易产生弹性振动，导致磨削接触力发生变化，引起气缸腔内压力发生变化，受导向装置的约束，气缸输出力只

能沿着一个方向进行压缩和拉伸。当磨抛工具与弹性构件表面产生接触力，在上位机程序中设定一个期望磨削力，伺服阀开始工作给气缸提供气压，压力传感器将检测的磨削接触力大小反馈给上位机，在平衡状态时，通过伺服阀维持气缸两腔内压力保持不变，使磨削弹性构件磨削接触力恒定；当磨削接触力小于设定期望力时，伺服阀进气口打开，气缸腔内进气增加压力；当磨削接触力超过期望值时，伺服阀排气口打开，减小气缸腔内压力。弹性构件底端贴有压电片，通过数据采集卡将实时检测的振动数据反馈给上位机。气缸、伺服阀、压力传感器、振动位移传感器构成了弹性构件磨削接触力控制闭环。

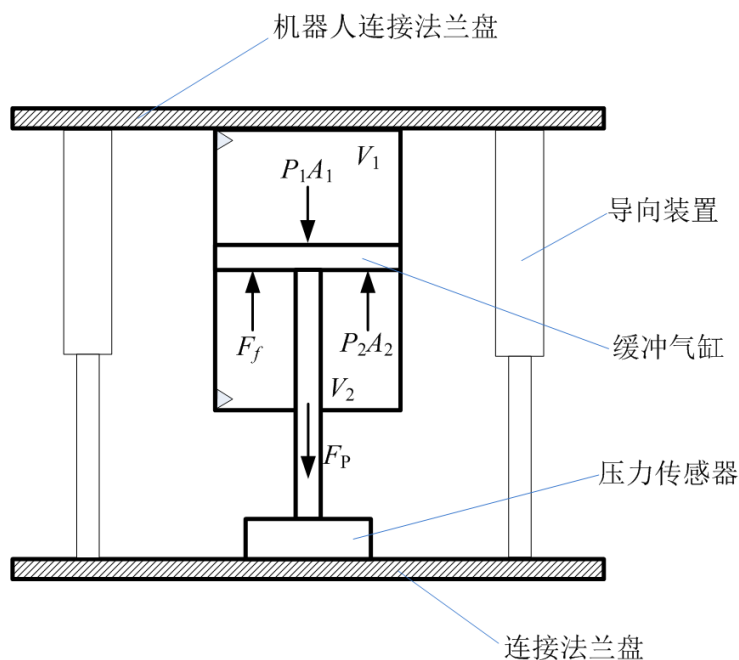


图 2-2 磨抛装置原理图

根据磨削原理要求所设计的恒力磨抛装置需要满足以下两个工作要求：

（1）在磨削过程中机器人运动位置发生变化时，恒力磨抛装置输出力也会随着机器人位姿变化而变化，所以磨抛装置需要对不同运动姿态下引起的力的波动进行补偿。

（2）磨削过程中在打磨机高频振动下会引起弹性构件发生剧烈振动，使得磨削力产生剧烈波动，由于弹性构件在不同位置的动态等效刚度不一致，弹性构件的变形量不同。磨抛装置的驱动装置若输出力过大，可能会导致弹性构件发生严重变形；若输出力过小，会导致磨削力不够达不到磨削要求。则磨抛装置应能补偿磨削过程中由弹性构件引起的磨削接触力的波动，实现恒力磨削。

2.2.2 选型设计

本课题选择缓冲气缸作为磨抛装置的驱动单件，通过控制缓冲气缸来实现弹性构件磨抛恒力控制。由于气动驱动元件相比电机元件结构简单，安装维修便捷，成本低廉，应用范围广泛。缓冲气缸工作行程选择范围广，可根据需要选择所需要的行程，并且能够适用于冲击振动负载较大的场合，能够产生稳定强大的推力。气缸输出力的大小和反应速度十分简单，缓冲气缸能够满足磨削过程中力的控制和补偿。综上所述，磨抛装置驱动元件选择缓冲气缸能够满足恒力磨削弹性构件应用场合。

本文设计的磨抛恒力装置，气缸输出力范围为 0~200N，实际磨削加工力控制范围在 2N 以内。磨削过程中，磨抛装置只能在一个自由度方向伸缩，通过控制气缸两腔气体压力变化，推动打磨机作用于工件，完成磨抛作业。

磨抛装置的气缸型号根据气缸输出力和气缸腔内压强确定，选择过程如下：

缓冲气缸理论输出推力：

$$F_0 = \mu_1 \frac{\pi}{4} D^2 P \quad (2.1)$$

缓冲气缸理论返回拉力：

$$F_{10} = \mu_2 \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) P \quad (2.2)$$

式中， D 为活塞直径，即气缸内径； d 为气缸活塞推杆直径； P 为气缸工作压力； μ_1 为伸出推力系数； μ_2 缩回推力系数；

为确保气缸磨削作业过程中稳定的安全性能，计算取气缸活塞直径 $D=25\text{mm}$ 。根据磨削作业实际环境气缸活塞伸缩量，取气缸活塞行程为 25mm。

根据磨削作业工况要求和气缸型号选择以及传感器性能设计恒力磨抛装置如图 2-3 所示恒力磨抛装置结构图，该装置主要包括了缓冲气缸、导向装置、压力传感器、与机器人相连接的法兰盘，打磨机连接板。导向装置内设有弹簧和橡胶阻尼来缓冲磨削冲击过程中的振动，并约束磨抛装置只能在一个方向伸缩调控。控制气缸元件有比例阀、调压阀、流量阀等气动元件。磨抛装置上端通过法兰盘与机器人末端相连接，磨削过程中力传感将磨削过程中实时检测到的磨削接触力，通过转换器将电压信号实时反馈给控制器，控制系统将采集到

的数据与预先设定的期望值作对比，控制器将比对的误差值进行调控，通过气缸输出推力，补偿磨削弹性构件磨削过程中力的波动，实现恒力磨削。

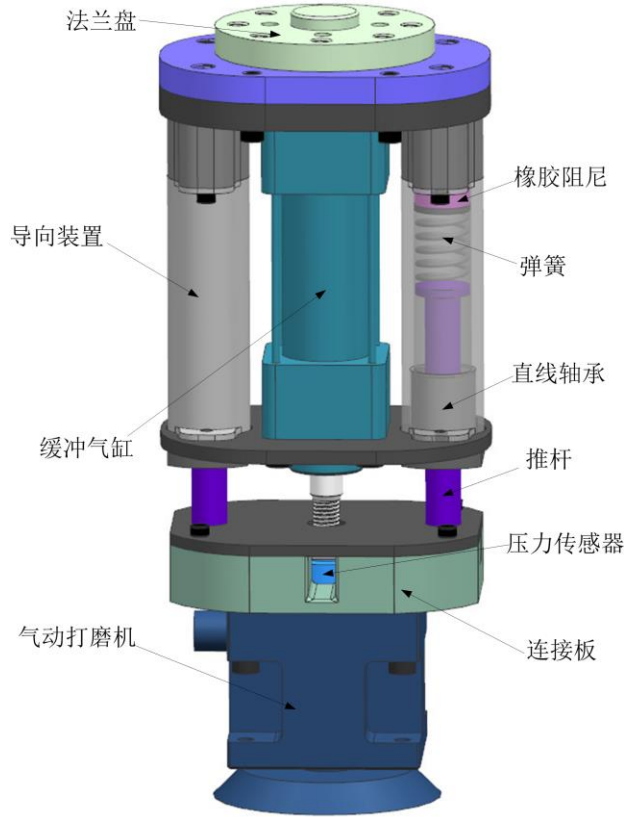


图 2-3 弹性构件机器人磨抛装置

2.3 柔顺磨抛装置伺服控制系统设计

为更好的分析机器人磨抛气动伺服系统特性，需要对气动伺服系统建立数学模型。由于气动伺服系统在控制过程中存在诸多干扰因素，在建立气动伺服动力学模型需要忽略一些影响因素，假设气体工作为理想状态。气动伺服系统建模如下。

2.3.1 气缸流量连续性方程

气体从电磁阀进入气管输入气缸，假设气缸两腔气体为理想气体，工作过程中，气缸内气体无热交换，气缸无泄漏，根据理想气体状态方程有

$$PV = mRT \quad (2.3)$$

式中， P 为气体绝对压力； V 为气体体积； m 为气体质量； R 为理想气体常数^[57]，取 $R = 287.1 \text{ N} \cdot \text{m} / (\text{kg} \cdot \text{K})$ ； T 为气体的绝对温度。

由式(2.3)可转化为

$$m = \frac{PV}{RT} \quad (2.4)$$

根据质量守恒定律，气缸两腔气体的质量流量为气缸腔内气体的质量变化率，即

$$\begin{cases} q_{m_1} = \frac{dm_1}{dt} \\ q_{m_2} = \frac{dm_2}{dt} \end{cases} \quad (2.5)$$

式中， q_{m_1} 为气缸无杆腔内的气体质量流量； q_{m_2} 为气缸有杆腔内的气体质量流量； m_1 为气缸无杆腔内气体质量； m_2 为气缸有杆腔的气体质量。

将式(2.4)带入式(2.5)得

$$\begin{cases} q_{m_1} = \frac{dm_1}{dt} = \frac{1}{RT} \left(P_1 \frac{dV_1}{dt} + V_1 \frac{dP_1}{dt} - \frac{P_1 V_1}{T_1} \frac{dT_1}{dt} \right) \\ q_{m_2} = \frac{dm_2}{dt} = \frac{1}{RT} \left(P_2 \frac{dV_2}{dt} + V_2 \frac{dP_2}{dt} - \frac{P_2 V_2}{T_2} \frac{dT_2}{dt} \right) \end{cases} \quad (2.6)$$

式中， P_1 为气缸无杆腔内的气体压力； P_2 为气缸有杆腔内的气体压力； T 为气缸的热力学温度； T_1 为气缸无杆腔内的气体温度； T_2 为气缸有杆腔内的气体温度。

在气体运动过程中，不计气缸运动摩擦损失，忽略伺服阀与气管内流量损失，气缸两腔内气体运动为等熵过程，则气体绝热方程为

$$P^{k-1} T^{-k} = C \quad (2.7)$$

式中， k 为气体绝热系数，气体为理想气体^[57]，取 $k=1.4$ 。

将式(2.7)两边对时间求导得

$$\frac{dT}{dt} = \frac{k-1}{k} \frac{T}{P} \frac{dP}{dt} \quad (2.8)$$

将式(2.8)带入式(2.6)整理分别得出气缸两腔内流量模型

$$\begin{cases} q_{m_1} = \frac{1}{RT_1} \left(P_1 \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_1}{k} \frac{dP_1}{dt} \right) \\ q_{m_2} = \frac{1}{RT_2} \left(P_2 \frac{dV_2}{dt} + \frac{V_2}{k} \frac{dP_2}{dt} \right) \end{cases} \quad (2.9)$$

假设气缸腔内的气体温度与环境温度和空气源温度相同，热力学变化腔内过程为准静态过程，则气缸两腔内温度是恒定的，可以用 T_0 表示，即

$$\begin{cases} q_{m_1} = \frac{1}{RT_0} \left(P_1 \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_1}{k} \frac{dP_1}{dt} \right) \\ q_{m_2} = \frac{1}{RT_0} \left(P_2 \frac{dV_2}{dt} + \frac{V_2}{k} \frac{dP_2}{dt} \right) \end{cases} \quad (2.10)$$

由公式(2.10)可得气缸两腔的压力动力学方程为

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = \frac{kRT_0}{V_1} q_{m_1} - \frac{kP_1}{V_1} \frac{dV_1}{dt} \\ \frac{dP_2}{dt} = \frac{kRT_0}{V_2} q_{m_2} - \frac{kP_2}{V_2} \frac{dV_2}{dt} \end{cases} \quad (2.11)$$

在机器人磨抛装置的气动伺服系统中，磨抛时的接触力恒定通过控制气缸输出来实现，机器人实现磨抛轨迹控制。忽略机器人的定位误差，打磨机砂盘与工件始终接触。在磨削弹性构件过程中，磨抛装置在垂直工件表面方向上变化很小，可忽略垂直方向上气缸活塞杆位移的微动变化，则气缸两腔内气体质量流动模型的数学表达式可简化为：

$$\begin{cases} q_{m_1} = \frac{1}{RT_0} \frac{V_1}{k} \frac{dP_1}{dt} \\ q_{m_2} = \frac{1}{RT_0} \frac{V_2}{k} \frac{dP_2}{dt} \end{cases} \quad (2.12)$$

2.3.2 气动伺服阀质量流量方程

图 2-4 为柔顺磨抛装置气体流通原理图。根据输入控制电压信号 u ，调控气缸腔内压力变化，产生输出力 F_p 。

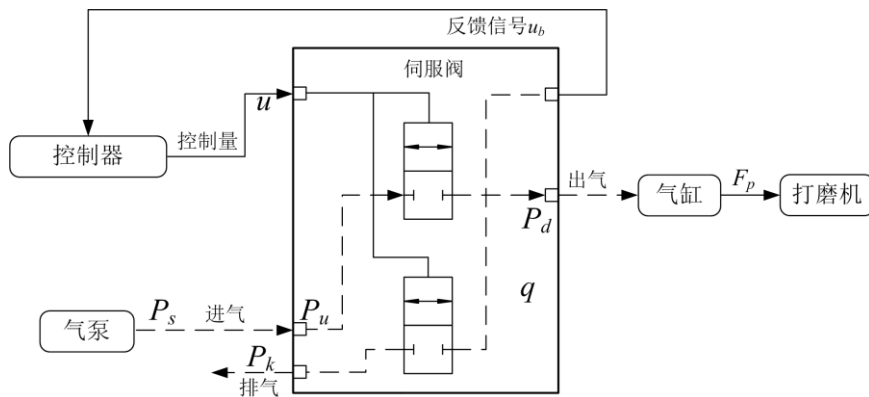


图 2-4 柔顺磨抛装置气体流通原理图

气体通过伺服阀的阀口的流动过程相对复杂。一般来说，气体通过比例伺服阀的阀口的流动过程被认为是理想气体的一维等熵流。伺服阀阀口流量与进气口、出气口的压强和阀口的开口大小有关。根据 Sanvile 流量公式^[58]，一个比例阀口的质量流量公式为

$$q_m = \mu A_t P_u \sqrt{\frac{2}{RT}} \Phi \left(\frac{P_d}{P_u} \right) \quad (2.13)$$

$$\Phi \left(\frac{P_d}{P_u} \right) = \begin{cases} \sqrt{\frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}} & 0 \leq \frac{P_d}{P_u} \leq 0.528 \\ \sqrt{\frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} & 0.528 \leq \frac{P_d}{P_u} \leq 1 \end{cases} \quad (2.14)$$

式中， A_t 为阀门端口的质量流量； R 为气体常数； P_u 比例调节阀进气口的绝对压力； P_d 为比例调节出气口的绝对压力。

伺服阀的开启区域为

$$A_t = \omega x_v \quad (2.15)$$

式中， x_v 为伺服阀阀芯位移； ω 为比例阀端口的面积梯度， $\omega = \pi D$ 。

将公式(2.15)带入公式(2.13)得

$$q_m = \mu \pi D x_v P_u \sqrt{\frac{2}{RT}} \Phi \left(\frac{P_d}{P_u} \right) \quad (2.16)$$

伺服阀进气口流量和出口流量可分别表示为

$$\begin{cases} q_{m_1} = \mu \pi D x_v P_s \sqrt{\frac{2}{RT}} \Phi \left(\frac{P_1}{P_s} \right) \\ q_{m_2} = \mu \pi D x_v P_2 \sqrt{\frac{2}{RT}} \Phi \left(\frac{P_k}{P_2} \right) \end{cases} \quad (2.17)$$

式中， P_s 为气源压力； P_1 为气缸无杆腔内气体压力； P_2 为气缸有杆腔气体压力； P_k 为大气压力。

由于比例阀阀芯位移与输入电压 u 为线性关系^[57]

$$x_v = K_u u \quad (2.18)$$

式中， K_u 为比例阀的增益系数。

将式(2.28)代入式(2.17)可以得到

$$\begin{cases} q_{m_1} = \mu\pi DK_u P_s \sqrt{\frac{2}{RT}} \Phi\left(\frac{P_1}{P_s}\right) \\ q_{m_2} = \mu\pi DK_u P_2 \sqrt{\frac{2}{RT}} \Phi\left(\frac{P_k}{P_2}\right) \end{cases} \quad (2.19)$$

从式(2.19)可以看出，阀口的实际流量与出风口的压力和电动伺服阀的控制电压有关，因此流量公式可以简化为

$$q_m = f(u, P) \quad (2.20)$$

从式(2.20)可以看出，流量公式是与控制电压 u 和阀出气口压强 P 有关的函数。其中 u 为伺服阀的控制电压，在零位附近对其线性化，可以得到伺服阀的流量增量模型为

$$\begin{cases} q_{m_1} = K_1 \Delta u - K_2 \Delta P_1 \\ q_{m_2} = K_3 \Delta u - K_4 \Delta P_2 \end{cases} \quad (2.21)$$

$$\text{式中} \left\{ \begin{array}{l} K_1 = \frac{\partial q_{m_1}}{\partial u} \bigg|_{\substack{u=0 \\ P_1=P_{10}}} = \mu\pi DK_u P_s \sqrt{\frac{2}{RT}} \sqrt{\frac{k}{k-1}} \left[\left(\frac{P_1}{P_s}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_1}{P_s}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right] = 0.1582 \\ K_2 = \frac{\partial q_{m_1}}{\partial u} \bigg|_{\substack{u=0 \\ P_1=P_{10}}} = 0 \\ K_3 = \frac{\partial q_{m_2}}{\partial u} \bigg|_{\substack{u=0 \\ P_1=P_{20}}} = \mu\pi DK_u P_2 \sqrt{\frac{2}{RT}} \sqrt{\frac{k}{k-1}} \left[\left(\frac{P_k}{P_2}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_k}{P_2}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right] = 0.134 \\ K_4 = \frac{\partial q_{m_2}}{\partial u} \bigg|_{\substack{u=0 \\ P_1=P_{20}}} = 0 \end{array} \right.$$

其中， P_{10} 、 P_{20} 为活塞处于平衡位置时气缸无杆腔和有杆腔的压力； Δu 为电压的变化； ΔP_1 为气缸无杆腔内压力的变化； ΔP_2 为气缸有杆腔内压力的变化。

分别对式(2.12)和(2.21)进行拉普拉斯变换得

$$\begin{cases} Q_{m_1}(s) = \frac{1}{RT_0} \frac{V_1}{k} s P_1(s) \\ Q_{m_2}(s) = \frac{1}{RT_0} \frac{V_2}{k} s P_1(s) \end{cases} \quad (2.22)$$

$$\begin{cases} Q_{m_1}(s) = K_1 U(s) \\ Q_{m_2}(s) = K_3 U(s) \end{cases} \quad (2.23)$$

由式(2.22)和(2.23)得

$$\begin{cases} \frac{P_1(s)}{U(s)} = \frac{RT_0 k K_1}{V_1 s} \\ \frac{P_2(s)}{U(s)} = \frac{RT_0 k K_3}{V_2 s} \end{cases} \quad (2.24)$$

根据式(2.24)可知柔顺磨抛装置气缸两腔内输入压强与伺服阀控制电压的关系模型，该模型与伺服阀参数、气体的特性参数等有关。

2.3.3 气缸力平衡方程

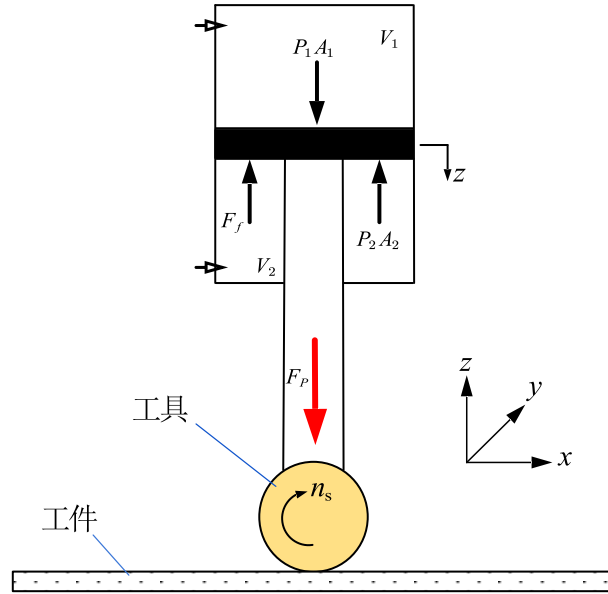


图 2-5 机器人末端恒力磨抛装置受力分析简图

如图 2-5 所示，对柔顺磨抛装置受力分析，根据牛顿第二定律^[59]，受力分析得：

$$M \frac{d^2 z}{dt^2} + C \frac{dz}{dt} + Kz = P_1 A_1 - P_2 A_2 - F_f - F_p \quad (2.25)$$

式中， M 为磨抛装置的总质量； C 是磨抛装置的等效阻尼， $C = C_p + 2c$ ； C_p 为气体的粘性阻尼系数； c 为橡胶的阻尼系数。 K 为磨抛装置的等效刚度， $K = K_p + 2k_t$ ， K_p 为气缸的弹簧刚度系数； k_t 为弹簧弹性系数； P_1 为气缸无杆侧腔

内压强； A_1 为气缸无杆侧受力面积； P_2 为气缸有杆侧腔内压强； A_2 为气缸有杆侧受力面积； F_f 为气缸工作时内部的摩擦力； F_p 为气缸输出力； z 为气缸活塞运动的位移。

忽略缓冲气缸活塞运动过程的摩擦力，式(2.25)可表示为

$$M \frac{d^2 z}{dt^2} + C \frac{dz}{dt} + Kz = P_1 A_1 - P_2 A_2 - F_p \quad (2.26)$$

对式(2.26)进行拉普拉斯变换可得

$$Ms^2 Z(s) + CsZ(s) + KZ(s) = P_1(s)A_1 - P_2(s)A_2 - F_p(s) \quad (2.27)$$

令 $F_p(s)=0$ ，由式(2.20)~(2.25)得到的气缸活塞位移和比例阀输入电压的传递函数为

$$\frac{Z(s)}{U(s)} = \frac{b_0}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s} \quad (2.28)$$

其中， $a_1 = (K_p + 2k_t)V_1 V_2$ ； $a_2 = (C_p + 2c)V_1 V_2$ ； $a_3 = MV_1 V_2$ ；

$b_0 = RT_0 k(K_1 A_1 V_2 - K_3 A_2 V_1)$ ； $K_p = 4kP_1 A_1 / l$ 。

令 $U(s)=0$ ，则气缸活塞位移与研磨力之间的传递函数为

$$\frac{Z(s)}{F_p(s)} = \frac{1}{Ms^2 + Cs + K} \quad (2.29)$$

假设气动伺服系统的输入力值等于气动伺服系统输出力值，且两者力的方向相反，则磨抛装置的载荷力与比例阀的输入电压之间的传递函数为

$$\frac{F_p(s)}{U(s)} = \frac{F_p(s)}{Z(s)} \frac{Z(s)}{U(s)} = \frac{(Ms^2 + Cs + K)b_0}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s} \quad (2.30)$$

柔顺磨抛装置气动伺服系统传递函数方框图如图 2-6 所示。

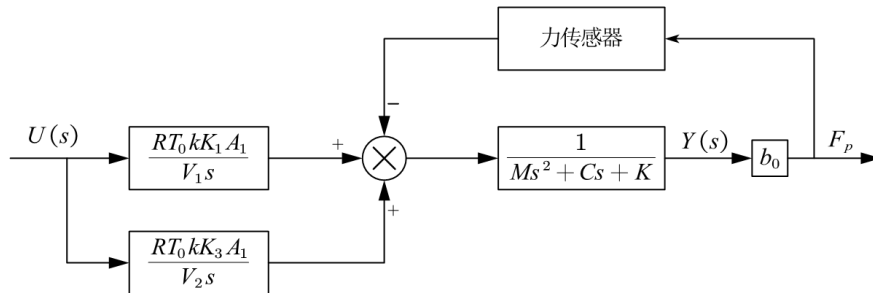


图 2-6 磨抛装置开环传递函数方框图

系统传递函数可表示为

$$G(s) = \frac{(Ms^2 + Cs + K)b_0}{a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s} \quad (2.31)$$

磨抛装置的输入控制量与输出力之间的模型如式(2.31)所示，由系统传递函数可知，该系统并为一个三阶系统。

根据 Hurwitz 准则，将式(2.31)的特征方程系数排列到 Hurwitz 矩阵中，得

$$H = \begin{bmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \cdots & 0 & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & a_n & a_{n-2} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_0 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

根据气动伺服系统传递函数得到系统的特征方程，则

$$\det(H_n) > 0 (n=1, 2, 3) \quad (2.33)$$

由于系统特征方程的各阶系数组成的 Hurwitz 矩阵各阶的主子式都大于零，因此系统是稳定的。

2.3.4 控制系统稳态误差分析

弹性构件机器人磨抛气动伺服系统的稳态误差决定了系统的准确性，该控制系统的稳定性与本身的结构参数和外部作用形式有关。为确保弹性构件机器人磨抛装置气动控制系统的稳定性，对气动伺服系统的稳定性误差进行分析。

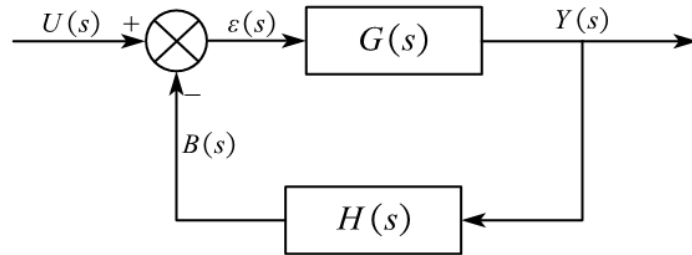


图 2-7 反馈控制系统方框图

定义系统的偏差信号为 $\varepsilon(s)$ ，如图 2-7 所示

$$\varepsilon(s) = U(s) - B(s) = U(s) - H(s)Y(s) \quad (2.34)$$

定义该系统的误差信号为 $E(s)$ ，则

$$E(s) = Y_r(s) - Y(s) \quad (2.35)$$

式中， $Y(s)$ 为控制系统的期望输出信号。

假定 $\varepsilon(s) = 0$ ，则 $Y_r(s) = Y(s)$ ，并带入式(2.32)得

$$Y_r(s) = \frac{U(s)}{H(s)} \quad (2.36)$$

根据式(2.34)-(2.36)得

$$E(s) = Y_r(s) - Y(s) = \frac{U(s)}{H(s)} - Y(s) = \frac{U(s) - H(s)Y(s)}{H(s)} = \frac{\varepsilon(s)}{H(s)} \quad (2.37)$$

控制系统的稳态误差值 e_{ss} 是系统误差信号 $e(t)$ 的稳态分量，即

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) \quad (2.38)$$

根据拉普拉斯变换的末端值定理，从式(2.38)中得到

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) \quad (2.39)$$

误差传递函数为

$$G_e(s) = \frac{E(s)}{U(s)} \quad (2.40)$$

联立(2.34)、(2.37)和(2.40)得

$$G_e(s) = \frac{1}{H(s)} \frac{1}{1 + G(s)H(s)} \quad (2.41)$$

根据公式(2.39)~(2.41)得

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sG_e(s)U(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{U(s)}{H(s)(1 + G(s)H(s))} \quad (2.42)$$

由上式可以看出，控制系统的稳态误差值取决于结构参数 $G(s)$ 和 $H(s)$ ，以及系统的输入信号 $U(s)$ 。

假设机器人磨抛装置的气动伺服控制系统忽略干扰，其力控制系统的输入信号为步进信号，因此 $U(s) = \frac{A}{s}$ ，其中 A 为输入信号的振幅值，则气动磨抛装置控制系统的稳态误差为

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{U(s)}{H(s)(1+G(s)H(s))} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{A}{H(s)(1+G(s)H(s))} \quad (2.43)$$

在单元反馈控制系统中，取 $H(s)=1$ 得

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{A}{1+G(s)} = 0 \quad (2.44)$$

通过分析控制系统稳态误差可以看出，气动磨抛装置控制系统是稳定的。

2.4 本章小结

本章针对弹性构件机器人磨抛振动控制和磨抛恒力控制功能需求，设计了弹性构件机器人柔顺磨抛装置，分析了磨抛装置的工作原理，建立了柔顺磨抛装置气动伺服系统模型，分析了机器人磨抛装置气动控制系统的稳定性，为后续弹性构件机器人恒力控制及振动抑制奠定基础。

第三章 弹性构件机器人磨抛系统振动耦合特性分析

弹性构件机器人磨抛系统是机器人、末端磨抛装置和弹性构件构成多维耦合系统，弹性构件振动与磨削接触力之间存在耦合关系。本章通过建立弹性构件磨抛系统刚柔耦合动力学模型，分析弹性构件机器人磨抛系统振动耦合特性以及振动耦合下弹性构件磨削力波动特性，揭示弹性构件磨抛系统存在的动态耦合行为，为弹性构件机器人磨抛恒力控制和弹性构件振动控制提供理论依据。

3.1 弹性构件磨抛系统耦合动力学模型

如图 3-1 所示，弹性构件机器人磨抛系统为一种多维耦合系统，磨削过程中弹性构件与磨抛装置存在动态交互作用，弹性构件振动对磨削力具有动态扰动作用，磨削接触力的波动对弹性构件振动有激励作用，磨削力的恒定控制是保证磨削质量的关键因素。在磨削过程中，通常由机器人控制磨抛轨迹，末端磨抛装置控制磨削力，以便实现系统的力位解耦控制。本节根据弹性构件机器人磨抛系统耦合原理，建立弹性构件磨抛系统耦合动力学模型，分析弹性构件磨削过程中的弹性振动特性以及弹性构件振动耦合下磨削力的波动特性，揭示弹性构件弹性振动与磨削力之间存在耦合关系。

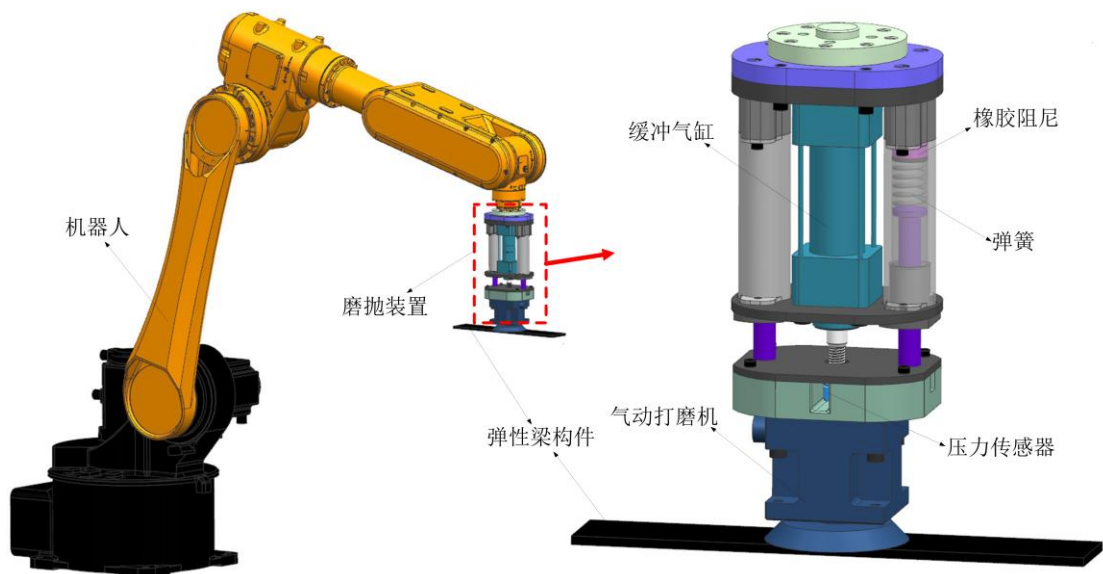


图 3-1 弹性构件机器人磨抛系统构成

3.1.1 弹性构件动力学模型

根据弹性构件机器人磨抛耦合系统构成，结合弹性构件磨削振动与磨削接触力之间的耦合关系，如图 3-2 所示，搭建弹性构件磨抛系统刚柔耦合动力学模型。本文采用弹性梁表征弹性构件，为了表征弹性构件振动对磨削力的扰动作用，建立弹性构件的弹性约束模型以表征其对磨削力的弹性扰动作用，假设弹性构件在磨削方向连续分布着线性约束弹簧，其等效刚度表示为 $k(x)$ ，且随着磨削位置的变化而变化，其橘色圆形表示简化的砂盘，磨削转速为 n_s ，假设在 $t=0$ 时，砂盘位于右侧固定端，磨削过程中砂轮以速度 v_ω 沿着工件方向移动，经过 t 时刻后，距初始端距离为 d 。

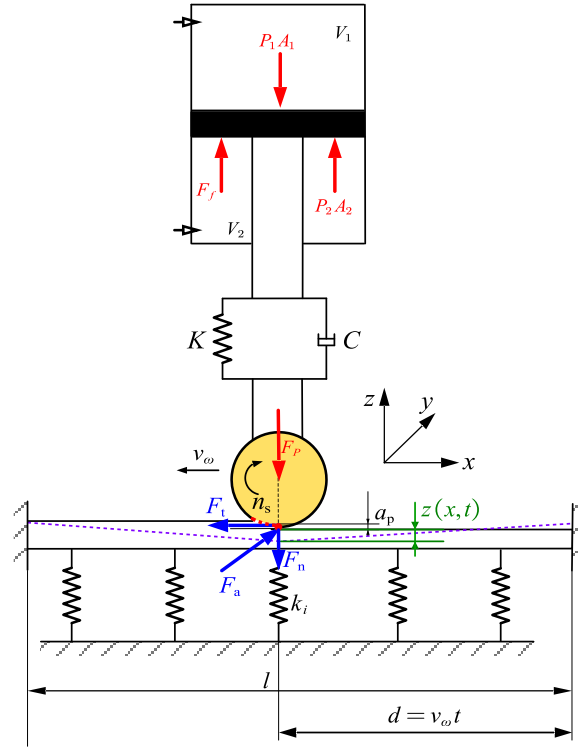


图 3-2 弹性构件磨抛系统刚柔耦合动力学模型

如图 3-2 所示，根据力平衡关系，磨削位置处的磨削力可以表示为

$$F_c = F_p - k(x)z(x,t) \quad (3.1)$$

式中， F_c 为磨削位置处的接触力； F_p 为磨抛装置施加的推力； $k(x)$ 为弹性构件在磨削位置 x 处的等效刚度； $z(x,t)$ 为弹性构件在磨削点处的横向振动位移，其位移等于缓冲气缸输出位移，本文重点考虑磨削过程中的横向振动。

根据式(3.1)可知, 分析磨削位置处的磨削力需要确定磨削位置处弹性构件的振动位移和等效刚度。

如图 3-2 所示, 对磨削过程中某一点的磨削力沿着 X 向, Y 向, Z 向进行正交分解, 得到切向磨削力 F_t , 法向磨削力 F_n , 轴向磨削力 F_a , 在研磨过程中, 磨削法向力 F_n 为恒力磨削的主要参数。作用在弹性梁构件上的集中力为轴向磨削力, 则作用在弹性梁构件上的横向力可表示为

$$f(x, t) = F_n \varepsilon(x - v_w t) \quad (3.2)$$

式中, v_w 为磨削进给速度, $\varepsilon(x - v_w t)$ 是单位脉冲函数。根据磨削方式指数值表, 一般情况, 磨削法向分力是切向分力的 1.5~3 倍, 取值大小与磨削磨粒和工件材料有关^[60, 61], 本文选取 $F_n / F_t = 2$ 。

本文研磨参数和条件参考文献^[60, 62, 63]中表面磨削条件, 磨削力可定义为

$$F_n = C_F a_{p0}^\alpha v_s^\beta v_w^\gamma = 28282 (a_{p0})^{0.86} (v_s)^{-1.06} (v_w)^{0.44} \quad (3.3)$$

式中, C_F 为切削比例常数; a_{p0} 为理想磨削深度; v_s 为砂轮线速度。

根据动态模型耦合关系, 弹性梁构件的横向振动位移会导致磨削深度发生波动, 在这种情况下, 法向磨削力可以表示为

$$F_n = 28282 \times (a_{p0} + z(x, t))^{0.86} (v_s)^{-1.06} (v_w)^{0.44} \quad (3.4)$$

模态坐标下的广义力 F_i 为

$$F_i(t) = \int_0^l f(x, t) Y_i(x) dx = F_t \int_0^l \delta(x - v_w t) Y_i(x) dx = F_n Y_i(v_w t) \quad (3.5)$$

式中, $Y_i(v_w t)$ 为弹性梁构件的第 i 阶振型函数在 $x=v_w t$ 处的值。

考虑弹性梁构件采用两端固定, 其振型函数为^[64]

$$Y_i(x) = \cosh \beta_i x - \cos \beta_i x - \frac{\cosh \lambda_i - \cos \lambda_i}{\sinh \lambda_i - \sin \lambda_i} (\sinh \beta_i x - \sin \beta_i x) \quad (3.6)$$

式中, $\lambda_i = \beta_i l$, 等截面梁的固有频率为

$$\omega_i = \frac{\lambda_i^2}{l^2} c = \beta_i^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} = \left[\left(i + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{l} \right]^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (i = 3, 4, 5, \dots) \quad (3.7)$$

式中, E 为弹性梁构件的弹性模量; I 为弹性梁构件截面惯性矩; ρ 为弹性梁构

件的密度； A 为弹性梁构件的横截面积。

磨削工况下弹性梁构件广义坐标形式的振动微分方程为

$$\ddot{q}_i + \omega_i^2 q_i = \frac{F_i}{M_i} = \frac{Y_i(v_w t)}{M_i} F_n \quad (i=1, 2, 3, \dots) \quad (3.8)$$

式中， q_i 和 M_i 分别是弹性梁构件第 i 阶模态坐标和第 i 阶模态质量。

M_i 可以表示为

$$M_i = \int_0^l \rho A Y_i^2(x) dx \quad (3.9)$$

根据杜哈梅积分^[64]，求解可得

$$q_i(t) = \frac{F_n}{M_i \omega_i} \int_0^t Y_i(v_w \tau) \sin \omega_i(t - \tau) d\tau + q_{i0} \cos \omega_i t + \frac{\dot{q}_{i0}}{\omega_i} \sin \omega_i t \quad (3.10)$$

式中， q_{i0} 和 $\dot{q}_{i0}$ 分别表示广义坐标形式下的初始位移和初始速度。

在给定边界条件下的固有频率为 ω_i ，相应的振型函数为 $\phi_i(x)$ ，引用正则坐标 $q_i(t)$ ，根据振型叠加原理^[65]，弹性梁的振动位移方程为

$$\begin{aligned} z(x, t) &= \sum_{i=1}^n Y_i(x) q_i(t) \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{F_n Y_i(x)}{M_i \omega_i} \int_0^t Y_i(v_w \tau) \sin \omega_i(t - \tau) d\tau + q_{i0} \cos \omega_i t + \frac{\dot{q}_{i0}}{\omega_i} \sin \omega_i t \end{aligned} \quad (3.11)$$

由式(3.11)可以看出，弹性构件在移动研磨过程中弹性构件振动与法向磨削力之间存在直观的耦合关系。在此基础上，可进一步分析移动载荷下弹性构件等效刚度模型，为分析移动工况下磨削力动态特性准备。

3.1.2 弹性构件等效刚度模型

根据图 3-2 所示的弹性梁构件磨抛系统的弹性约束模型，弹性梁构件的弹性振动对打磨机接触力的扰动效应表现为等效刚度可变的约束弹簧，其随研磨位置的变化而变化。为了确定弹性构件在磨削位置 x 处的等效刚度 $k(x)$ ，假设弹性梁构件的两端为固定约束。

在弹性梁构件两端固定约束条件下，对弹性构件梁施加集中力移动载荷，弹性梁构件的变形曲率方程可表示

$$\frac{1}{\rho_{(x)}} = \frac{M(x)}{EI} \quad (3.12)$$

由式(3.12)，弹性梁构件的挠度曲线近似微分方程可表示为

$$\frac{d^2\omega}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (3.13)$$

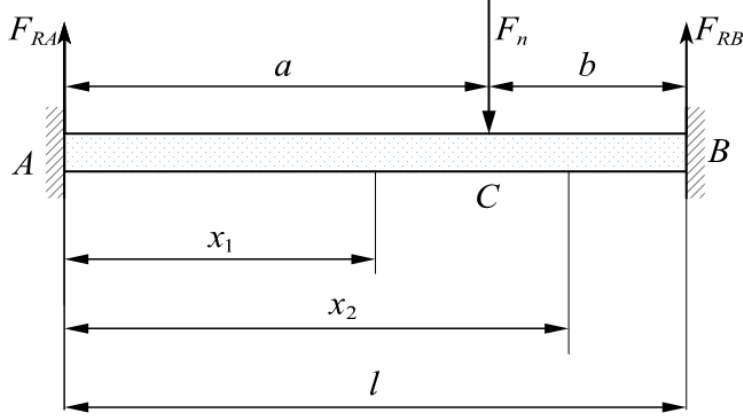


图 3-3 固定梁构件受集中力 F_n 作用

如图 3-3 所示，在法向磨削力 F_n 的作用下，根据弹性梁构件的静力平衡条件，支撑体的反作用力可以表示为

$$\begin{cases} R_A = \frac{F_n b^2}{l^2} \left(1 + \frac{2a}{l}\right) \\ R_B = \frac{F_n a^2}{l^2} \left(1 + \frac{2b}{l}\right) \end{cases} \quad (3.14)$$

式中， a 为弹性梁构件 AC 段的长度， b 为弹性梁构件 BC 段的长度。

因此，弹性梁构件 AC 和 BC 段的弯矩方程可以表示为

$$\begin{cases} M_1(x) = \frac{F_n b^2}{l^2} \left(1 + \frac{2a}{l}\right) x_1 \\ M_2(x) = \frac{F_n a^2}{l^2} \left(1 + \frac{2b}{l}\right) x_2 - F_n (x_2 - a) \end{cases} \quad (3.15)$$

式中， x_1 为弹性梁构件 AC 段截面变量， x_2 为弹性梁构件 BC 段截面变量。

通过对公式(3.15)进行积分和二次积分，弹性梁构件 AC 段转角方程和挠度曲线方程可以表示为

$$\begin{cases} \theta_1(x) = \frac{F_n b^2}{2EI l^2} \left(1 + \frac{2a}{l}\right) x_1^2 + \frac{C_1}{EI} \\ Y_1(x) = \frac{F_n b^2}{2EI l^2} \left(1 + \frac{2a}{l}\right) x_1^3 + \frac{C_1}{EI} x_1 + \frac{D_1}{EI} \end{cases} \quad (3.16)$$

同理，弹性梁构件 BC 段的转角方程和挠度曲线方程可以表示为

$$\begin{cases} \theta_2(x) = \frac{F_n a^2}{2EI l^2} \left(1 + \frac{2b}{l}\right) x_2^2 - \frac{F_n}{2EI} x_2^2 + \frac{F_n a x_2 + C_2}{EI} \\ Y_2(x) = \frac{F_n a^2}{6EI l^2} \left(1 + \frac{2b}{l}\right) x_2^3 - \frac{F_n}{6EI} x_2^3 + \frac{F_n a}{2EI} x_2^2 + \frac{C_2 x_2 + D_2}{EI} \end{cases} \quad (3.17)$$

根据连续性条件可知

$$\begin{cases} \theta_1(a) = \theta_2(a) \\ Y_1(a) = Y_2(a) \end{cases} \quad (3.18)$$

根据边界条件可知

$$\begin{cases} \theta_1(0) = \theta_2(l) \\ Y_1(0) = Y_2(l) \end{cases} \quad (3.19)$$

分别将公式(3.16)~(3.17)带入到公式(3.18)~(3.19)中，得到弹性梁构件的挠度为

$$\omega(x) = \begin{cases} -\delta \left(3 \left(\frac{x}{a} \right)^2 - 2 \left(\frac{x}{a} \right)^3 \right), 0 \leq x \leq a \\ -\delta \left(3 \left(\frac{l-x}{b} \right)^2 - 2 \left(\frac{l-x}{b} \right)^3 \right), a \leq x \leq l \end{cases} \quad (3.20)$$

式中 δ 为弹性梁构件在应力作用下的最大挠度

为分析弹性梁构件在移动负载下的等效刚度，移动载荷作用在弹性梁构件任意位置时，取其最大挠度为

$$\omega_{\max} = \delta = \frac{2F_n}{3EI} \frac{a^3 b^2}{(3a+b)^2} \quad (3.21)$$

根据 Hooke 定律，则弹性梁构件的等效刚度可表示为

$$k(x) = \frac{F_n}{\omega(x)_{\max}} = \frac{3EI}{2} \frac{(3a+b)^2}{a^3 b^2} \quad (3.22)$$

式中， $\omega_{\max} = \delta$ 是在法向磨削力作用下弹性梁构件最大挠度。

由图 3-3 中可以明显看出 $a=x$ 和 $b=L-x$ ，并将其带入到公式(3.22)，弹性梁构件的等效刚度可以进一步表示为

$$k(x) = \frac{3EI}{2} \frac{(3x+L-x)^2}{x^3(L-x)^2} \quad (3.23)$$

式中， $I = \frac{bh^3}{12}$ ；密度 $\rho = 2750 \text{ kg/m}^3$ ；弹性模量 $E = 7.17 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ；长度 $L = 0.5 \text{ m}$ ；宽度 $b = 0.05 \text{ m}$ ；高度 $h = 0.002 \text{ m}$ 。

为进一步分析观测弹性梁构件在移动载荷作用下等效刚度分布特性，通过 MATLAB 软件绘制弹性梁构件在移动载荷下的刚度位移曲线，选取弹性梁构件磨削力作用方向距离起点 $x = 0.05 \text{ m} \sim 0.45 \text{ m}$ 段进行分析，如图 3-4 所示，可以明显看出弹性梁构件刚度位移曲线表现出明显的规律特性，弹性梁构件在两端约束的条件下，弹性梁构件两端等效刚度最大，往中间点的等效刚度减小，且呈对称分布，关于中心点 $x = 0.25 \text{ m}$ 对称，复合实际情况。

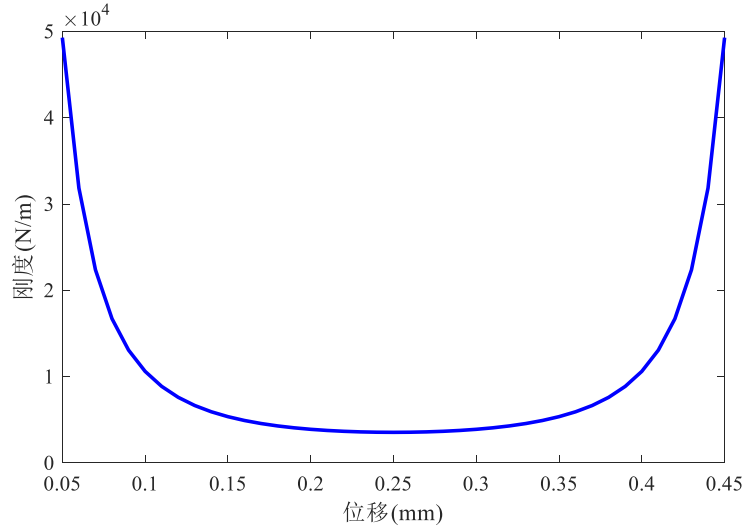


图 3-4 移动载荷下弹性构件等效刚度位移曲线

3.1.3 有限元仿真

为了进一步验证移动载荷作用下弹性构件动态等效刚度分布特性，搭建有限元仿真模型对弹性构件刚度分布特性进行验证，在三维软件中绘制弹性构件模型，将模型导入 ANSYS 中，设置弹性构件约束条件为两端固定，并且设置弹性梁的材料属性进行仿真验证，选择材料为铝合金，设置弹性梁构件材料属性，搭建有限元弹性构架仿真模型，变形计算结果如图 3-5 所示。

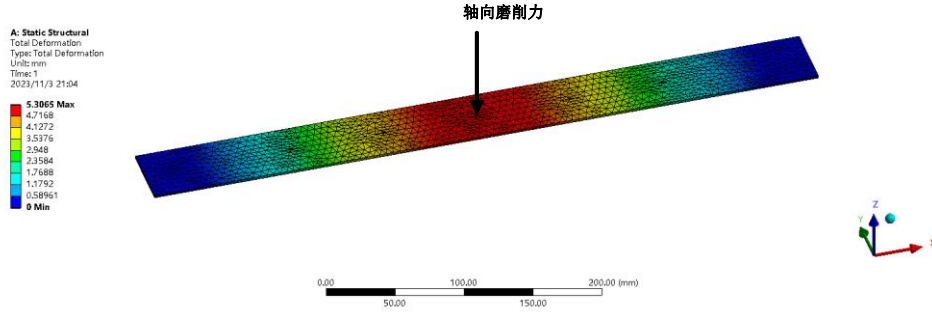


图 3-5 弹性构件有限元仿真模型计算变形结果

弹性梁构件等效刚度有限元仿真结果如图 3-6 所示，可以看出，弹性构件两端固定约束条件下，移动磨削载荷作用下基于有限元仿真模型弹性构件轴向等效刚度随着磨削点沿着弹性构件磨削移动方向变化而变化，弹性构件轴向等效刚度关于磨削中心点两端对称，且在弹性构件中心点附近轴向刚度最低。有限元仿真结果与理论分析结果可得弹性梁构件等效刚度分布特性基本吻合，由于有限元仿真模型在进行网格划分大小的区别以及对弹性梁两端边界约束条件简化导致有限元仿真结果数值和理论分析数值存在一些差值。

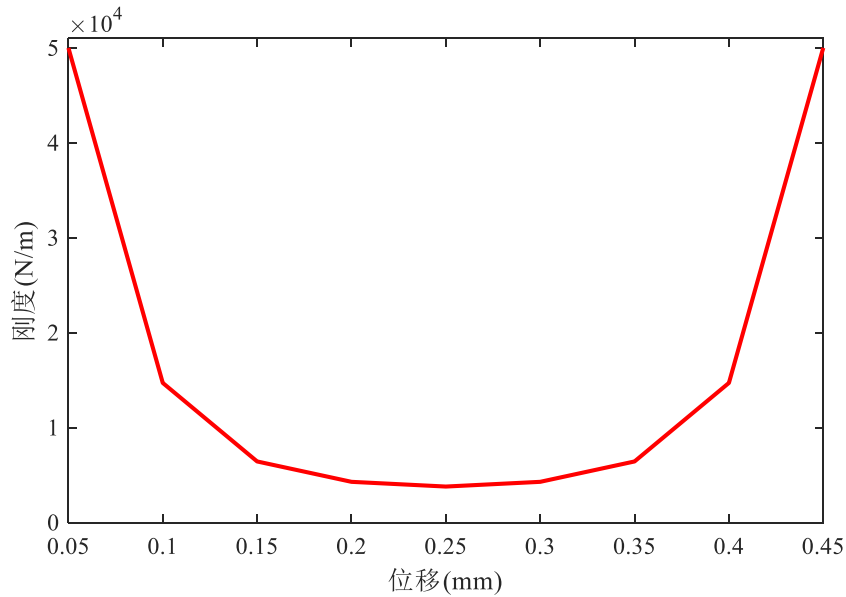


图 3-6 弹性构件等效刚度

将式(3.11)和(3.23)带入式(3.1)，进一步得到弹性构件在磨削位置处的磨削力

$$F_c = F_p - \frac{3EI}{2} \frac{(3x+L-x)^2}{x^3(L-x)^2} \sum Y_i(x) q_i(t) \quad (3.24)$$

由式(3.24)可直接看出弹性梁构件不同磨削位置振动耦合下的磨削接触力表达式，根据弹性梁构件振动与磨削接触力之间的耦合关系，可进一步分析弹性构件磨抛系统振动耦合特性。

3.2 弹性构件磨抛系统振动耦合特性

为了研究弹性构件磨削过程的振动特性以及振动耦合下磨抛系统的磨削力波动特性，通过 MATLAB 软件搭建弹性构件磨抛系统动力学仿真模型，如图 3-7 所示，主要包括弹性构件振动位移求解模块、等效刚度求解模块、磨削接触力求解模块。假设仿真过程中期望磨削接触力为 15N，仿真相关参数如表 3-1 所示。

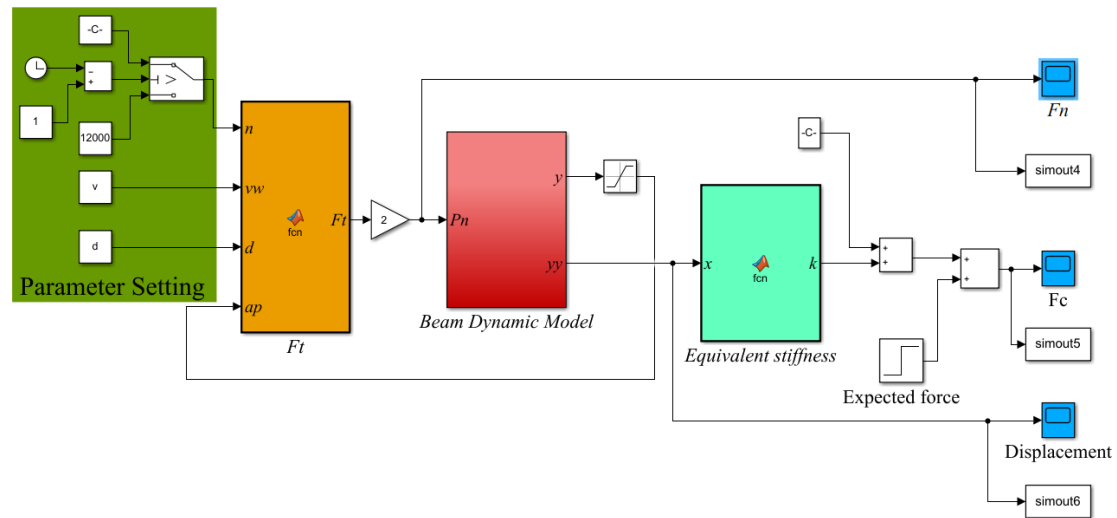


图 3-7 弹性构件磨削系统动力学仿真模型

表 3-1 仿真模型参数

参数	数值
磨削砂轮直径 d	0.35m
磨削转速 n	12000r/min
磨削深度 a_{p0}	0.05mm
进给速度 v_w	0.05m/s
弹性梁长度 l	0.5m
弹性梁宽度 b	0.02m
弹性梁高度 h	0.002m
期望力 F_0	15N

如图 3-8 所示为不同厚度弹性梁构件磨削振动响应特性，可以看出，在磨削过程中弹性梁构件表现出明显的振动特性，且随磨削位置的变化具有时变特性，在中心位置弹性梁构件的振幅最大。通过不同厚度弹性梁的振动特性可以看出，弹性构件越薄，振动幅值越大。

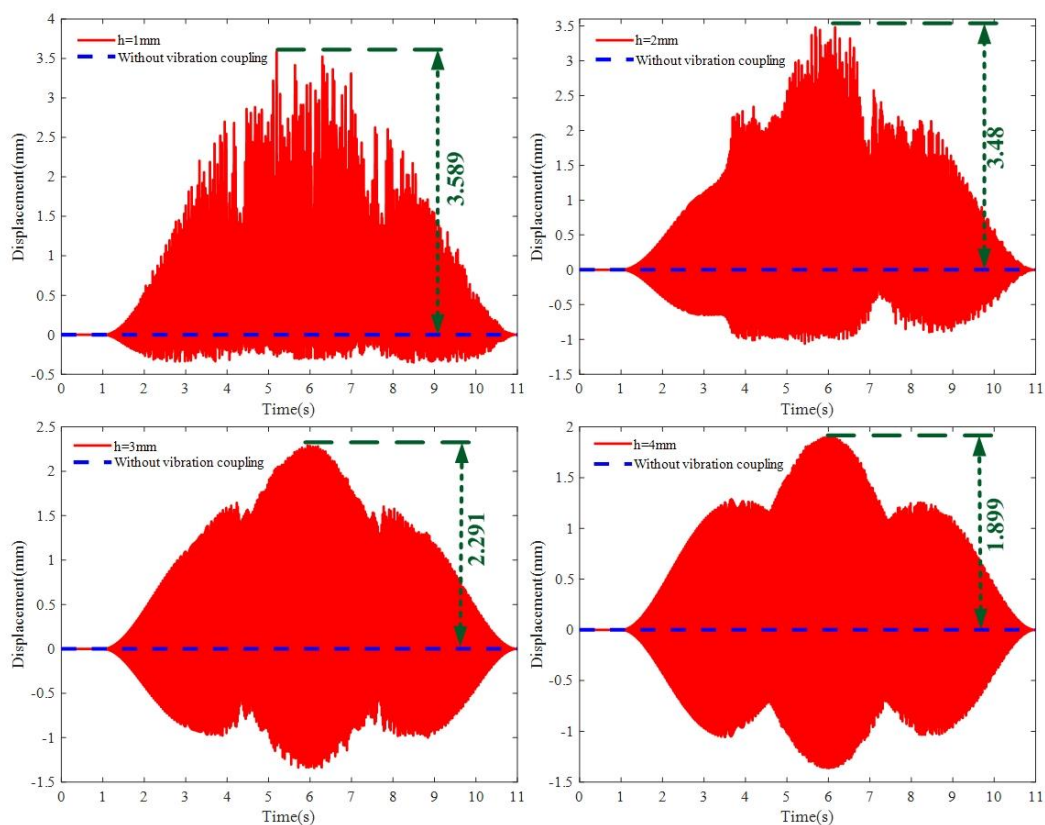


图 3-8 不同厚度弹性梁磨削振动特性

如图 3-9 所示为不同厚度弹性梁振动耦合下的磨削接触力特性，可以看出，弹性构件磨削过程的接触力存在明显波动，与刚性构件相比存在明显差异，且随着磨削位置的变化具有时变特性，在弹性构件中点位置的磨削接触力波动幅值最大，说明弹性振动的耦合影响作用最大。通过不同厚度弹性梁的磨削接触力特性可以看出，弹性构件越薄，磨削接触力波动幅值越大，与磨削过程弹性梁的振动特性存在一定的对应关系。

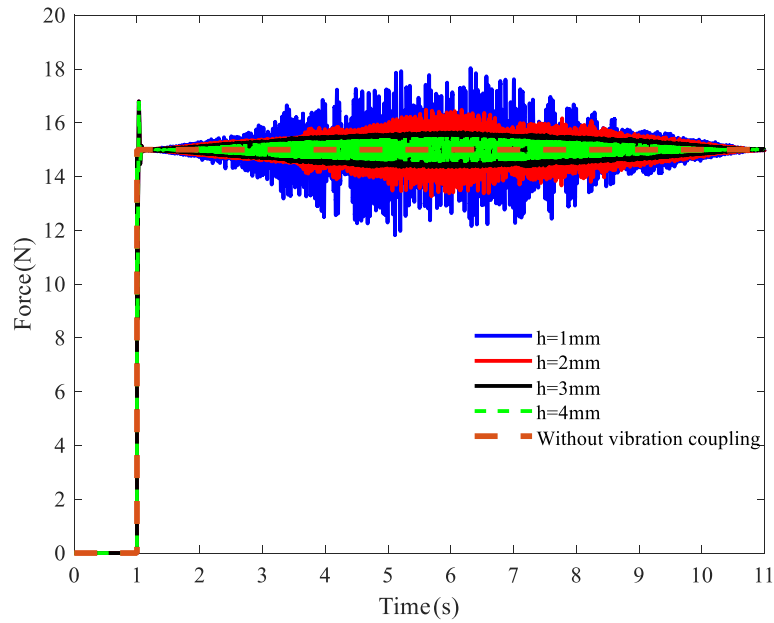


图 3-9 不同厚度梁力波动效果

如图 3-10 所示为同一结构参数、不同材质弹性梁振动耦合下的磨削接触力特性，选取灰口铸铁、可锻铸铁、碳钢材质，其弹性模量分别为 $E = 1.13 \times 10^{11}$ ， $E = 1.55 \times 10^{11}$ ， $E = 2.1 \times 10^{11}$ 。结果表明，弹性梁材质对振动耦合下磨削接触力特性具有一定的影响，随着弹性模量的降低，磨削接触力波动幅值增大。

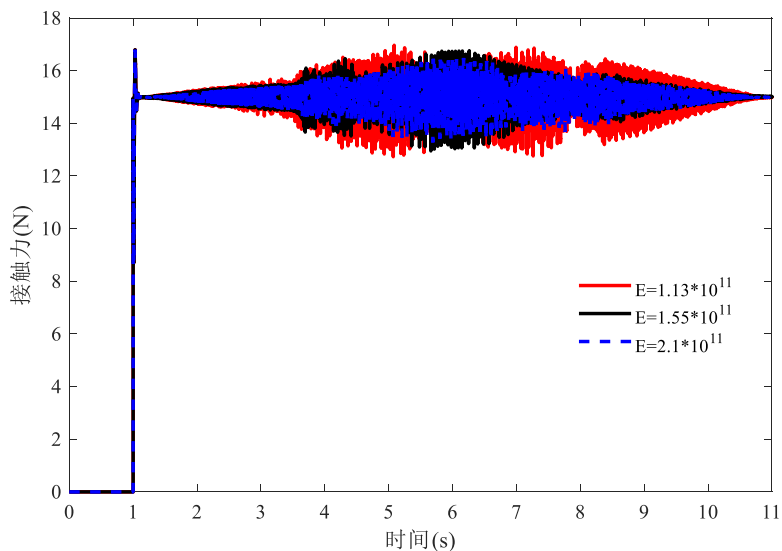


图 3-10 不同材料力的波动效果

根据以上分析可以看出，弹性构件在磨削过程存在弹性振动，弹性构件振动耦合下磨削接触力存在明显的波动，弹性构件的弹性振动对磨削接触力具有重要影响，因此，需要对弹性构件磨削过程中接触力进行补偿控制。

3.3 本章小结

根据弹性构件机器人磨抛系统，分析了弹性构件磨抛系统构成及弹性构件振动与磨削接触力之间的耦合关系，建立了弹性构件磨抛系统刚柔耦合动力学模型，根据磨削力耦合关系，构建了弹性构件动力学模型以及弹性构件等效刚度模型，分析了弹性构件磨抛系统振动耦合特性，为后续控制策略设计及验证提供了理论基础。

第四章 弹性构件机器人磨抛控制策略设计

前面研究结果表明，弹性构件机器人磨抛过程中由于弹性构件与磨削工具之间存在动态交互作用，在磨削力作用下弹性构件发生剧烈振颤，使得磨削接触力产生波动特性。本章根据弹性构件磨削振动与磨削力之间的耦合关系，设计磨抛 PID 控制策略和滑模变结构控制策略分别实现弹性构件机器人磨抛恒力控制及振动抑制，控制策略框图如图 4-1 所示。

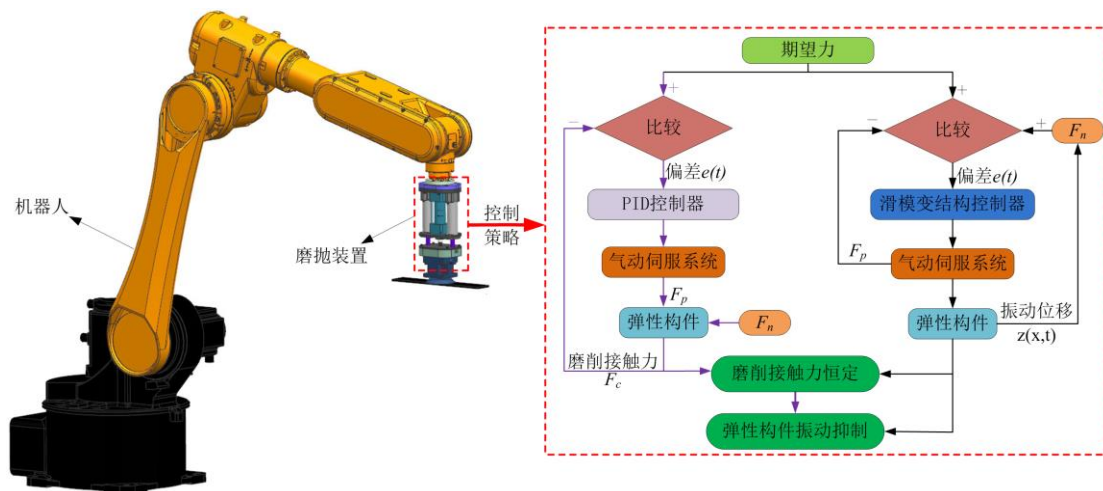


图 4-1 控制策略框图

4.1 基于 PID 的磨抛恒力控制策略

磨削加工过程中，为保证磨削工具与弹性构件的法向接触力的恒定，通过机器人来实现磨抛运动轨迹控制，气动柔顺装置实现磨削接触力的恒力控制。当机器人沿着弹性构件方向磨削移动过程中，机器人轨迹控制响应时间较高，无法满足磨削要求，需要通过控制柔顺磨抛装置实现磨削加工要求。本节基于 PID 磨抛恒力控制器实现磨削过程中磨抛恒力控制。

4.1.1 控制原理

PID 控制器具有结构简单，稳定性好，算法实现简单，且具有较强的鲁棒性因此被广泛应用于工业控制工程中^[66-68]。PID 控制器通过消除期望目标与控制对象之间的误差，实现控制对象的精确模型。

图 4-2 为 PID 控制系统结构框图，控制系统思路是：磨削作业前预先设定

期望磨削接触力 F_0 大小，控制器通过计算处理输入给伺服阀相应的电压控制信号，伺服阀根据输入的电压信号实现气缸腔内气体压强调节控制。磨削过程中磨削接触力信号反馈给控制器，控制器通过调节电磁伺服阀的电压信号来调节气缸两腔之间的压力差，并将气缸腔内压强反馈给控制器，压力传感器将气缸输出力 F_p 实时进行反馈力，将期望磨削力 F_0 转化为控制量电压 u ，控制器控制磨抛装置输出力 F_p 将控制周期内末端磨削力与期望值进行比较，将误差进行调控，使磨削接触力在控制精度范围内波动，通过 PID 控制进行控制量调整，直到力偏差为 0，调整控制量 $\Delta u = 0$ ，从而实现弹性构件磨削过程中的恒力控制。

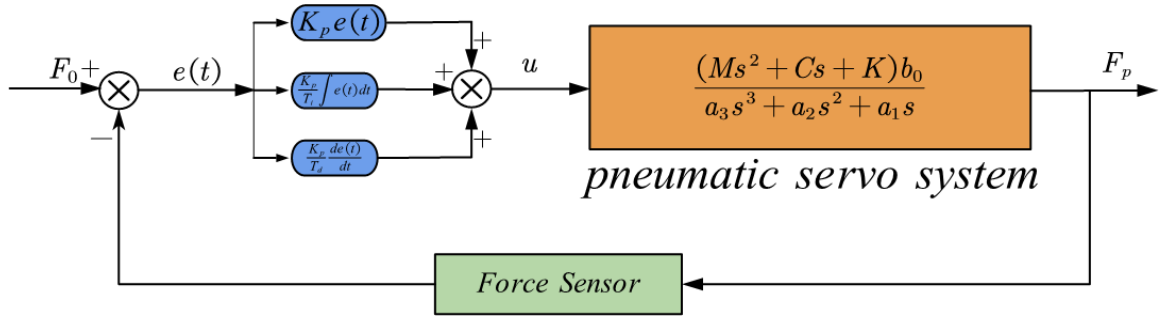


图 4-2 磨削接触力伺服控制原理框图

图中 F_0 为系统设定期望值， F_p 为系统实际输出值， $e(t)$ 为期望值与实际值之间的误差值， $u(t)$ 为电压调控量。PID 控制器是一种线性控制器^[69, 70]，通过对偏差进行比例、积分、微分的线性组合，其控制量可表示为

$$\Delta u = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.1)$$

式中， K_p 为比例增益系数； T_i 为积分时间常数； T_d 为微分时间常数； $e(t)$ 为期望值与实际值的偏差量。

4.1.2 控制器设计

根据以上分析可知，弹性构件振动耦合下的磨削接触力与气动伺服系统存在直接的耦合关系，通过气动伺服控制能够实现磨削接触力的控制。本文基于 PID 控制器设计磨削接触力控制策略，以保证弹性构件磨削接触力的恒定。

为验证控制策略的有效性，采用 Simulink 工具进行仿真，搭建弹性构件振

面叙述的一致，仿真结果表明设计的 PID 磨抛控制器对弹性构件磨削力抑制的同时对弹性构件振动也有一定的抑制作用，控制过后振动位移振幅明显减少。可知所设计的接触力自适应控制器能够有效抑制的弹性构件振动耦合下磨削接触力波动和弹性构件振动位移的抑制。验证了控制策略的有效性。

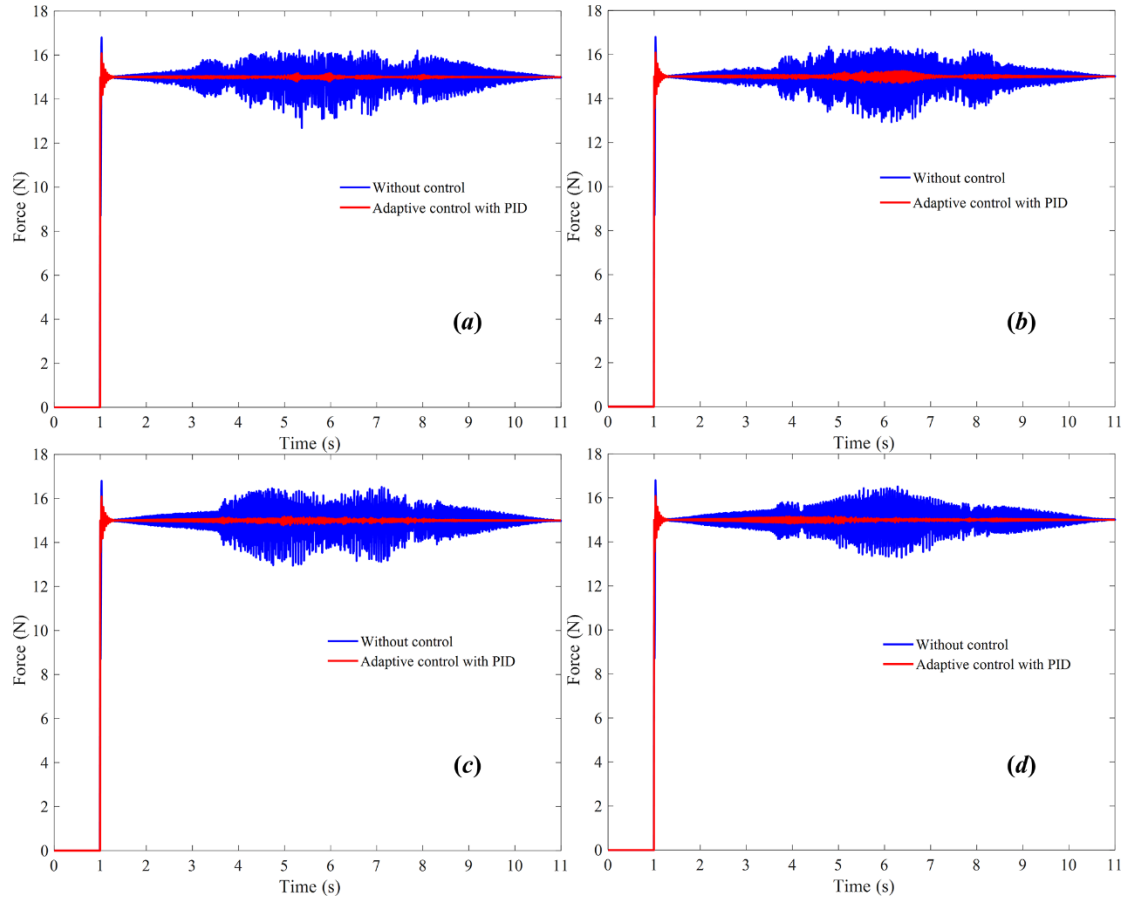
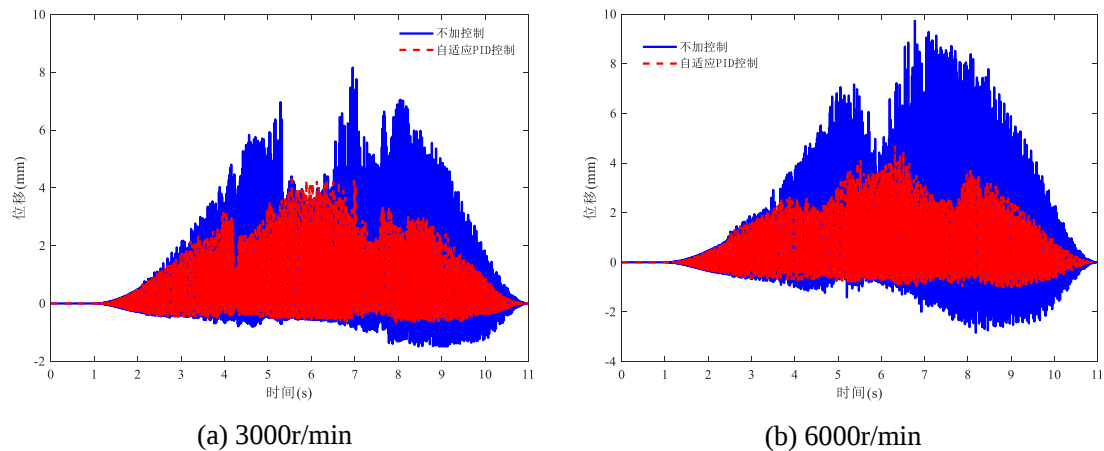


图 4-4 弹性构件振动耦合下磨削接触力控制结果

(a) $S=3000\text{r/min}$; (b) $S=6000\text{r/min}$; (c) $S=9000\text{r/min}$; (d) $S=12000\text{r/min}$.



(a) 3000r/min

(b) 6000r/min

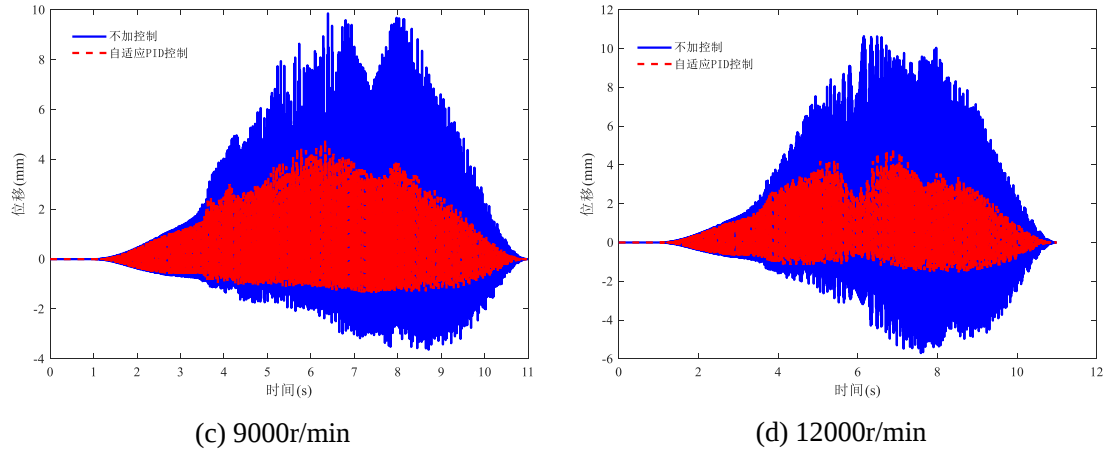


图 4-5 不同转速下弹性构件振动控制效果

为进一步验证控制策略的有效性，取不同厚度的弹性构件进行仿真验证，分别取弹性构件厚度 $h=1\text{mm}$ ， $h=2\text{mm}$ ， $h=3\text{mm}$ ， $h=4\text{mm}$ 。如图 4-6 所示，仿真结果表明，设计的 PID 磨抛控制器能够在实现磨削接触力恒力控制下弹性构件的振动抑制，经过控制，弹性构件振动幅值明显降低，同时，磨削接触力恒力控制下对弹性构件振动位移也有抑制作用，进一步体现了弹性构件振动与磨削接触力之间存在的耦合关系，验证了控制策略的有效性。

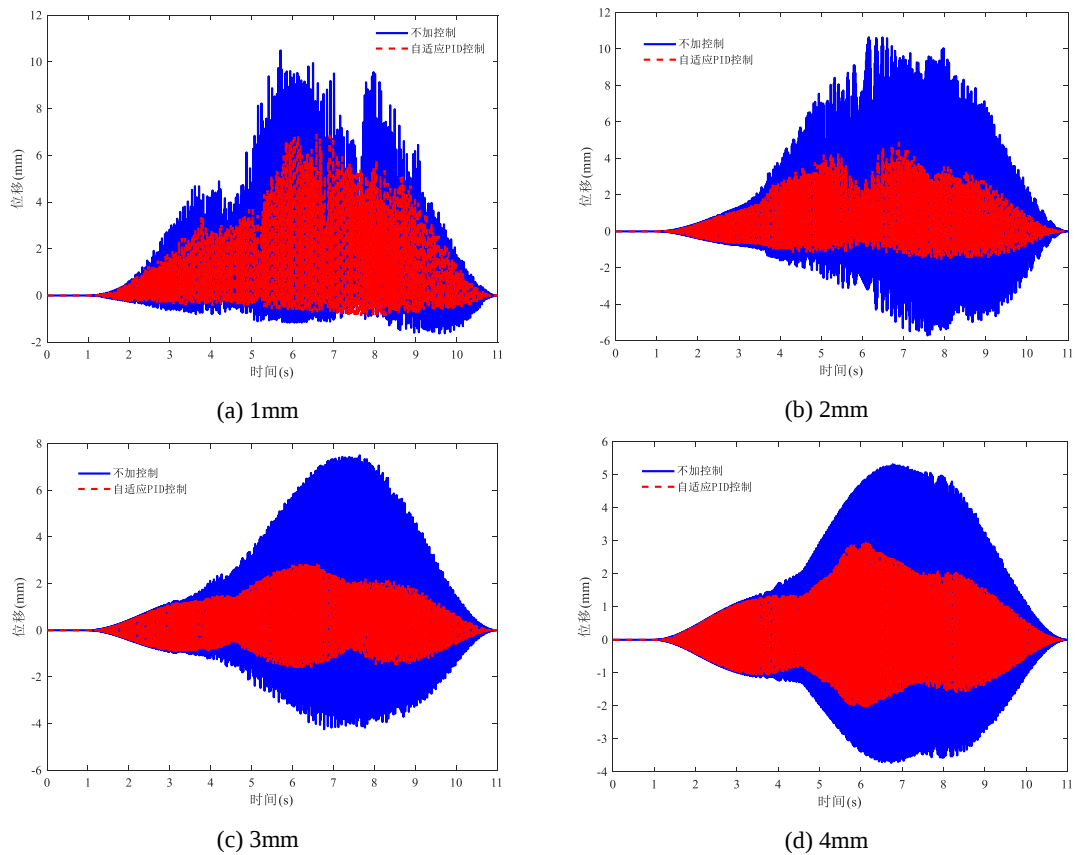


图 4-6 不同板厚弹性构件振动控制效果

4.2 磨抛恒力控制联合仿真分析

4.2.1 联合仿真实验系统设计

基于理论仿真结果可以看出在磨削过程中弹性构件振动与磨削接触力之间存在耦合关系，通过设计的控制策略能够在磨削弹性构件过程中实现磨削接触力的在期望值附近波动，同时，实现磨削接触力恒定时，弹性构件振动明显减少。为了进一步验证设计的接触力控制策略，本文基于 ADAMS 机械系统动态仿真分析软件，搭建弹性构件机器人磨抛系统联合仿真模型，将 PID 控制策略与 ADAMS 中弹性构件机器人磨抛系统相结合，建立弹性构件磨抛联合仿真实验系统。将 MATLAB 中磨抛装置输出力和磨削激力同时作用于 ADAMS 弹性构件模型，模拟弹性构件磨削受力过程，同时，将弹性构件磨削接触力实时反馈给磨抛装置控制系统，验证控制效果。

将简化的机器人磨抛装置模型与弹性构件模型导入到 ADAMS 软件中。在 ADAMS 中设定弹性构件材料属性为铝合金，并对弹性构件柔性化，弹性构件采用两端固定约束，仿真参数与理论仿真参数一致。在磨抛装置顶端无质量部件与底端无质量部件上添加弹簧阻尼，拟合磨抛装置刚度与阻尼，同时给磨抛装置施加一个平面移动副，模拟机器人磨抛轨迹，在磨抛装置上对弹性构件施加法向磨削力 F_n 和磨抛装置输出推力 F_p ，在底端无质量部件与弹性构件施加一个磨削接触约束，即完成弹性构件机器人磨抛系统虚拟样机模型建立。在 Adams 设定联合仿真端口，导出 Adams 出控制参数，在 Simulink 中调出的 adams_sub 嵌入仿真模型中。通过 Simulink 中的磨削力 F_n 和气动伺服系统输出推力 F_p 输入给 Adams，并将计算后将磨削接触力反馈 Simulink 中，弹性梁构件磨削力控制策略联合仿真实验系统如图 4-7 所示。

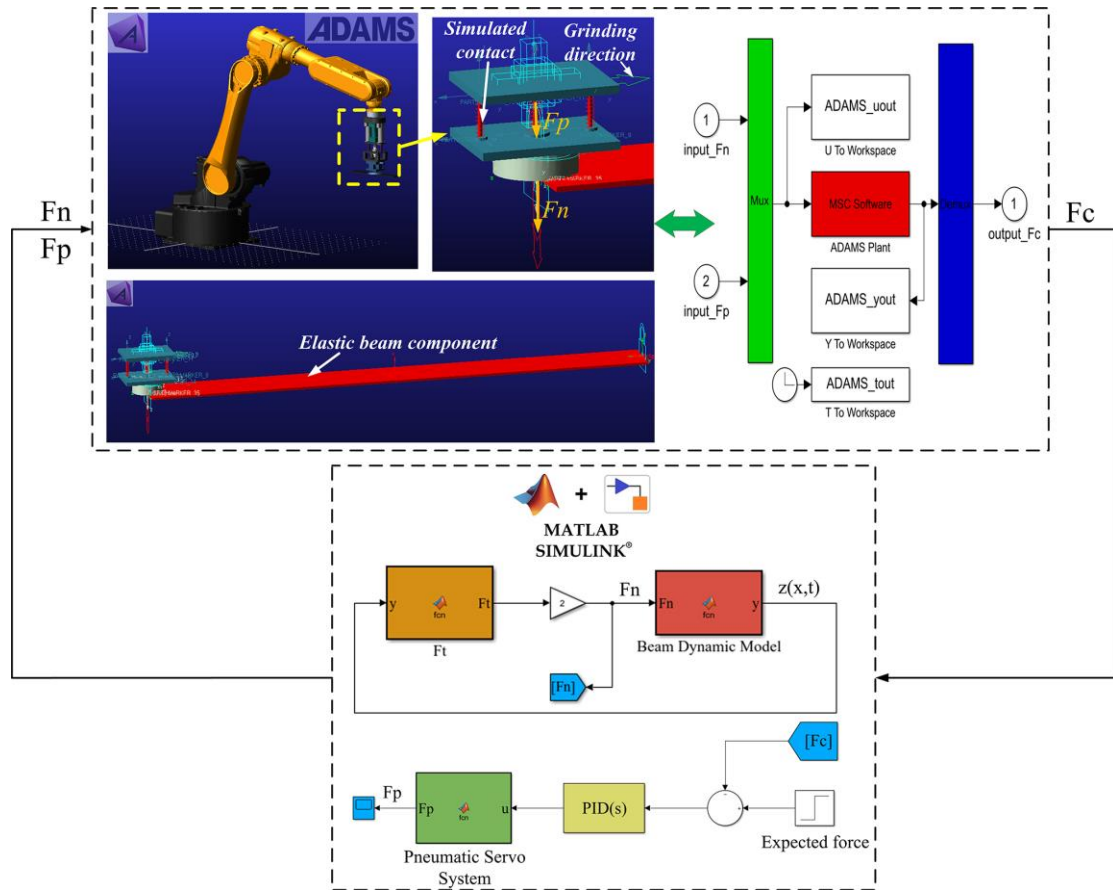


图 4-7 弹性梁构件磨削力控制策略联合仿真实验系统

4.2.2 结果分析

如图 4-8 所示为不同转速下弹性构件接触力控制虚拟样机联合仿真实验结果，可以看出，在磨削加工未加控制时，磨削接触力波动较大，采用 PID 控制策略后，磨削接触力波动明显减小，结果表明设计的磨抛接触力控制器对弹性构件振动耦合下磨削接触力波动有一定的抑制作用。验证了本文控制策略的有效性。

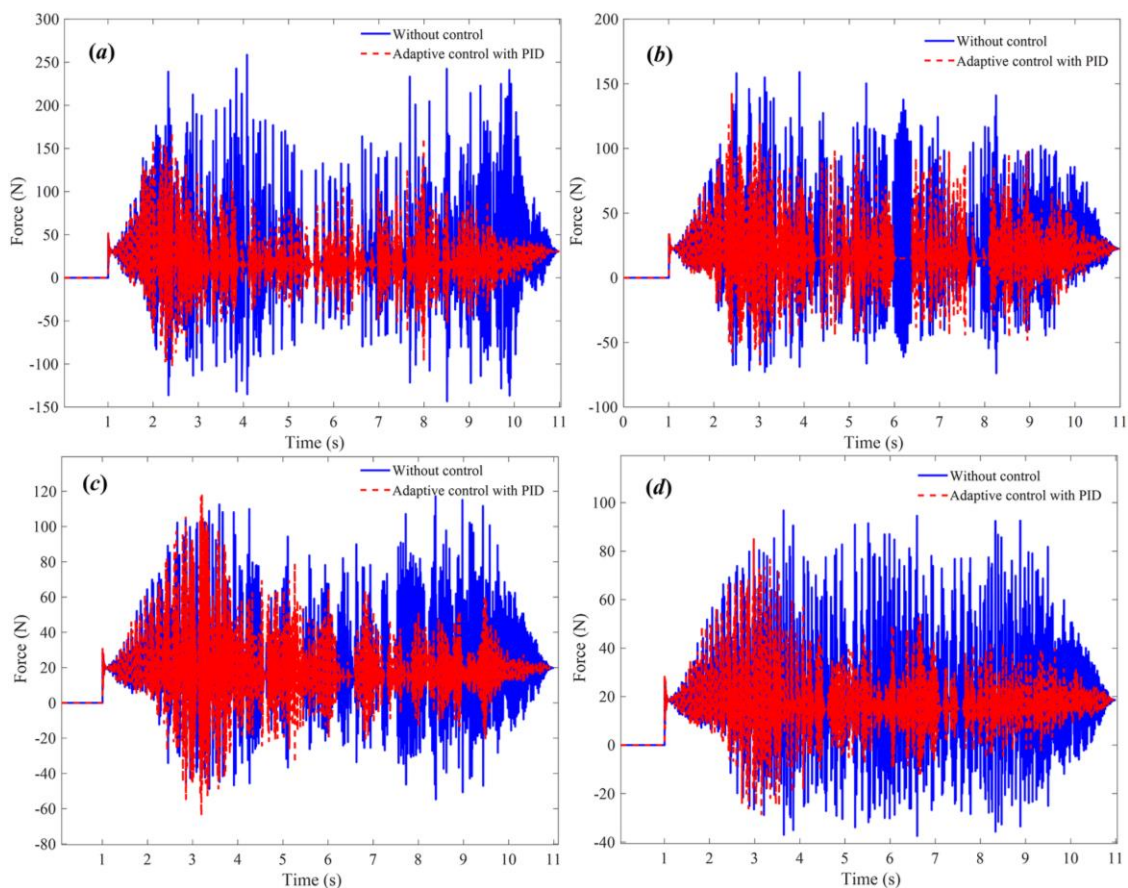


图 4-8 联合仿真中柔顺磨削接触力控制效果

(a) $S=3000\text{r/min}$; (b) $S=6000\text{r/min}$; (c) $S=9000\text{r/min}$; (d) $S=12000\text{r/min}$.

4.3 基于滑模变结构的磨削振动控制策略

磨削过程中，在磨削激力作用下，弹性构件极易产生弹性振动，反之弹性构件振动加剧磨削力波动，因此抑制弹性构件振动至关重要，实现磨抛恒力控制。本章通过设计滑模变结构控制器，调控磨抛装置抑制磨削激力对弹性构件的影响，减小弹性振动产生，实现磨抛恒力控制。

4.3.1 滑模变结构控制设计

滑模变结构控制是一种特殊的非线性控制，具有消除系统的不确定性，对外界干扰具有很强的鲁棒性，并且滑模变结构控制的系统响应速度快，控制性能好，广泛应用于磨削力控领域。

如图 4-9 所示，滑模变结构控制包含了两个部分：滑模面、滑模控制器两个部分，根据设计的滑模面，控制系统向滑模面收束，保证系统沿着滑模平面

到达系统原点。

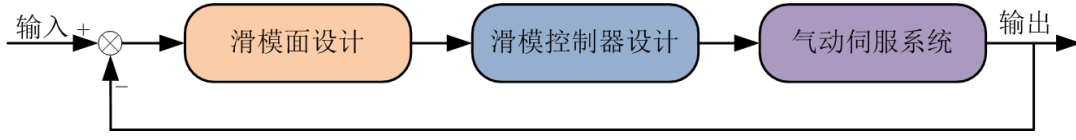


图 4-9 滑模变结构控制结构图

基于建立的气动伺服磨抛系统，将其看作是由一个二阶系统和一个延迟系统组成。将二阶系统作为系统的动力学方程，并设计该系统的滑模变结构控制器。二阶系统可表示为

$$G(s) = \frac{F_p}{U} = \frac{a_3}{a_1 s^2 + a_2 s + a_0} \quad (4.2)$$

由式(4.2)可得

$$a_1 \ddot{F}_p + a_2 \dot{F}_p + F_p = a_3 u \quad (4.3)$$

根据反原理，反馈误差为

$$e = F_0 - F_p \quad (4.4)$$

$$\dot{e} = -\dot{F}_p \quad (4.5)$$

$$\ddot{e} = -\ddot{F}_p \quad (4.6)$$

联立式(4.4)~(4.6)可得

$$a_1 \ddot{e} + a_2 \dot{e} + e = F_0 - a_3 u \quad (4.7)$$

由式(4.7)设计滑模面如下

$$s = a_1 \dot{e} + a_2 e \quad (4.8)$$

滑动模块下选择等速趋近律，则有

$$\dot{s} = a_1 \ddot{e} + a_2 \dot{e} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) \quad (4.9)$$

由此求解得到滑模变结构控制器输出

$$u = \frac{F_d + \varepsilon \operatorname{sgn}(a_1 \dot{e} + a_2 e) - e}{a_3} \quad (4.10)$$

为验证设计的控制策略对弹性构件振动抑制特性，根据设计的滑模变结构控制策略搭建 MATLAB/Simulink 弹性构件振动抑制控制仿真模型，如图 4-10

所示该模型主要由气动伺服系统模块、弹性构件模块以及切削参数模块组成。

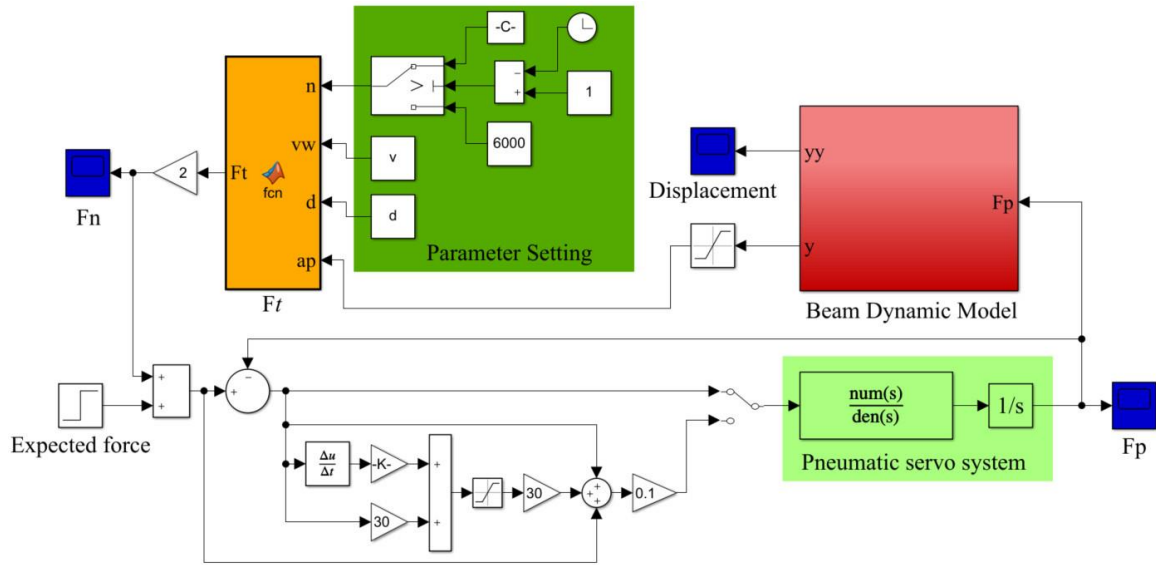
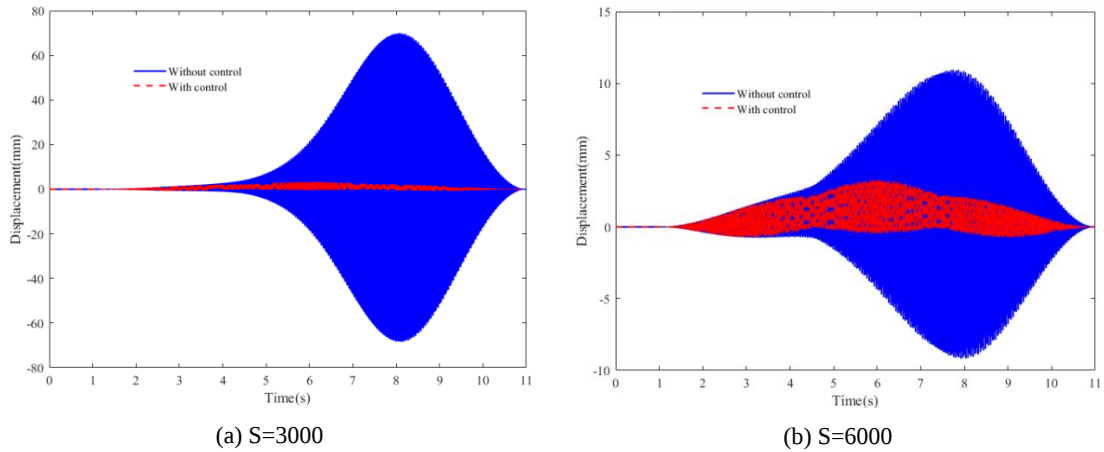


图 4-10 弹性构件滑模变结构控制仿真模型

4.3.2 振动控制结果分析

根据弹性构件理论，基于滑模控制策略搭建仿真模型，如图 4-11 为不同切削转速下弹性构件振动抑制效果，选取不同磨削转速分别为 3000r/min，6000r/min，9000r/min，12000r/min。可以看出，设计的滑模变结构控制策略能够有效的抑制磨削作用下弹性构件振动位移的波动，验证了控制策略的有效性。



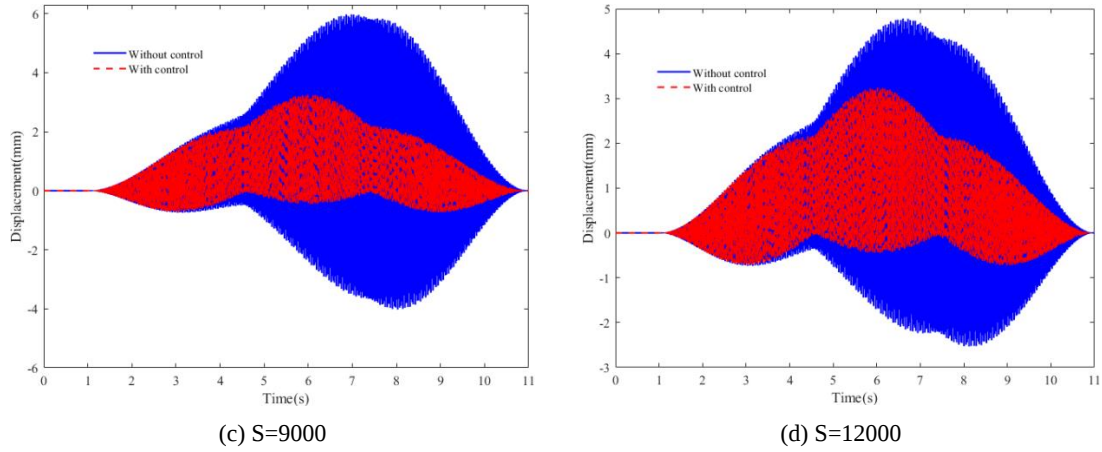


图 4-11 不同切削转速弹性构件振动抑制效果

如图 4-12 为不同切削进给速度下弹性构件振动抑制效果，选取不同切削进给速度分别为 0.05m/s , 0.1m/s , 0.15m/s , 0.2m/s 。可以看出，在切削转速与切削量相同条件下，不同的切削进给速度下滑模变结构控制器抑制了弹性构件振动位移的波动，验证了控制策略的有效性。

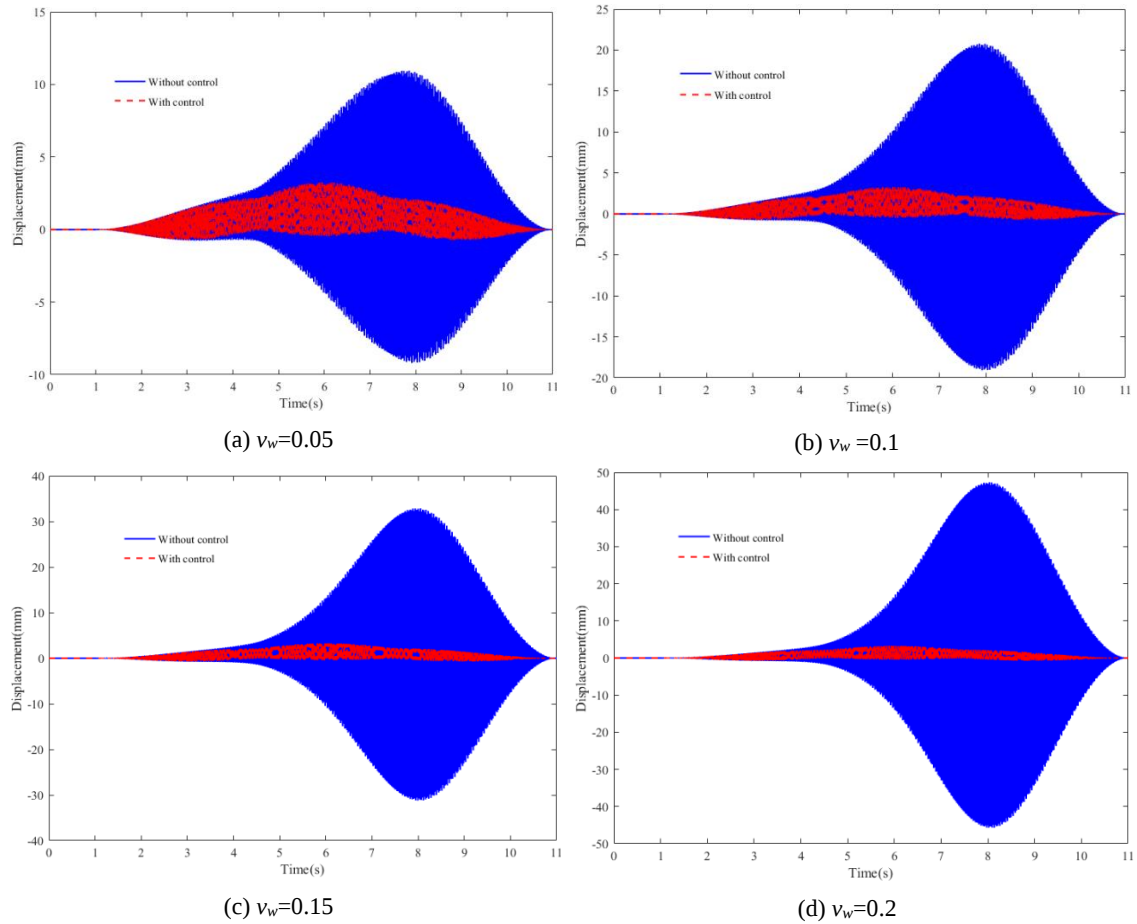


图 4-12 不同切削进给速度弹性构件振动抑制效果

如图 4-13 为不同切削深度下弹性构件振动抑制效果，选取不同切削深度分

别为 0.05mm, 0.15mm, 0.25mm, 0.35mm。可以看出, 在其他相同条件下, 不同的切削深度下滑模变结构控制器抑制了弹性构件振动位移的波动, 验证了控制策略的有效性。

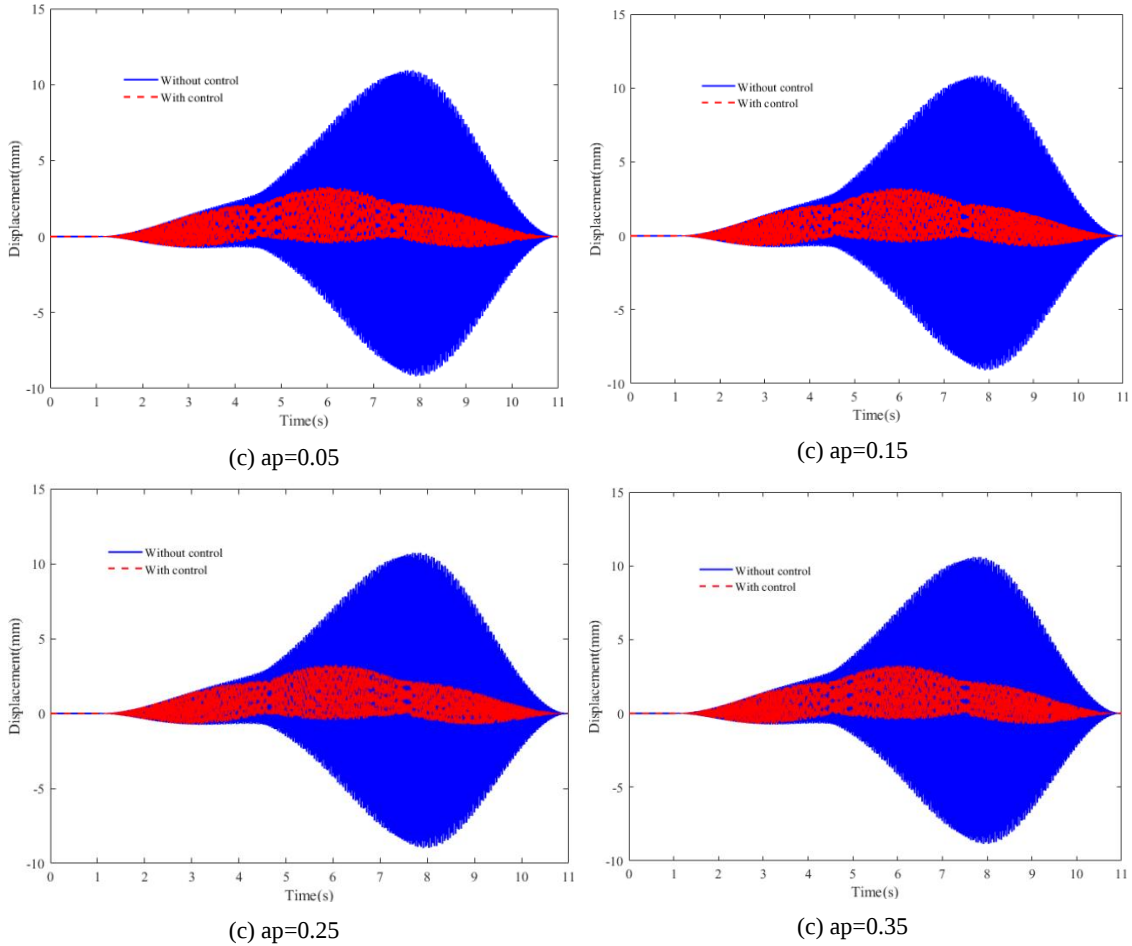


图 4-13 不同切削深度弹性构件振动抑制效果

4.3.3 磨削力控制结果分析

如图 4-14 所示为不同切削转速下抑制弹性构件振动下磨削接触力的波动特性。在其他切削参数相同条件下, 分别选取磨削转速 3000r/min, 6000r/min, 9000r/min, 12000r/min。结果表明, 在改变不同切削参数下, 在磨削作用下弹性构件发生剧烈振颤的同时, 磨削接触力随弹性构件振动特性变化而变化, 验证了设计的控制策略的有效性。

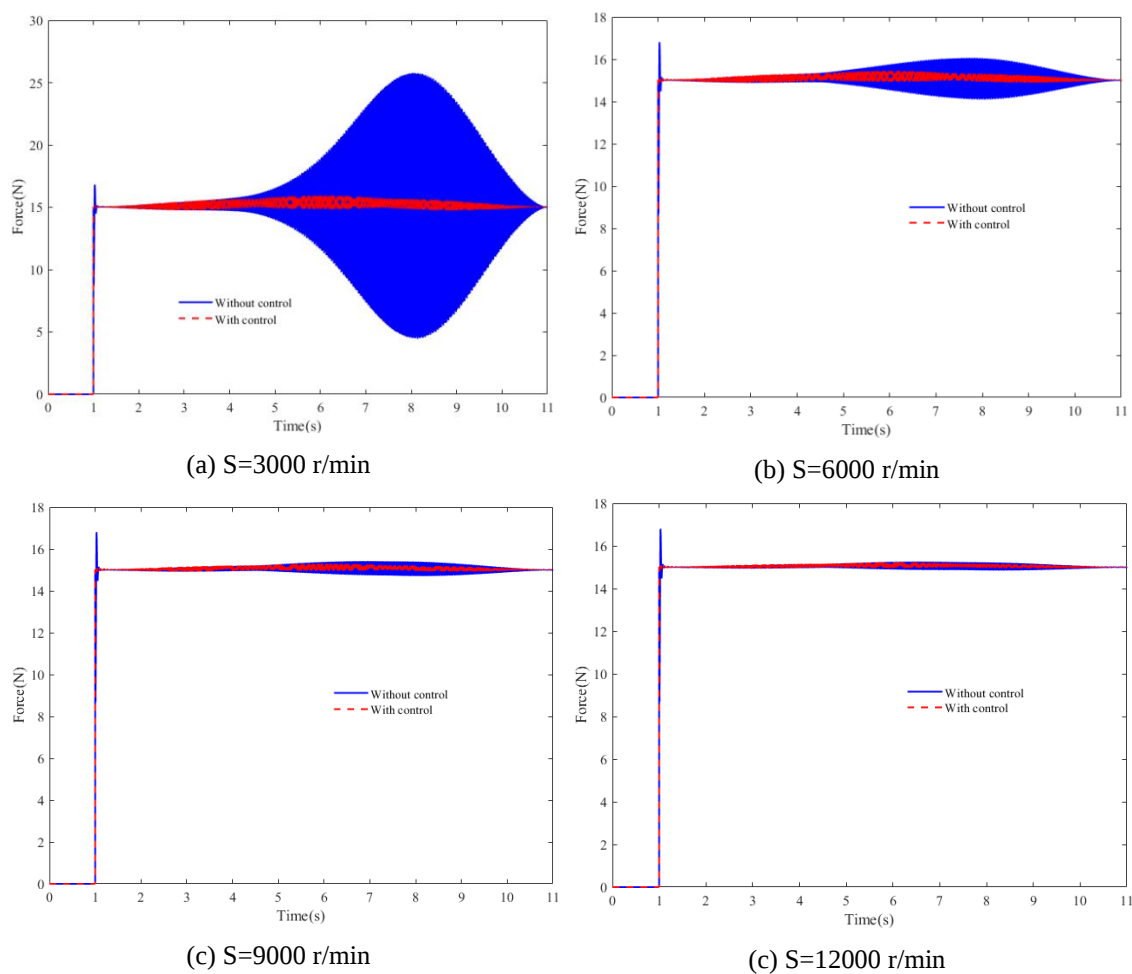
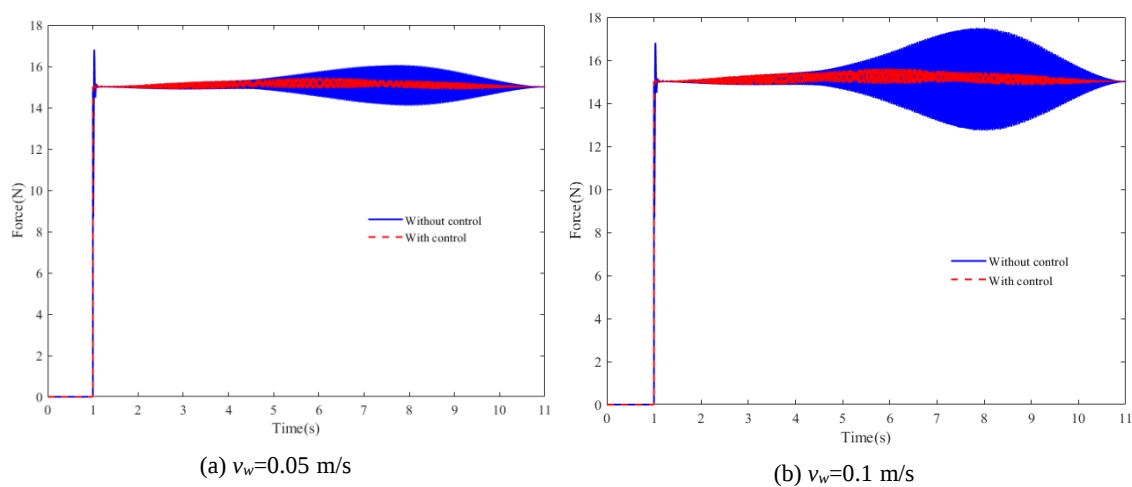


图 4-14 不同切削转速弹性构件磨削接触力的控制效果

图 4-15 所示为不同切削进给速度下抑制弹性构件振动的磨削接触力的波动特性。分别选取切削进给速度 0.05 m/s , 0.1 m/s , 0.15 m/s , 0.2 m/s 。结果表明,设计的控制策略在抑制弹性构件振动的同时,磨削接触力的波动明显降低。



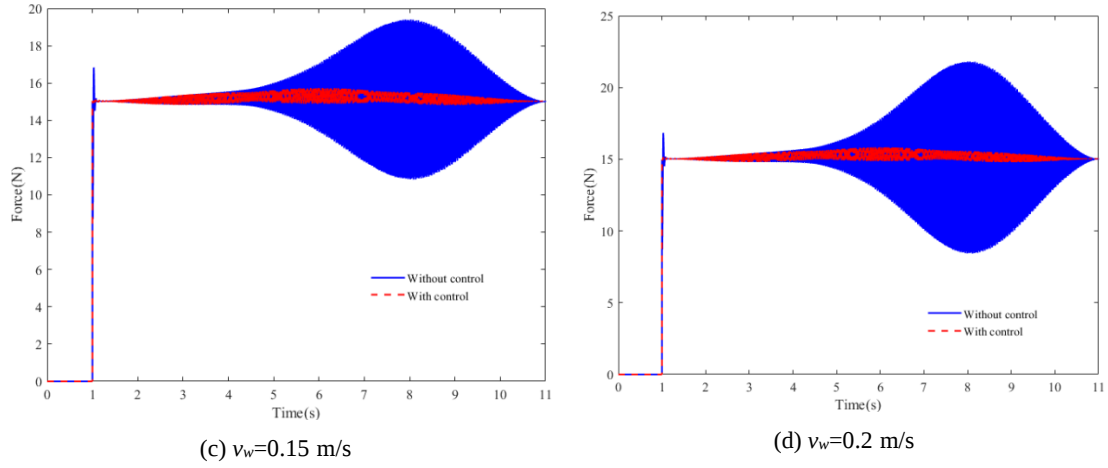


图 4-15 不同切削进给速度弹性构件磨削接触力控制效果

图 4-16 所示为不同切削深度下抑制弹性构件振动下的磨削接触力的波动特性。分别选取切削深度 0.05mm, 0.15mm, 0.25mm, 0.35mm。结果表明, 不同的切削深度下, 抑制弹性构件振动的同时, 磨削接触力的波动明显降低。

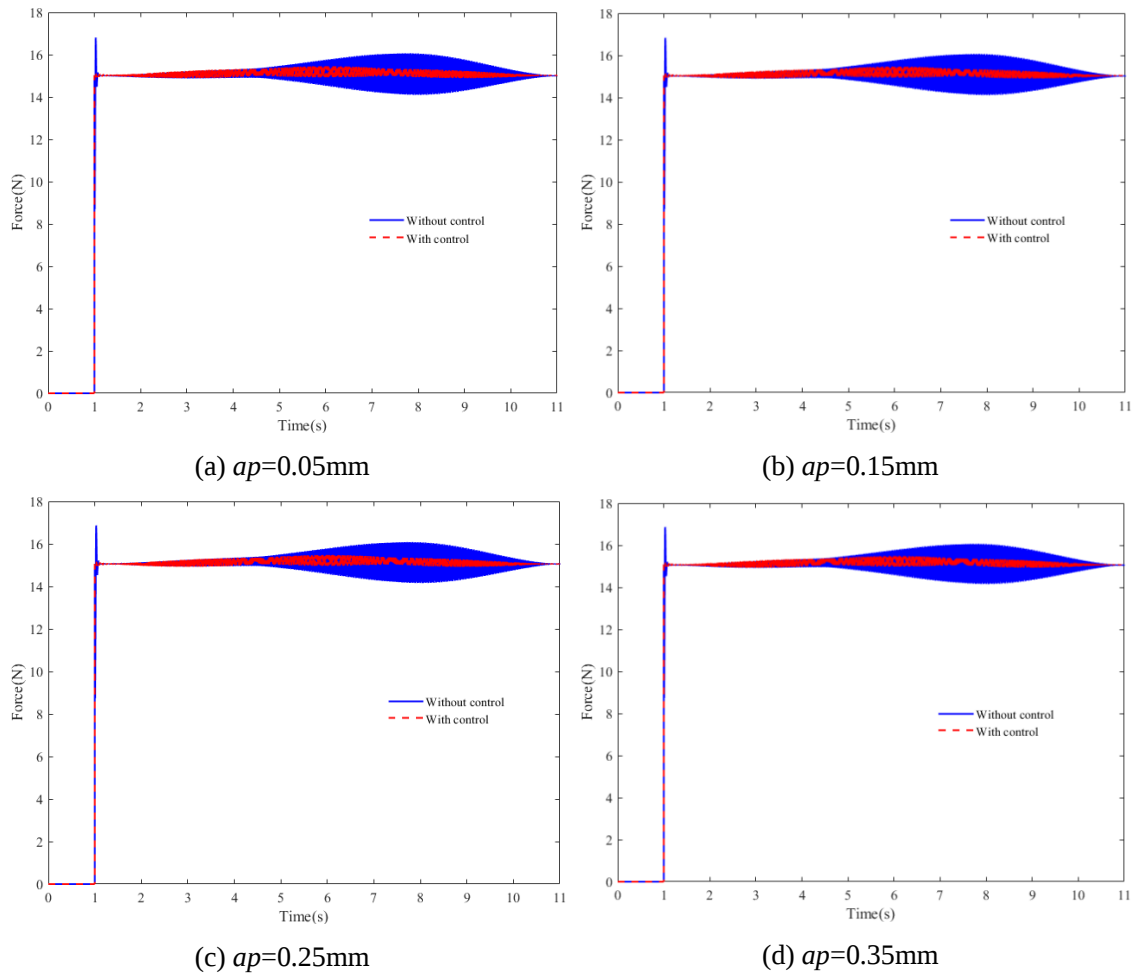


图 4-16 不同切削深度弹性构件磨削接触力控制效果

4.4 磨削振动控制联合仿真分析

4.4.1 联合仿真实验系统设计

为进一步验证本文设计的弹性构件振动位移滑模变结构控制策略，搭建虚拟样机模型进行联合仿真实验验证。将滑模变结构控制策略与弹性构件虚拟样机模型相结合，建立弹性构件振动位移滑模变结构控制策略联合仿真实验系统，如图 4-17 所示。联合仿真实验时，在磨削力作用下，弹性构件振动位移产生波动，磨削力发生变化，通过控制气动伺服系统补偿磨削力实现弹性构件振动抑制，同时，将弹性构件产生的振动位移反馈给磨削力，磨削接触力将实时反馈给气动伺服系统，验证滑模变结构控制效果。

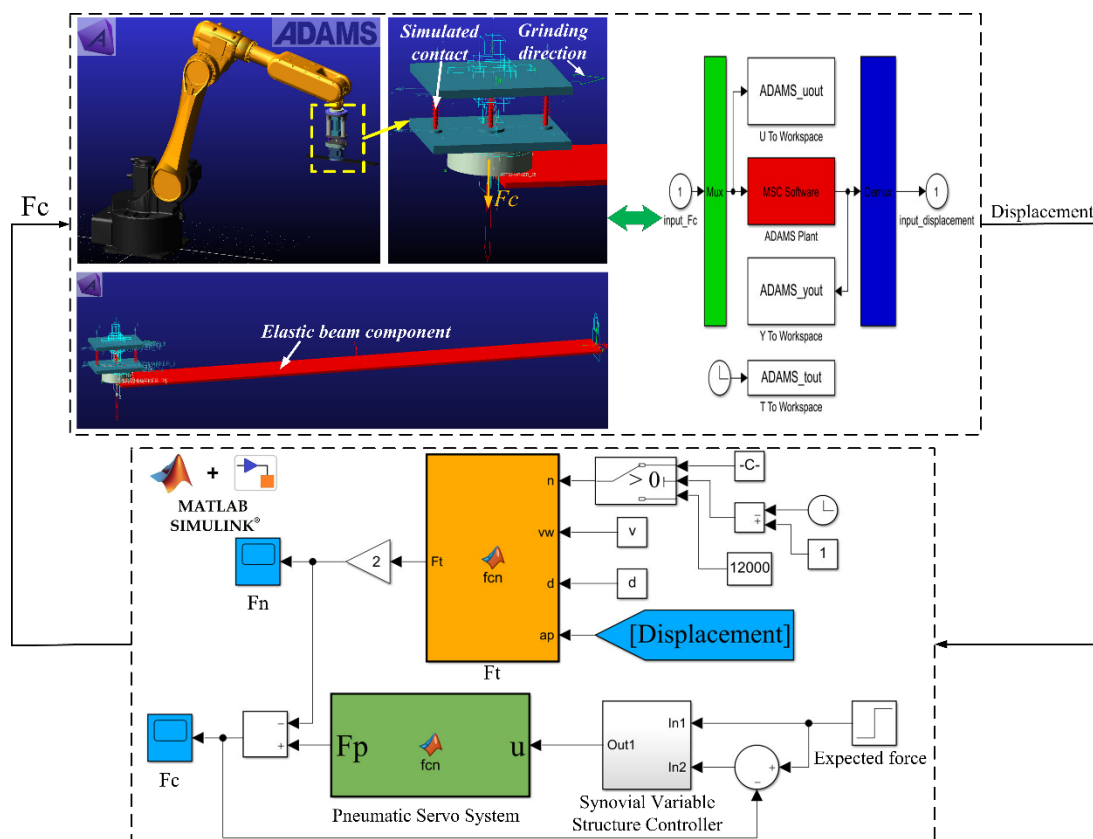


图 4-17 弹性构件振动位移滑模变结构控制策略联合仿真实验系统

4.4.2 振动控制结果分析

如图 4-18 所示为不同切削进给速度下弹性构件振动位移滑模变结构控制虚拟样机联合仿真实验结果。可以看出，所设计的滑模变结构控制器对弹性构件振动耦合下的振动位移有一定的抑制作用，验证了本文控制策略的有效性。

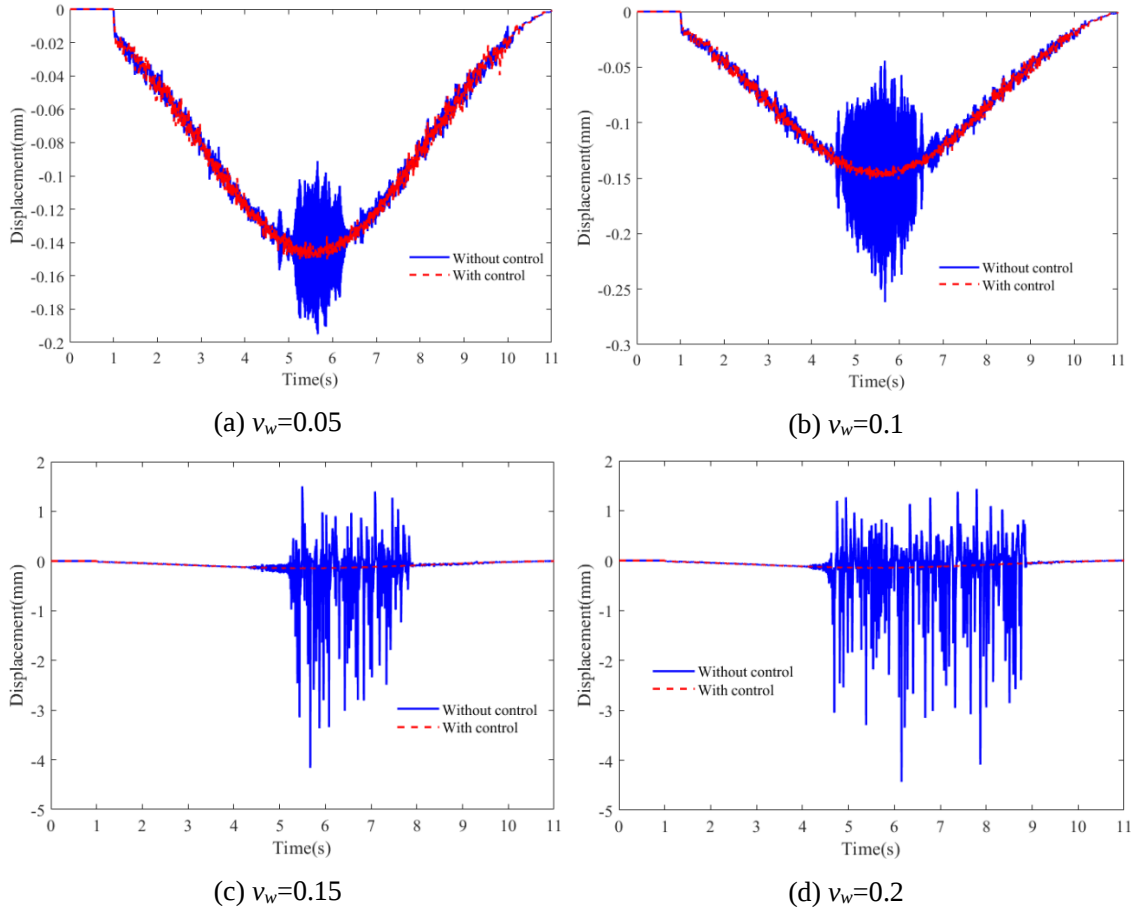
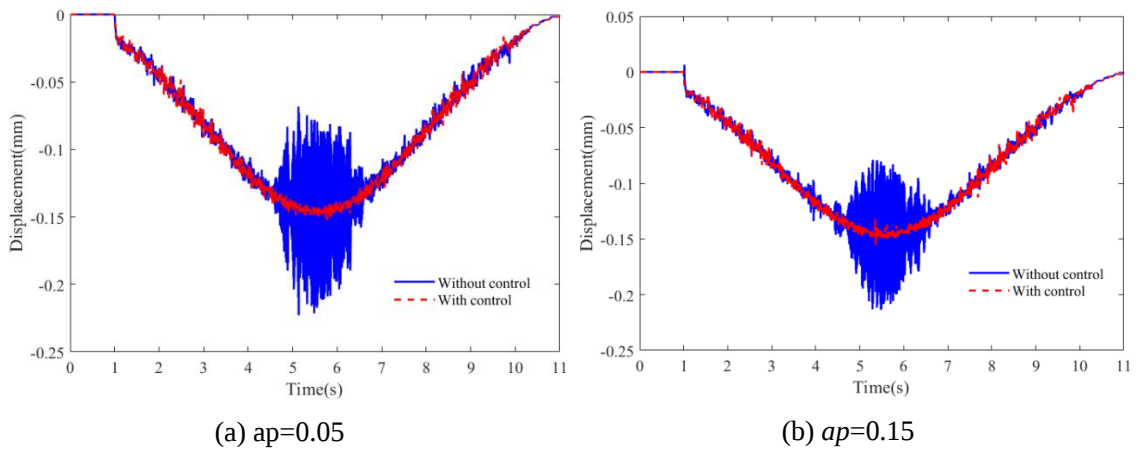


图 4-18 不同进给速度弹性构件振动位移控制联合仿真实验结果

图 4-19 所示为不同切削深度下弹性构件振动位移控制联合仿真实验结果。可以看出，设计的滑模变结构控制器对弹性构件振动位移波动有明显的抑制作用，验证了控制策略的有效性。



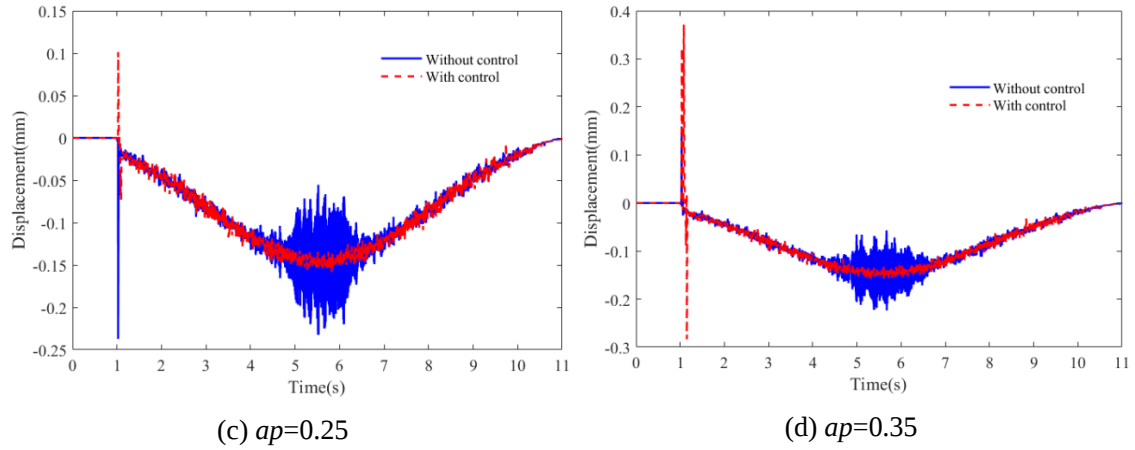


图 4-19 不同切削深度下弹性构件振动位移控制联合仿真实验结果

图 4-20 所示为不同切削转速下弹性构件振动位移控制联合仿真实验结果。可以看出，设计的滑模变结构控制器对弹性构件振动位移波动有明显的抑制作用，验证了控制策略的有效性。

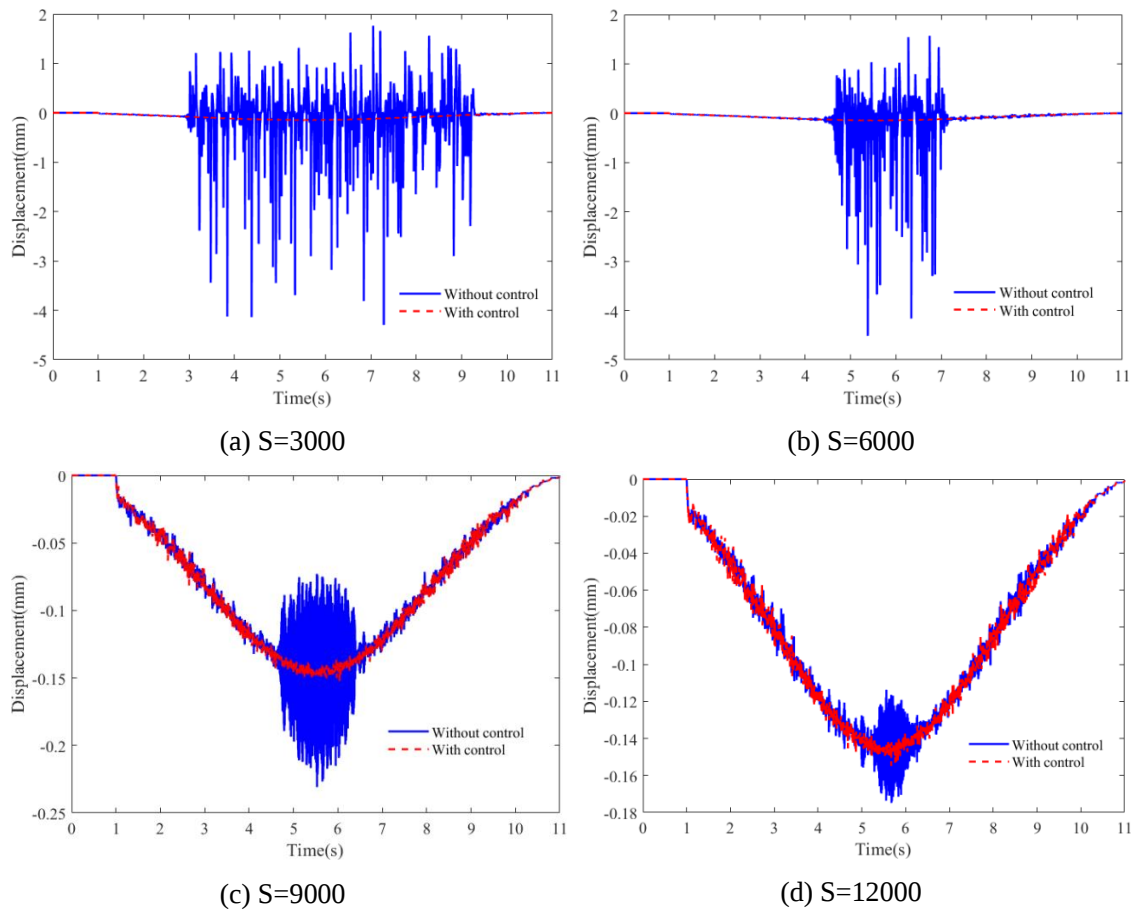


图 4-20 不同切削转速下弹性构件振动位移控制联合仿真实验结果

4.4.3 磨削力控制结果分析

为验证设计的滑模变结构控制策略抑制弹性构件振动过程中磨削接触力的

波动特性，如图 4-21 所示为不同切削进给速度下抑制弹性构件振动过程中磨削力的波动特性仿真实验结果，如图 4-22 所示为不同切削深度下抑制弹性构件振动的磨削力波动特性仿真实验结果，图 4-23 不同切削转速下抑制弹性构件振动的磨削力波动特性仿真实验结果。可以看出，通过抑制弹性构件振动位移的波动的同时，磨削接触力的波动明显降低，验证了控制策略的有效性。

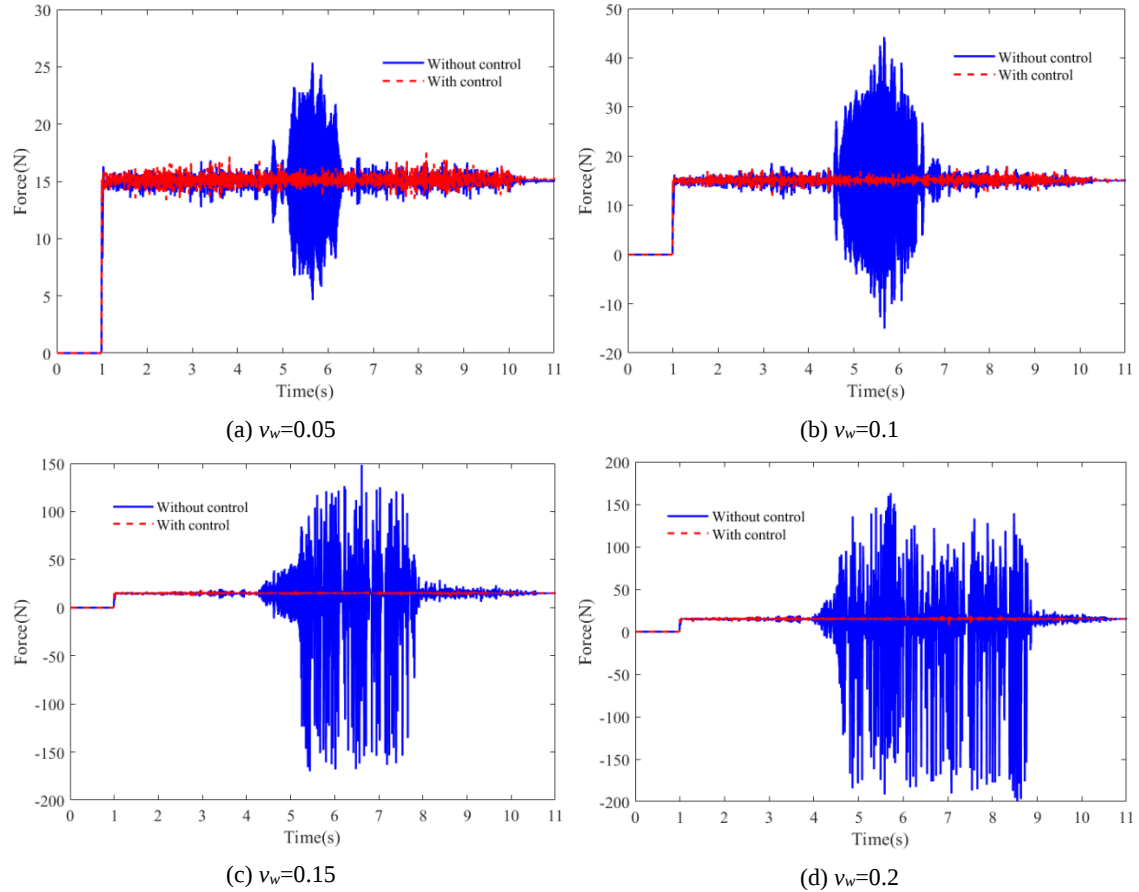
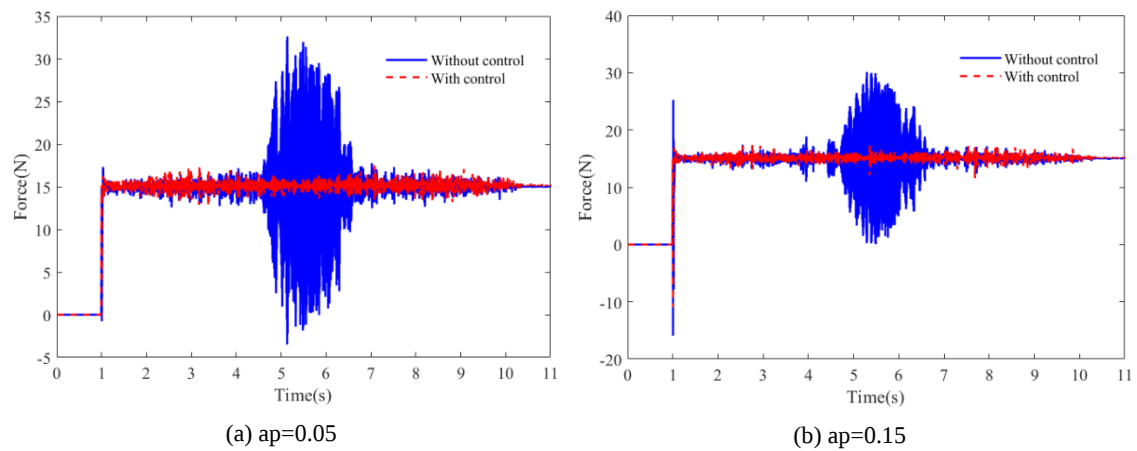


图 4-21 不同切削进给速度下抑制弹性构件振动的磨削力波动特性仿真实验结果



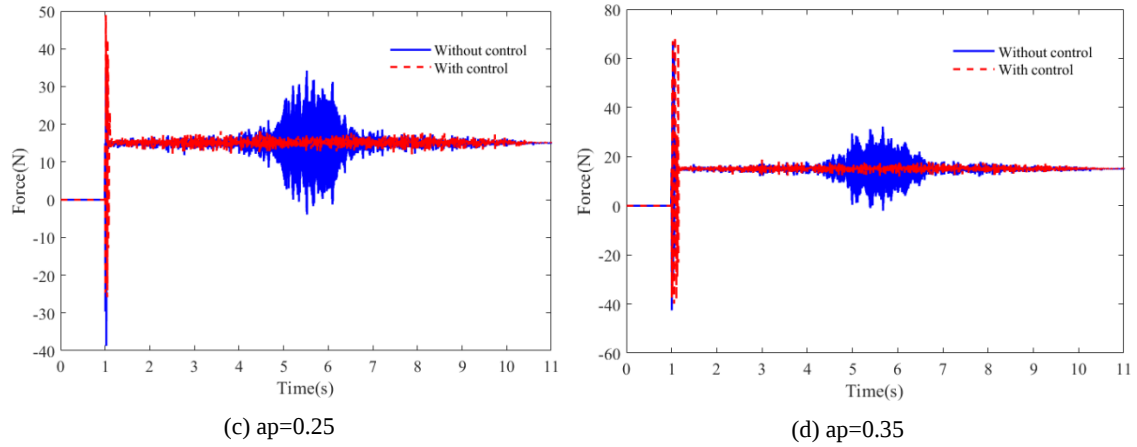


图 4-22 不同切削深度下抑制弹性构件振动的磨削力波动特性仿真实验结果

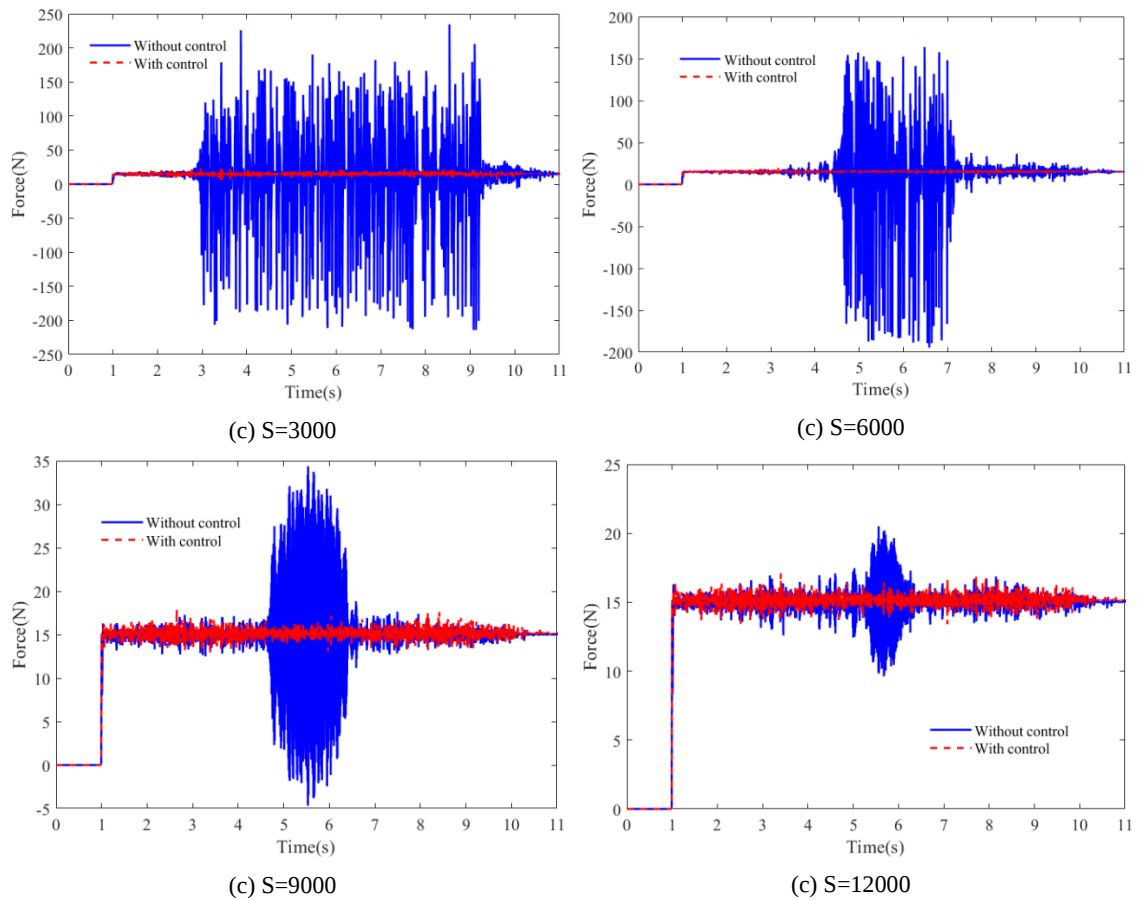


图 4-23 不同切削转速下抑制弹性构件振动的磨削力波动特性仿真实验结果

4.5 本章小结

根据弹性构件磨抛系统构成及弹性构件振动与磨削力之间的耦合关系，利用 MATLAB 软件搭建弹性构件磨抛系统仿真模型，基于弹性构件机器人气动伺服控制系统，设计了 PID 控制器和滑模变结构控制器，通过 MATLAB 和

ADAMS 软件搭建了弹性构件联合仿真实验模型，理论仿真结果与虚拟样机联合仿真结果均表明，设计的 PID 控制器和滑模变结构控制器能够实现弹性构件机器人磨抛恒力控制及振动抑制。

第五章 弹性构件机器人磨抛实验研究

在理论分析与仿真验证的基础上，本章搭建弹性构件机器人磨抛实验系统，完成实验系统硬件设备选型和控制系统设计，进行弹性构件机器人磨抛恒力控制和振动抑制实验测试，进一步验证本文设计的恒力控制及振动控制策略。

5.1 实验系统搭建

5.1.1 实验平台的搭建

为了测试磨抛装置在磨削弹性构件工况下的力控制性能以及弹性构件振动抑制效果，验证磨抛装置在自动化磨削作业中的应用价值，将磨抛装置安装于工业机器人末端，并夹持打磨机开展自动磨抛应用实验。预先设定机器人运动轨迹，使其在弹性构件表面上运行一条磨抛轨迹。设定装置磨削接触力期望力，通过实时调控磨抛装置系统输出力补偿磨削弹性构件磨削过程中因机器人系统产生的振颤以及弹性构件产生的结构变形所导致的磨削接触力的剧烈波动，从而实现弹性构件接触面的恒力磨削以及弹性构件磨削的振动抑制，保证弹性构件磨削表面质量。

搭建的实验系统主要由工业机器人、磨抛装置、气动打磨机、动力源气泵等组成，采用铝合金材质弹性梁模拟弹性构件，磨抛装置上端通过法兰盘安装在机器人末端，装置下端装有气动打磨机。磨削过程中打磨机与弹性梁始终保持接触。

5.1.2 硬件设备选型

（1）工业机器人

机器人选用埃夫特工业机器人 ER10-1600，如图 5-1 所示，该机器人为典型的六自由度串联机械臂，手腕搬运额定负载 10kg，机器人本体质量为 185kg，手臂工作可达半径区域为 1640mm，在空载情况下重复定位精度为 $\pm 0.05\text{mm}$ ，驱动方式采用伺服驱动。根据机器人参数可知，该机器人能够在承载磨抛装置与抛光机重力以及抛光正压力的前提下，保证足够的加工运动精度。

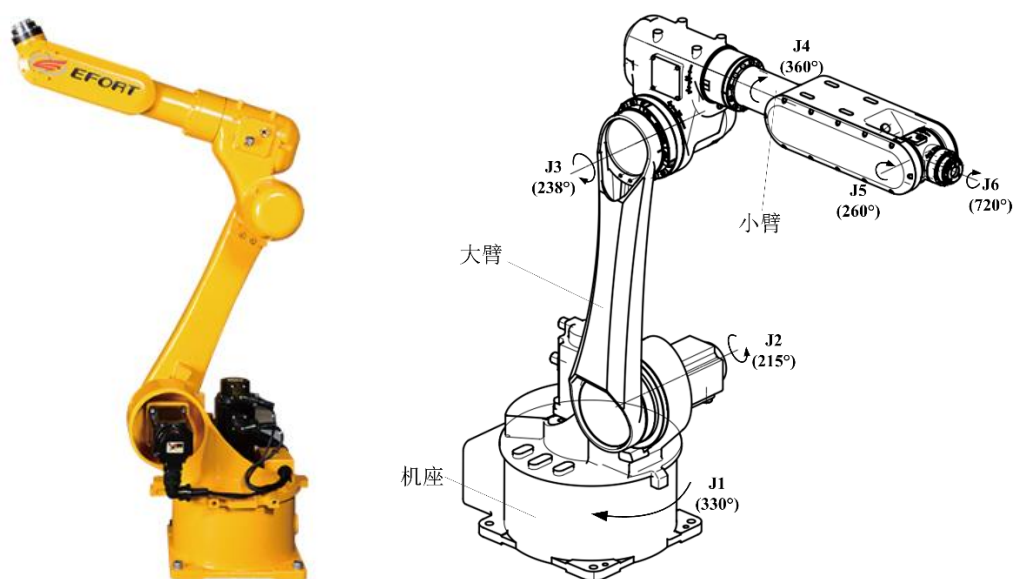


图 5-1 埃夫特工业机器人 ER10-1600

(2) 气动打磨机

磨抛工具选择国产台湾生产的台冠牌 TG-6905 (4 寸) 气动抛光研磨机作为实验的抛光设备, 如图 5-2 所示, 抛光机功率为 240W, 空载状况下气动抛光机空转最高转速可达 12000r/min, 气动抛光机耗气量约 350L/MN, 抛光机砂纸托盘规格为 100mm, 抛光机工作压力为 $6.0\text{kg}/\text{cm}^3$, 气动抛光机重量为 1.1kg, 气动抛光机为偏心型, 偏心距离为 5mm。该打磨机功率大, 抗压强度高, 使用寿命更长, 该抛光机采用铝合金外壳, 适用于材料去除率不高等场合, 如铝铜类金属以及木材表面等的打磨、抛光和除锈作业等。可根据作业需求快速更换不同型号的砂纸。磨抛机安装于磨抛装置下端, 通过设定安装位置使得气动抛光机、压力传感器, 气缸在一条轴线上。为保证磨抛作业过程中气源输出压力的稳定性, 选用一个单独的气泵对气动磨抛机单独提供气源压力。



图 5-2 台冠牌 TG-6905 气动打磨机

(3) 磨抛联接装置

如图 5-3 所示为末端磨抛联接装置，该装置主要由气缸、导向装置、压力传感器组成，磨抛装置上端与机器人末端相联接，下端与气动打磨机相联接。

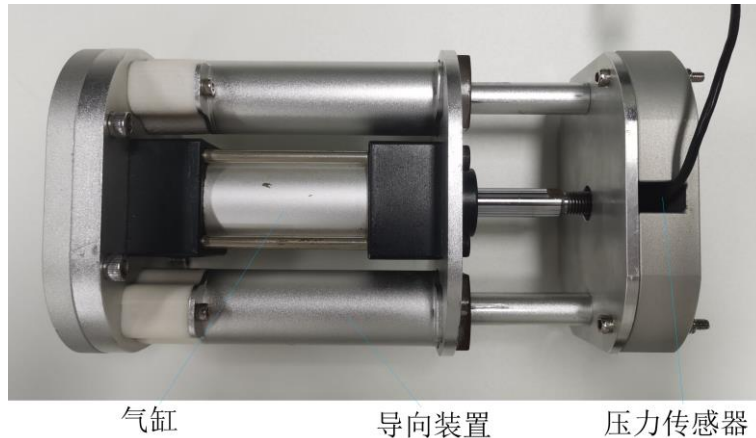


图 5-3 末端磨抛联接装置

(4) 气缸与气泵空气压缩机

如图 5-4 所示为气缸与气泵空气压缩机。气缸作为磨削加工中的恒力控制驱动单元，通过调节气缸腔体内部压力，来实现磨削过程中恒力。选用百汇公司生产的 SC32-25S 缓冲气缸，气缸直径为 32mm，气缸行程为 25mm，使用压力范围为 0.1~1.0MPa，使用速度范围为 30~800mm/s，工作温度为-20~80℃，气缸最大推力可达 250N。

气泵空气压缩机选用两台压缩机分别为气缸和气动抛光机提供动力源，空气压缩机将空气在气泵内压缩，然后进行增压，通过连接气管为气缸与气动打磨机提供稳定的气压，空气压缩机型号选择台州市奥突斯工贸有限公司生产的 OTS-980X3 无油空气压缩机，空气压缩机容积容量为 270L/min，额定排气压力 0.7MPa，匹配功率为 2940W，整机重量约 77kg，储气罐容积为 65L。



图 5-4 气缸与气泵空气压缩机

(5) 压力传感器与数字通信模拟放大器

如图 5-5 所示，压力传感器与数字通信模拟放大器。模拟放大器压力传感器安装于机器人末端，压力传感器检测端与末端磨抛装置相连接，压力传感器实时检测采集磨削作业过程中磨削力的波动，将采集的数据通过数字通信模拟放大器进行处理输出，输入到数据采集卡中。传感器选用大洋传感 DYLF-102 压力传感器，测量范围为 0~300N，输出电压为 0~10V，灵敏度输出为 $2.0 \pm 10\% \text{mV/V}$ ，非线性误差为 0.05%F.S。

信号放大器选用蚌埠传感器系统工程有限公司生产的蚌传 BSQ-3 单通道模拟量变送器，输入为 mV 级电压信号，输出电压为 0-10V，工作温度 -15℃~50℃。



图 5-5 压力传感器与数字通信

(6) 电气比例阀与调压阀

如图 5-6 所示，比例阀选用神驰气动有限公司生产的神驰 EPR20A0-41N02DL，输入电压为 0~10V，电压输出为 1~5V，重复精度 0.2%FS。调压阀选用浙江百汇气动元件有限公司生产的 AFR2000 气压调压阀，调节压力范围为 0.05~0.85Mpa。



图 5-6 电气比例阀与调压阀

(7) 数据采集卡

如图 5-7 所示为研华 USB-4704 多功能数据采集卡，尺寸为 132*80*32mm，

具有 4 路差分 and 8 路单端模拟输出，和 14 位 A/D 转换器，每个通道的增益可编程，单端或差分输入可自由组合。



图 5-7 研华 USB-4704 数据采集卡

(8) 传感元件选型

如图 5-8 为 PZT 振动传感器，传感器内部为压电陶瓷，实验过程中将传感器贴附在弹性构件表面。



图 5-8 PZT 振动传感器

5.1.3 控制系统的设计

气动伺服装置力控制过程是通过控制比例阀阀芯电压调节气缸腔体两端压力，气动伺服装置输出力大小与比例阀成正比。弹性构件机器人气动伺服系统磨抛恒力控制原理如图 5-9 所示，磨削作业气动伺服系统主要由缓冲气缸、气动比例阀、调压阀、油水分离器、气泵空气压缩机等元件组成。气泵空气压缩机产生气体，经过油水分离器过滤处理，将气体通过连接管输入比例阀，比例阀根据反馈的电压信号控制阀芯开口大小来控制气体输入压力大小。气体通过连接管，经过节流阀调节气体流速进入缓冲气缸，气缸输出端压力通过比例阀与调压阀共同控制气缸无杆腔与有杆腔的压力，调节磨削过程中气缸伸缩，补偿磨削接触力的波动，实现恒力控制磨削。

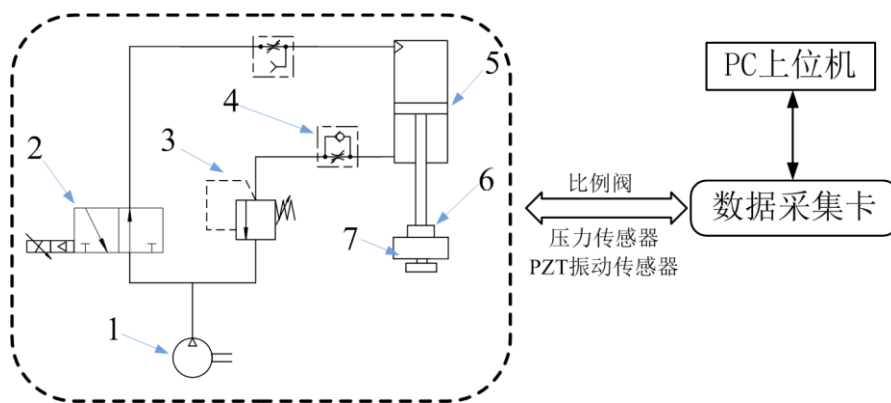


图 5-9 气动伺服系统磨抛恒力控制原理图

(1-气泵空气压缩机, 2-比例阀, 3-调压阀, 4-节流阀, 5-缓冲气缸, 6-压力传感器, 7-气动抛光机)

在弹性构件机器人磨抛实验中, 将设计的磨抛装置通过法兰盘安装于机器人末端, 机器人实现预定磨抛轨迹, 末端磨抛装置实现磨削过程中的恒力控制。磨抛装置力控制系统主要由控制对象、数据检测模块和驱动模块组成, 系统框图如图 5-10 所示, 被控对象为气动伺服系统, 在给定期望磨削力作用下, 磨削砂盘在弹性构件表面磨削, 使得弹性构件产生一定的弹性形变, 磨削接触力发生剧烈波动, 数据检测模块将采集的磨削接触力波动数据输入到控制模块, 控制模块将实时反馈的磨削力与气动伺服装置设置的预期力之间的误差, 分别通过设计的 PID 控制器和滑模变结构控制器计算产生控制量输入到驱动模块中, 驱动模块将接受的控制量输入电压信号控制气缸两端的压力, 并在 PID 控制器和滑模变结构控制器中根据反馈信号引导下不断调节驱动电压值大小, 通过磨抛装置实现恒力控制和振动抑制。

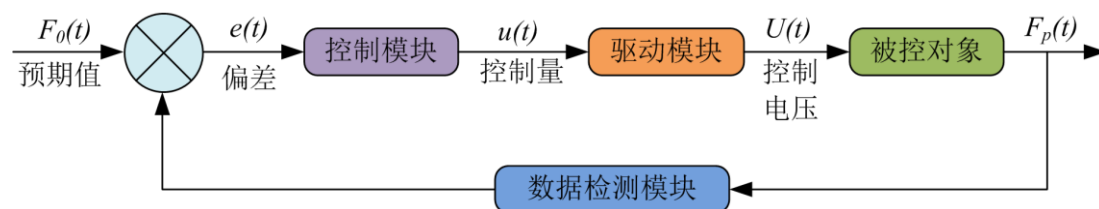


图 5-10 磨抛装置系统框图

5.1.4 上位机程序设计

为了更好的验证设计的控制策略准确性, 搭建弹性构件机器人磨抛实验系统, 分析弹性构件磨削过程中磨削接触力的控制效果以及弹性构件振动控制特性。本文根据弹性弹性构件机器人磨抛系统在 LABVIEW2020 软件设计上位机

人机交互界面，实验过程中，通过 USB 串口通讯，将下位机采集的数据实时反馈给上位机，上位机通过搭建的控制系统将反馈计算后输出的指令通过 USB 串口发送给下位机控制磨抛装置输出补偿，实现弹性构件磨抛恒力控制及振动抑制。下位机数据通过研华公司生产的 USB-4704 数据采集卡将磨削过程中 PZT 振动传感器、压力传感器、比例阀控制电压数据实时反馈给上位机。PID 控制策略通过 LABVIEW 软件搭建，滑模变结构控制策略通过 MATLAB 与 LABVIEW 软件共同搭建设计。磨削过程中可通过 LABVIEW 软件窗口观测磨削过程中磨削力与振动位移的波动，实时观测磨削控制效果。

基于 LABVIEW 软件可拖拽式编程的特点，利用 LABVIEW 软件图形编程语言搭建弹性构件机器人磨抛监控界面，滑模变结构控制算法通过 LABVIEW 调用 MATLAB 公式节点的形式完成磨抛恒力控制及振动抑制实验。利用动态可视化的监控界面，实时观测弹性构件机器人磨削过程中磨削力的波动、工件振动以及控制输出状态，辅助弹性构件机器人磨抛系统的调试和管理。

如图 5-11 所示为弹性构件机器人磨抛监控系统界面，从左往右依次是装置末端通过压力传感器采集的磨削力电压信号、PZT 振动传感器的电压信号、气缸无杆腔压力、控制输出、磨削力调零串口、振动位移调零串口、控制策略布尔开关、停止按钮、气缸有杆腔压力。通过布尔开关控制 PID 控制策略和滑模变结构控制策略的开启和关闭。PID 控制策略和滑模变结构策略相关调控参数通过在程序框图中设置。各个数据通过监控界面示波器展示，直接观测磨削力波动及弹性构件振动变化趋势，并完成数据的采集和保存。

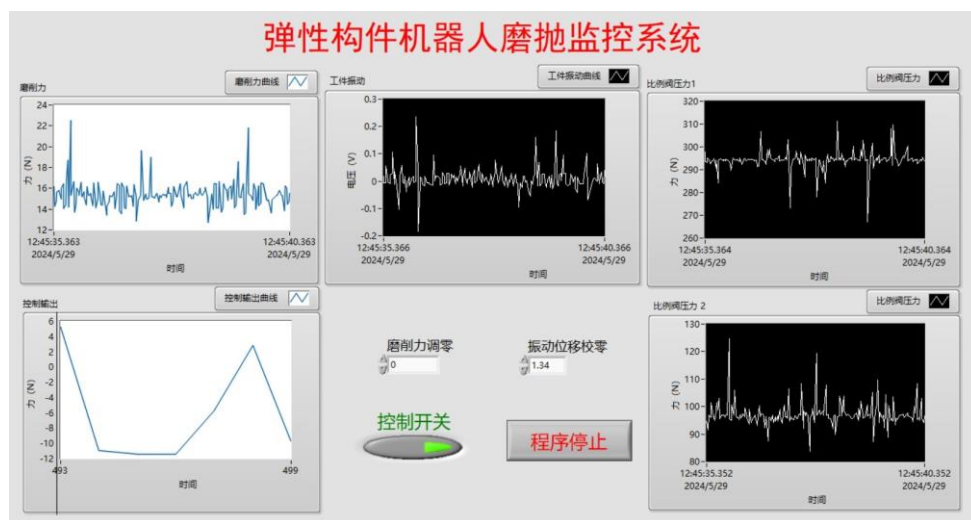


图 5-11 弹性构件机器人磨抛监控系统界面

5.2 实验结果分析

5.2.1 实验方案

为验证弹性构件机器人磨抛恒力控制及振动控制效果，搭建弹性构件机器人磨抛实验系统，如图 5-12 所示。在对弹性构件磨削加工作业时需要完成磨削过程中数据的采集。磨削过程通过机器人实现弹性构件表面磨抛轨迹，机器人末端磨抛装置从弹性构件左端向右端磨削，弹性构件底表面贴有 PZT 振动传感器，磨抛装置末端装有压力传感器，通过数据采集将数据输入到控制平台。实验具体流程如下：

（1）将弹性构件梁两端固定在行架上，磨抛装置安装在机器人末端，对机器人和磨抛装置进行校准，通过示教器控制机器人携带磨抛装置设定预定磨抛轨迹。调整机器人至磨削起始点，使磨削砂盘距离弹性梁构件 3mm 左右。启动气动打磨机，气动打磨机转速为 6000r/min。在电脑 LABVIEW2020 程序中给定期望磨削力，控制系统计算后通过比例阀输入给气缸一个固定的气体压力，控制气缸伸缩，控制磨抛装置末端打磨头接触工件表面，使磨削接触力达到设定期望磨削力，机器人按预先设定的磨抛轨迹从磨削起点到终点，机器人运动速度为 0.02m/s。数据采集卡将压力传感器实时采集的磨削接触力大小反馈给计算机控制系统，同时将磨削作用下弹性构件的振动反馈给主机控制系统。完成无控制策略下磨削接触力与弹性构件振动的数据采集。

（2）当完成一次无控制策略下的数据采集。让机器人按设定的磨抛轨迹完成有控制策略下的磨削作业。其他的操作步骤与无控制策略一致。为验证设计 PID 控制器和滑模变结构控制器的控制效果，本文采用 PID 控制策略和滑模变结构控制策略分别进行实验验证。数据采集卡将压力传感器测量的数据反馈给主机控制系统，控制系统将经过信号转换器处理的电压信号数据与期望磨削力作比较，并将误差值导入到搭建的控制器中，将控制器输出的电压输入到比例阀中，比例阀根据实时反馈的电压信号调整阀芯开口大小，补偿磨削过程中磨削接触力的波动，实现磨削恒力控制与振动抑制。

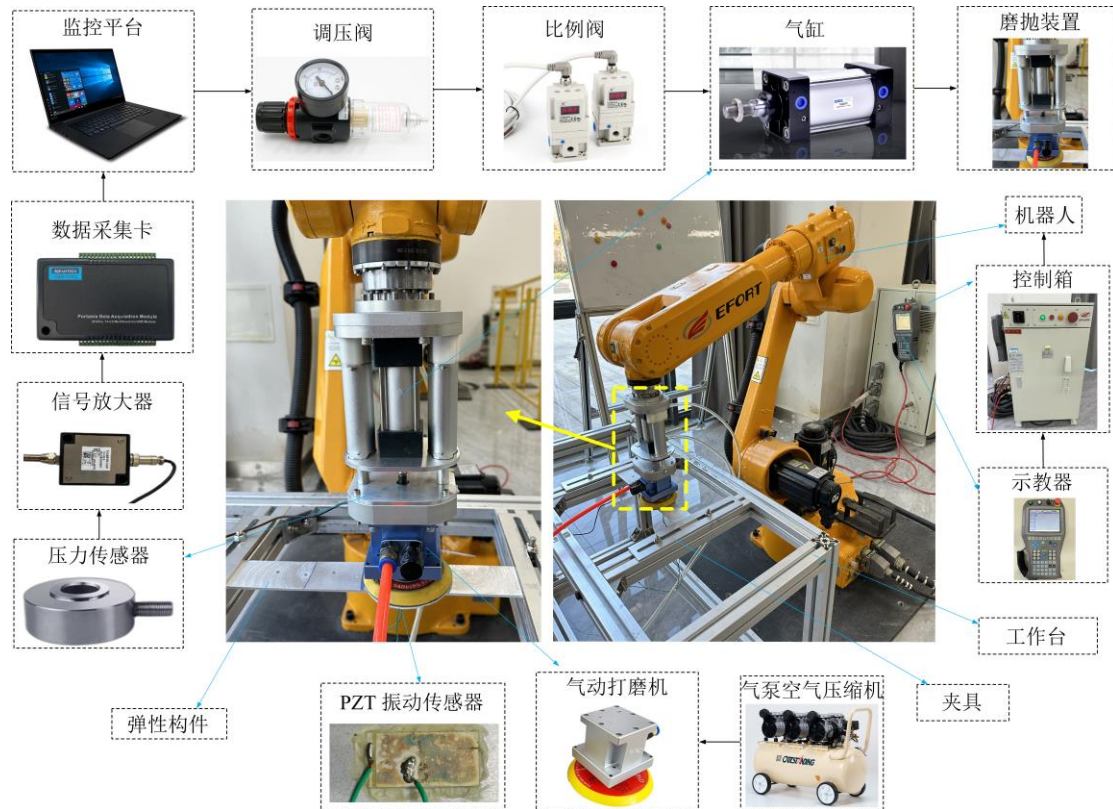


图 5-12 弹性构件机器人磨抛实验系统

5.2.2 实验结果

在机器人磨抛实验过程中，数据采集卡分别完成对气动磨抛装置末端压力传感器电信号、弹性构件底面压电信号的采集。并采用 PID 控制器和滑模变结构控制器，完成基于 PID 磨抛恒力控制实验和滑模变结构控制器的弹性构件振动抑制和磨削接触力恒力控制实验验证。

在弹性构件机器人恒力控制及振动抑制实验中，根据实时检测的数据，通过调控气动伺服系统来抑制磨削力的波动，实现弹性构件磨抛恒力控制和振动抑制。

（1）基于 PID 磨抛恒力控制实验结果

如图 5-13、图 5-14、图 5-15 所示分别为在 10N、20N、30N 期望力作用下 PID 控制策略磨削力实验控制结果，从图 5-13、图 5-14、图 5-15 可以看出，在不同磨削力工况下，未加控制弹性构件磨削接触力波动较大，加控制后磨削力波动明显降低，实验结果验证了设计的 PID 磨抛恒力控制策略的有效性。

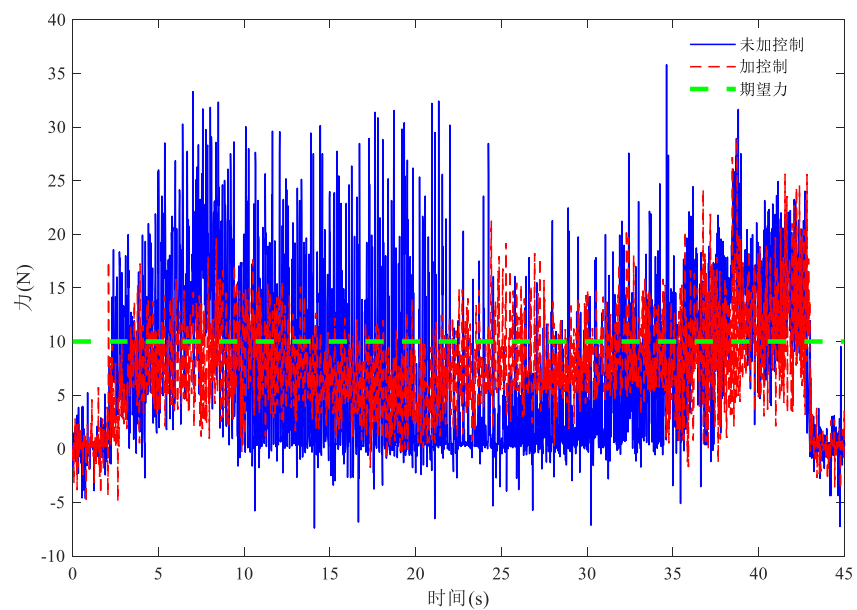


图 5-13 期望力 10N 磨削力控制实验结果

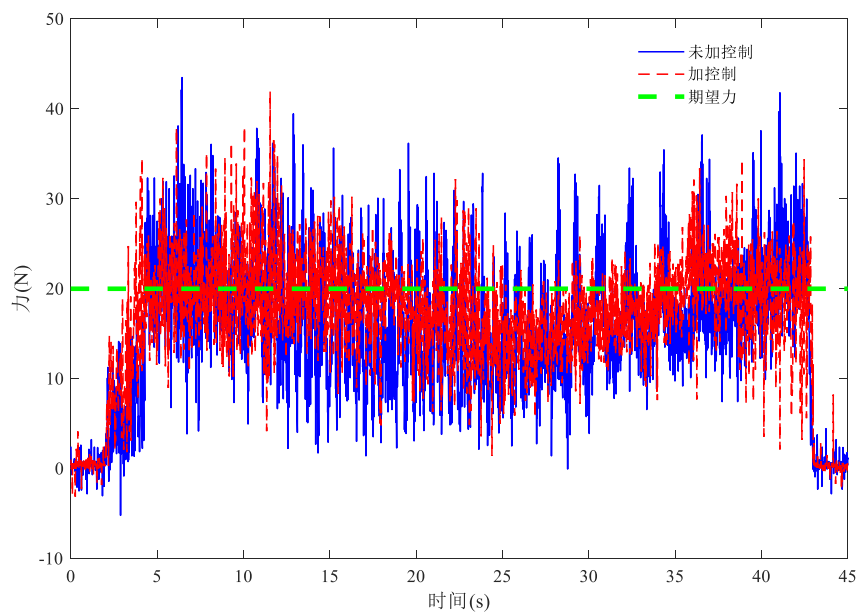


图 5-14 期望力 20N 磨削力控制实验结果

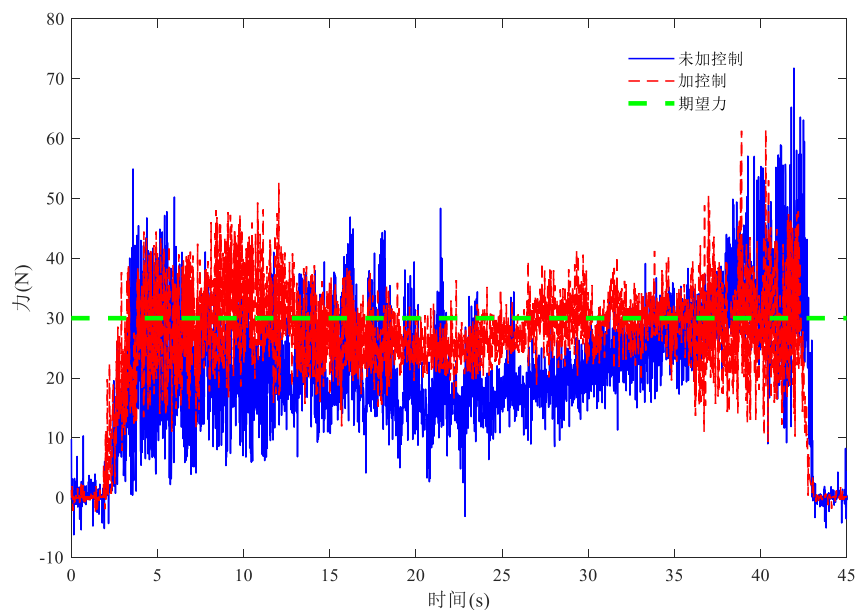


图 5-15 期望力 30N 磨削力控制实验结果

(2) 基于滑模变结构弹性构件振动抑制和恒力控制实验结果

图 5-16 为在期望力 10N 作用下弹性构件振动控制实验结果，图 5-17 为在期望力 20N 作用下弹性构件振动控制实验结果，图 5-18 为在期望力 30N 作用下弹性构件振动控制实验结果。可以看出，在不同磨削力工况下，未加控制弹性构件振动位移波动较大，加控制后弹性构件明显降低，弹性构件振动 PZT 电压信号明显衰减，实验结果验证了设计的滑模变结构控制策略的有效性。

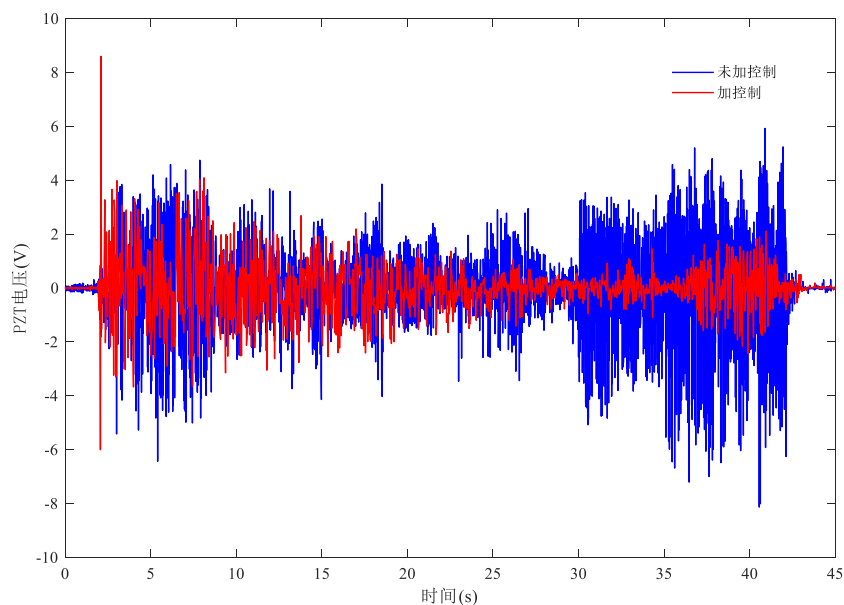


图 5-16 期望力 10N 振动控制实验结果

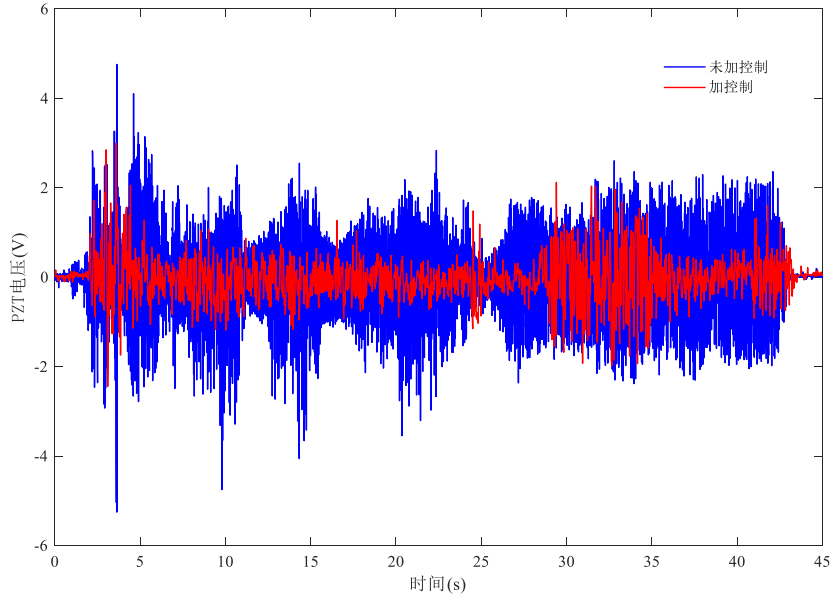


图 5-17 期望力 20N 振动控制实验结果

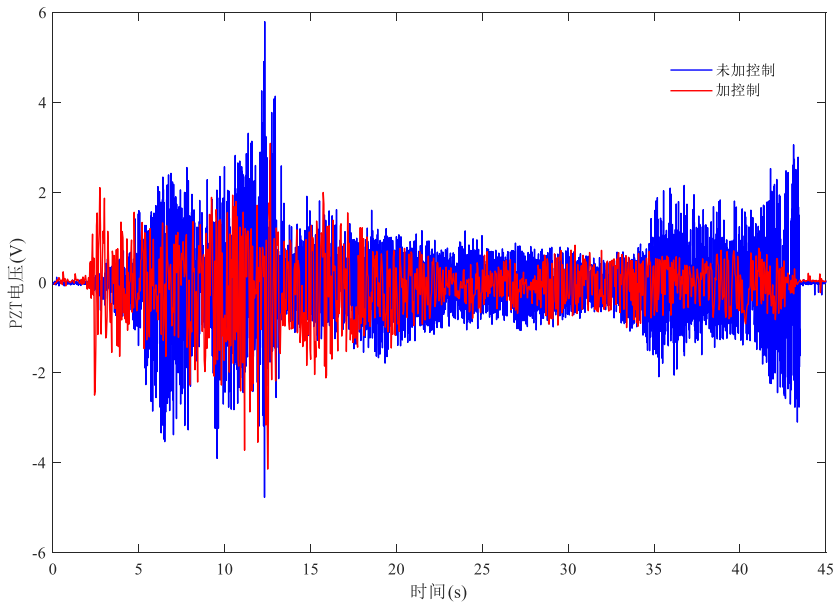


图 5-18 期望力 30N 振动控制实验结果

对弹性构件振动抑制的同时，观测磨削接触力的控制效果，如图 5-19 为期望力 10N 作用下弹性构件机器人磨抛恒力控制实验结果，如图 5-20 为期望力 20N 作用下弹性构件机器人磨抛恒力控制实验结果，如图 5-21 为期望力 30N 作用下弹性构件机器人磨抛恒力控制实验结果，可以看出，在不施加磨削力工况下，弹性构件磨削力波动响应较大，在磨削力作用下，磨削过程从弹性构件左端向右端移动时，磨削接触力依次减小，然后依次增大，在弹性构件中间磨削接触力最小；有控制策略下，经过滑模变结构控制器调节，弹性构件磨削接触

力能够维持在期望值附近波动，并且磨削接触力波动明显降低。但由于气动伺服系统固有特性的影响，无法使磨削接触力维持在一个恒定值，只能稳定在期望力附近波动。验证了滑模变结构控制策略的准确性。

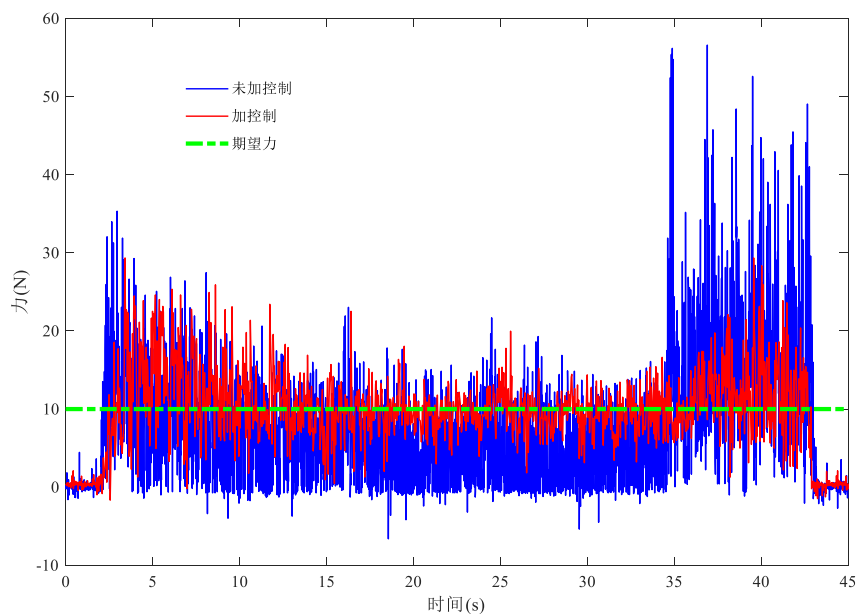


图 5-19 期望力 10N 磨削力控制实验结果

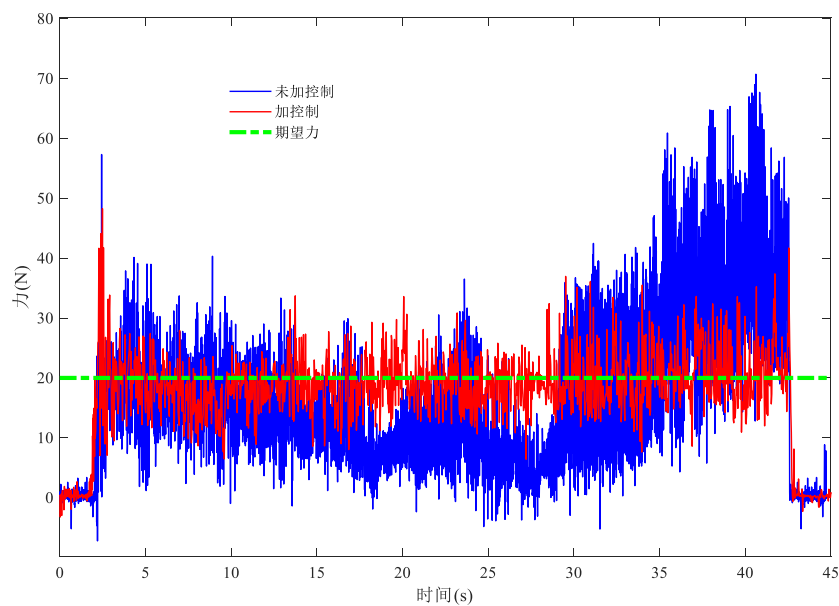


图 5-20 期望力 20N 磨削力控制实验结果

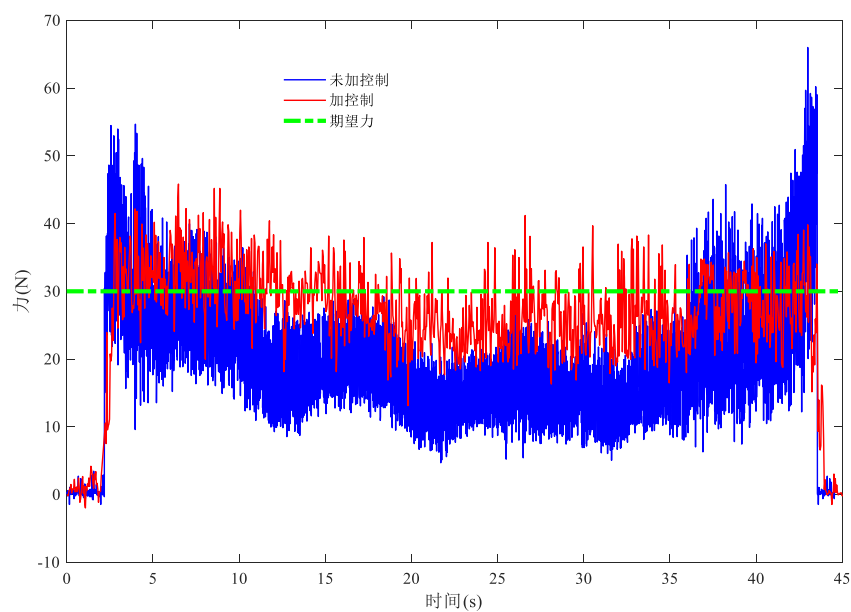


图 5-21 期望力 30N 磨削力控制实验结果

5.3 本章小结

根据上章理论分析，搭建了弹性构件机器人磨抛实验系统，分析了弹性构件恒力控制以及振动抑制的实验原理，并设计了控制系统和上位机程序，开展了弹性构件基于 PID 控制的磨抛恒力控制实验，以及基于滑模变结构弹性构件振动抑制和磨削力控制实验，验证了弹性构件控制策略的有效性。

第六章 总结与展望

6.1 总结

本文针对弹性构件机器人磨抛系统振动耦合特性及控制策略开展研究，分析了弹性构件磨削过程中存在的弹性振动行为，以及弹性构件振动耦合下的磨削力的波动特性，本文主要结论如下：

(1) 设计研制了一种机器人柔顺磨抛装置，分析了磨抛装置的工作原理，建立了柔顺磨抛装置气动伺服系统模型，并对弹性构件机器人磨抛气动伺服控制系统稳态误差进行了分析，结果表明，设计研制的机器人磨抛装置的气动伺服控制系统，能够为弹性构件机器人磨抛系统的恒力控制及振动抑制提供装置基础。

(2) 建立了弹性构件机器人磨抛系统的刚柔耦合动力学模型，分析了弹性构件磨抛系统构成及弹性构件振动与磨削接触力之间的耦合关系，揭示了弹性构件振动耦合下磨削力的波动特性，以及弹性构件振动与磨削力之间的存在的耦合关系，为弹性构件机器人磨抛系统的恒力控制及振动抑制提供理论基础。

(3) 设计了弹性构件机器人磨抛系统磨削力 PID 控制器和振动抑制滑模变结构控制器，搭建了弹性构件机器人磨抛虚拟样机，开展了联合仿真实验，结果表明，设计的 PID 控制器和滑模变结构控制器能够实现弹性构件机器人磨抛恒力控制及振动抑制。

(4) 搭建了弹性构件机器人磨抛实验平台，开展了弹性构件机器人磨抛控制实验，验证了弹性构件机器人磨抛恒力控制及振动抑制策略，为弹性构件机器人磨抛系统振动控制与恒力控制提供了思路。

6.2 展望

本文采用理论仿真与实验手段研究了弹性构件机器人磨抛系统振动耦合特性及控制策略，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) 弹性构件机器人磨抛系统是集机器人、磨抛装置和弹性构件于一体的多维耦合动力学系统，本文主要考虑弹性构件与磨抛装置之间的动态耦合关系，没有考虑机器人本身的动力学耦合特性，后续可以建立弹性构件机器人磨抛整体系统的多维耦合动力学模型，分析系统的振动耦合行为和负载特性。

(2) 本文基于研制的柔顺磨抛装置设计弹性构件机器人磨抛系统恒力控制及振动抑制策略，分析验证过程主要针对特定磨削工况，没有考虑系统实际存在的动态扰动作用，后续可结合智能算法设计弹性构件机器人磨抛轨迹控制方法以及动态自适应复合控制策略，实现弹性构件机器人磨抛系统的稳定性控制。

参考文献

- [1] 臧冀原, 刘宇飞, 王柏村, 等. 面向 2035 的智能制造技术预见和路线图研究 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(04): 285-308.
- [2] 宋学官, 来孝楠, 何西旺, 等. 重大装备形性一体化数字孪生关键技术 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(10): 298-325.
- [3] 董炳艳, 张自强, 徐兰军, 等. 智能应急救援装备研究现状与发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(11): 1-25.
- [4] 吴其林, 赵韩, 陈晓飞, 等. 多臂协作机器人技术与应用现状及发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(15): 1-16.
- [5] 赵欢, 葛东升, 罗来臻, 等. 大型构件自动化柔性对接装配技术综述 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(14): 277-97.
- [6] 陈咏华, 孙振国, 张文, 等. 爬壁机器人焊缝高效修形技术研究 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(09): 12-9.
- [7] 郝大贤, 王伟, 王琦珑, 等. 复合材料加工领域机器人的应用与发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(03): 1-17.
- [8] 李国杰. 智能起重机的关键特征和控制系统总体架构 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(24): 254-68.
- [9] 赖一楠, 叶鑫, 丁汉. 共融机器人重大研究计划研究进展 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(23): 1-11+20.
- [10] XIONG G, DING Y, ZHU L. Stiffness-based pose optimization of an industrial robot for five-axis milling [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 55: 19-28.
- [11] 张云志, 蒋倩. 大飞机翼盒机器人制孔系统集成技术研究 [J]. 航空制造技术, 2018, 61(07): 16-23.
- [12] METROM[EB/OL]. <https://metrom.com/> [Z]. 2023-3-25.
- [13] YANG H, KRUT S B, PIERROT F O, et al. On the design of mobile parallel robots for large workspace applications; proceedings of the International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in

- Engineering Conference, F, 2011 [C].
- [14] TIAN H, MA L, ZHU X, et al. Grinding method, trajectory planning and simulation of a 3 DOF knee grinding robot[J]. International Journal of Simulation Modelling, 2019, 18(1): 150-62.
- [15] ZHU Y, HE X, LIU Q, et al. Semiclosed-loop motion control with robust weld bead tracking for a spiral seam weld beads grinding robot [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 73: 102254.
- [16] KUKA. Automation in the aerospace industry[EB/OL]. <https://www.kuka.com/en-cn> [Z]. 2024-3-25
- [17] 丰飞, 严思杰, 丁汉. 大型风电叶片多机器人协同磨抛系统的设计与研究 [J]. 机器人技术与应用, 2018, (05): 16-24.
- [18] 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): 70-8.
- [19] ZHANG H, CHEN H, XI N, et al. On-line path generation for robotic deburring of cast aluminum wheels; 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, 2006: 2400-2405.
- [20] SONG H-C, SONG J-B. Precision robotic deburring based on force control for arbitrarily shaped workpiece using CAD model matching [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(1): 85-91.
- [21] VILLAGROSSI E, PEDROCCHI N, BESCHI M, et al. A human mimicking control strategy for robotic deburring of hard materials [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2018, 31(9): 869-80.
- [22] DAI S, LI S, JI W, et al. Force tracking control of grinding end effector based on backstepping plus PID [J]. Industrial Robot-the International Journal of Robotics Research and Application, 2022, 49(1): 34-46.
- [23] ZHANG T, YU Y, YANG L-X, et al. Robot grinding system trajectory compensation based on Co-kriging method and constant-force control based on adaptive iterative algorithm [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2020, 21(9): 1637-51.

- [24] 许家忠, 郑学海, 周洵. 复合材料打磨机器人的主动柔顺控制 [J]. 电机与控制学报, 2019, 23(12): 151-8.
- [25] 黄婷, 孙立宁, 王振华, 等. 基于被动柔顺的机器人抛磨力/位混合控制方法 [J]. 机器人, 2017, 39(06): 776-85+94.
- [26] TIAN F, LI Z, LV C, et al. Polishing pressure investigations of robot automatic polishing on curved surfaces [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(1-4): 639-46.
- [27] TIAN F, LV C, LI Z, et al. Modeling and control of robotic automatic polishing for curved surfaces [J]. Cirp Journal of Manufacturing Science and Technology, 2016, 14: 55-64.
- [28] DING Y, MIN X, FU W, et al. Research and application on force control of industrial robot polishing concave curved surfaces [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 2019, 233(6): 1674-86.
- [29] DONG Y, REN T, HU K, et al. Contact force detection and control for robotic polishing based on joint torque sensors [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(5-6): 2745-56.
- [30] ZHANG H, LI L, ZHAO J, et al. Design and implementation of hybrid force/position control for robot automation grinding aviation blade based on fuzzy PID [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(3-4): 1741-54.
- [31] XU X, ZHU D, ZHANG H, et al. Application of novel force control strategies to enhance robotic abrasive belt grinding quality of aero-engine blades [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(10): 2368-82.
- [32] XU X, CHEN W, ZHU D, et al. Hybrid active/passive force control strategy for grinding marks suppression and profile accuracy enhancement in robotic belt grinding of turbine blade [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 67: 102047.
- [33] ZHAO P, SHI Y. Composite adaptive control of belt polishing force for aero-engine blade [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(5):

988-96.

- [34] DU H, SUN Y, FENG D, et al. Automatic robotic polishing on titanium alloy parts with compliant force/position control [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 2015, 229(7): 1180-92.
- [35] MOHAMMAD A E K, HONG J, WANG D. Design of a force-controlled end-effector with low-inertia effect for robotic polishing using macro-mini robot approach [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 49: 54-65.
- [36] MOHAMMAD A E K, HONG J, WANG D, et al. Synergistic integrated design of an electrochemical mechanical polishing end-effector for robotic polishing applications [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 55: 65-75.
- [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] WANG Q, WANG W, ZHENG L, et al. Force control-based vibration suppression in robotic grinding of large thin- wall shells [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 67: 102031.
- [39] DING B, ZHAO J, LI Y. Design of a spatial constant-force end-effector for polishing/deburring operations [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(11-12): 3507-15.
- [40] ZHOU H, MA S, WANG G, et al. A hybrid control strategy for grinding and polishing robot based on adaptive impedance control [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2021, 13(3): 16878140211004034.
- [41] WANG J, LIANG F, ZHOU H, et al. Analysis of position, pose and force decoupling characteristics of a 4-UPS/1-RPS parallel grinding robot [J]. Symmetry-Basel, 2022, 14(4): 825.
- [42] CHAI Y-Y, SONG Z-G, LI F-M. Active aerothermoelastic flutter suppression of composite laminated panels with time-dependent boundaries [J]. Composite

- Structures, 2017, 179: 61-76.
- [43] SINA S A, HADDADPOUR H. Axial-torsional vibrations of rotating pretwisted thin walled composite beams [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, 80: 93-101.
- [44] WANG X, QIN Z M. Nonlinear modal interactions in composite thin-walled beam structures with simultaneous 1:2 internal and 1:1 external resonances [J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 86(2): 1381-405.
- [45] JIN X, SUN Y W, GUO Q, et al. 3D stability lobe considering the helix angle effect in thin-wall milling [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(9-12): 2123-36.
- [46] WANG S S, JIA Z Y, LU X H, et al. Simultaneous optimization of fixture and cutting parameters of thin-walled workpieces based on particle swarm optimization algorithm [J]. Simulation-Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, 2018, 94(1): 67-76.
- [47] JIA Z, LU X, YANG K, et al. Stability of micro-milling thin-walled part process [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(5-6): 1529-44.
- [48] JIANG X, YANG N, ZHANG Y, et al. An improved dynamics modeling during milling of the thin-walled parts based on magnetorheological damping fixture [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121(3-4): 2683-98.
- [49] LIU Y F, TANG D, JU J Y. Electromechanical Coupling Dynamic and Vibration Control of Robotic Grinding System for Thin-Walled Workpiece [J]. Actuators, 2023, 12(1): 37.
- [50] 陈齐志. 工业机器人铣削系统颤振分析与加工精度提升方法研究[D]. 山东大学, 2022.
- [51] 项升. 全驱动绳悬吊并联机器人动态轨迹规划研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2020.
- [52] 房善想. 面向航空叶片表面超声强化的机器人运动规划与柔顺控制研究

- [D]. 北京交通大学, 2021.
- [53] 王战玺, 张益铭, 张邦海,等. 双机器人协作轴孔装配力柔顺控制技术研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(03): 20-33.
- [54] 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.
- [55] WANG K, YAN G, YAN B. Position/Force control of robot based on passive compliance [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(7): 661-5.
- [56] 李闯. 抛磨机器人力反馈装置设计与实验研究 [D]. 苏州大学, 2016.
- [57] XUEMAN S, YUEYUE X, LILI S, et al. Constant force Control of Centrifugal Pump Housing Robot Grinding Based on Pneumatic Servo System [J]. Applied Sciences, 2022, 12(19): 9708.
- [58] 马煜轩. 负载口独立的高压电-气位置伺服系统自抗扰控制研究[D]. 华中科技大学, 2022.
- [59] 母焰. 恒力砂带磨抛材料去除理论与实验研究 [D]. 吉林大学, 2017.
- [60] YIN C Z, Z. Concise and Quick Reference Manual of Machining Process [M]. Beijing, China: Chemical Industry Press, 2017.
- [61] LI B M Z, B.; LI, Q. Abrasives,Abrasive Tools and Grinding Techniques [M]. China: Chemical Industry Press: Beijing, 2015.
- [62] 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-Basel, 2022, 12(20): 10352.
- [63] ZHANG D, LI C, JIA D. Investigation into engineering ceramics grinding mechanism and the influential factors of the grinding force [J]. School of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University, 2014, 7(4): 19-34.
- [64] 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.
- [65] SINGIRESU S R. Mechanical Vibration, 5th ed. [M]. New York, NY, USA: Pearson Education Inc, 2011.

- [66] 焦宗夏, 吴帅, 李洋, 等. 液压元件及系统智能化发展现状及趋势思考[J]. 机械工程学报, 2023, 59(20): 357-384.
- [67] 郝正杰. 基于自抗扰控制的永磁同步电机驱动系统关键技术研究[D]. 吉林大学, 2022.
- [68] 辛杨桂, 高世一, 赵运强, 等. 机器人搅拌摩擦焊接力-位混合控制的应用研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(08): 91-98.
- [69] 周宁, 姚建勇, 邓文翔. 基于神经网络的比例伺服阀阀芯液动力补偿鲁棒智能控制[J]. 机械工程学报, 2024, 60(04): 126-133.
- [70] 熊璐, 杨兴, 卓桂荣, 等. 无人驾驶车辆的运动控制发展现状综述[J]. 机械工程学报, 2020, 56(10): 127-143.

攻读学位期间发表的学术论文目录

- [1] Yufei Liu, **Lang Wu**, En Lu, Jinyong Ju. Vibration coupling characteristics and grinding force control of an elastic component grinding system[J]. Mechanical Sciences, 2024, 15:123-136.. (SCI: 001190480700001, 导师第 1)
- [2] 发明专利：一种模块化可拼装的减振吸盘，CN2024101384271，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 3。

致谢

三年时光，转瞬即逝。在论文即将完稿之际，向给予我帮助、支持与关怀的老师、同学、朋友及家人表达我诚挚的谢意！

首先，感谢敬爱的导师刘玉飞老师，三年来，老师在生活、科研上都给予了我无微不至的关怀和指导。老师用他渊博的学识、广阔的见识，带领我们在研究道路上一路前行。从论文选题到撰写整个过程，都给与精心的指导，使我的科研素养有了大幅提高，老师执着的钻研精神、严谨的治学态度深深的影响着我，使我终身收益。老师在百忙之中，时刻关注我们的课题进展，对我们生活中的困难也非常关心。在三年的时间里，每次差点向困难低头时，是老师用他的关怀与帮助，使我重新振作斗志昂扬。老师是我科研道路上的领路人，更是我人生路上的指航灯！

其次，非常感谢课题组鞠锦勇老师。在课题进行的过程中，鞠老师一直密切关注课题进展，给了我很多专业的指导意见。感谢苏学满老师，在课题遇到困难时，给予了很多帮助与指点。由衷祝愿鞠老师、苏老师身体健康，工作顺利。

衷心感谢已经毕业的聂洋师兄、汤东师兄对我科研上的指点，及生活上的支持与帮助；感谢同门陈洋洋、严志川、纪旭阳时刻在实验室刻苦学习，专心科研，助我沉下心思钻研学术；感谢师弟朱祖浩、邵传好、师妹包琪、金文丽，与你们并肩作战，共同进步，有你们的陪伴与帮助，使我的研究生生活充满干劲；感谢室友徐腾、李屹在生活上对我的关心和帮助，感谢你们让我三年的科研生活变得更加精彩。

最后，深深的感谢我的父母和家人，是你们一直在我身后默默支持我，鼓励我，理解我，让我得以专心读书，无论何时你们都给我无尽的关爱，永远是我前行路上最幸福的港湾和坚实的后盾。

尚德敏学 唯实惟新

