

分类号: TH113

学校代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2210120142



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目

弹性薄壁件机器人搬运系统柔顺减振

装置设计及振动控制研究

论 文 作 者

陈洋洋

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：2210120142

安徽工程大学

弹性薄壁件机器人搬运系统柔顺减振装置设计及振动控制研究

DESIGN AND VIBRATION CONTROL OF ROBOTIC
COMPLIANT HANDLING SYSTEM FOR ELASTIC THIN-
WALLED PARTS

学生姓名：陈洋洋

校内导师：刘玉飞（副教授）

专业学位类别：机械

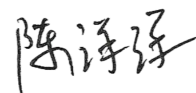
研究方向：机器人动力学与控制

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：



日期：2024 年 5 月 27 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

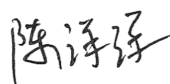
学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

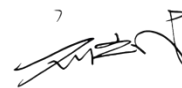
本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名



指导教师签名：



日期：2024 年 5 月 27 日

日期：2024 年 5 月 27 日

弹性薄壁件机器人搬运系统柔顺减振装置设计及振动控制研究

摘 要

弹性薄壁件机器人搬运系统是由机器人、末端执行器和弹性薄壁件组成的刚柔耦合系统，由于机器人本体和弹性薄壁件的低刚度特性，搬运作业过程系统易产生弹性振动以及刚柔耦合系统的振动传递行为，弹性薄壁件机器人搬运系统的振动抑制对搬运稳定性具有重要意义。对此，本文开展弹性薄壁件机器人搬运系统柔顺减振装置设计及振动控制研究，主要研究内容如下：

（1）弹性薄壁件机器人搬运系统振动特性分析。基于机器人和弹性薄壁件的等效刚度模型，结合虚拟样机仿真模态数据建立机器人-弹性薄壁件整体系统的等效动力学模型，分析不同位姿下机器人搬运系统的振动特性，以及机器人与弹性薄壁件之间的振动耦合关系，为后续弹性薄壁件机器人搬运系统的柔顺减振装置设计提供理论基础。

（2）电磁驱动柔顺减振装置设计及性能分析。根据弹性薄壁件机器人搬运系统的振动传递特性，设计一种具有机器人与弹性薄壁件联接和振动传递抑制功能的电磁驱动柔顺减振装置，建立电磁驱动柔顺减振装置的电磁线圈-永磁铁交互动力学模型，分析电磁驱动柔顺减振装置的幅频特性和振动位移传递特性。

（3）弹性薄壁件机器人搬运系统的振动控制策略研究。基于设

计研制的电磁驱动柔顺减振装置，设计弹性薄壁件机器人搬运系统的振动控制策略，通过电磁驱动柔顺减振装置的电磁力控制实现机器人搬运系统的振动主动控制，搭建弹性薄壁件机器人搬运系统虚拟样机联合仿真平台，进行振动控制效果仿真与性能验证。

（4）弹性薄壁件机器人搬运系统实验研究。研制电磁驱动柔顺减振装置实验样机，基于此搭建弹性薄壁件机器人柔顺搬运实验平台，开展弹性薄壁件机器人柔顺搬运系统实验测试，验证弹性薄壁件机器人柔顺搬运系统的主被动振动控制效果。

关键词：弹性薄壁件，机器人搬运系统，电磁驱动，柔顺减振装置，振动控制

DESIGN AND VIBRATION CONTROL OF ROBOTIC COMPLIANT HANDLING SYSTEM FOR ELASTIC THIN-WALLED PARTS

ABSTRACT

The robot handling system of elastic thin-wall parts is a rigid-flexible coupling system composed of robot, end-effector and elastic thin-wall parts. Due to the low stiffness characteristics of the robot body and elastic thin-wall parts, the system is easy to produce elastic vibration and the vibration transfer behavior of the rigid-flexible coupling system in the handling process. In this regard, this paper carries out the design of compliant vibration damping device and vibration control research of robot handling system for elastic thin-walled parts. The main research contents are as follows:

(1) Vibration characteristics analysis of elastic thin-walled parts robot handling system. Based on the equivalent stiffness model of the robot and the elastic thin-walled part, the equivalent dynamic model of the robot-elastic thin-walled part as a whole system is established by combining the simulation modal data of the virtual prototype. The vibration characteristics of the robot handling system under different poses and the vibration coupling relationship between the robot and the elastic thin-walled part are analyzed. It provides a theoretical basis for the design of flexible vibration damping device for the subsequent robot handling system of elastic thin-walled parts.

(2) Design and performance analysis of flexible vibration damping device for electromagnetic drive. According to the vibration transmission characteristics of flexible thin-wall parts robot handling system, an electromagnetic drive flexible vibration damping device with the functions of robot and flexible thin-wall parts

connection and vibration transmission suppression was designed. The electromagnetic coil-permanent magnet interaction dynamics model of the flexible vibration damping device was established to analyze the amplitude-frequency characteristics and vibration displacement transmission characteristics of the flexible vibration damping device.

(3) Research on vibration control strategy of flexible thin-walled parts robot handling system. Based on the designed and developed electromagnetic drive flexible vibration damping device, the vibration control strategy of the robot handling system of elastic thin-walled parts is designed. The active vibration control of the robot handling system is realized through the electromagnetic force control of the electromagnetic drive flexible vibration damping device, and the virtual prototype joint simulation platform of the flexible thin-walled parts robot handling system is built to simulate the vibration control effect and verify the performance.

(4) Experimental research on robot handling system of elastic thin-walled parts. An experimental prototype of electromagnetic driven flexible vibration damping device was developed, based on which an experimental platform for flexible handling of flexible thin-walled parts robot was built, and the experimental test of flexible handling system of flexible thin-walled parts robot was carried out to verify the active and passive vibration control effect of flexible handling system of flexible thin-walled parts robot.

Key words: elastic thin-walled parts, robot handling system, electromagnetic drive, flexible damping device, vibration control

目录

摘 要	III
ABSTRACT	V
第 1 章 绪论	10
1.1 课题来源	10
1.2 课题研究背景及意义	10
1.3 国内外研究现状	11
1.3.1 机器人搬运系统设计及特性分析	11
1.3.2 搬运机器人末端执行器设计	12
1.4 主要研究内容	13
1.5 本章小结	14
第 2 章 弹性薄壁件机器人搬运系统振动特性分析	15
2.1 系统构成	15
2.2 机器人振动特性分析	16
2.2.1 机器人末端等效刚度	16
2.2.2 机器人刚度仿真分析	21
2.2.3 机器人模态参数仿真求解	25
2.2.4 机器人幅频特性分析	26
2.3 机器人搬运系统振动特性分析	27
2.3.1 弹性薄板等效刚度	28
2.3.2 有限元仿真验证	35
2.3.3 机器人搬运系统幅频特性分析	36
2.4 本章小结	38
第 3 章 电磁驱动柔顺减振装置设计及性能分析	39
3.1 电磁驱动柔顺减振装置设计	39
3.1.1 结构设计	39
3.1.2 动力学模型	40
3.2 电磁驱动柔顺减振装置驱动力分析	42
3.2.1 电磁线圈磁场强度计算	42

3.2.2 电磁驱动力的输出特性	45
3.3 电磁驱动力仿真分析	47
3.3.1 永磁铁磁场强度仿真	47
3.3.2 电磁力仿真	49
3.3.3 电磁驱动力动态特性仿真分析	51
3.4 电磁驱动柔顺减振装置减振性能分析	52
3.5 整体系统减振性能分析	55
3.6 本章小结	58
第 4 章 弹性薄壁件机器人搬运系统振动控制策略研究	59
4.1 主动振动控制策略	59
4.1.1 反馈系统特性分析	59
4.1.2 控制系统搭建	61
4.2 振动控制虚拟样机实验	63
4.2.1 虚拟样机平台搭建	63
4.2.2 仿真结果分析	66
4.3 本章小结	68
第 5 章 弹性薄壁件机器人搬运系统实验研究	69
5.1 实验样机及平台搭建	69
5.1.1 样机研制	69
5.1.2 实验平台搭建	69
5.1.3 硬件设备选型	70
5.1.4 上位机程序设计	73
5.2 实验测试及结果分析	73
5.2.1 实验方案设计	73
5.2.2 实验结果分析	75
5.3 本章小结	77
第 6 章 结论与展望	78
6.1 结论	78
6.2 展望	79

致 谢	80
参考文献	81
攻读学位期间发表的学术论文目录	86

第 1 章 绪论

1.1 课题来源

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），意在弹性薄壁件机器人搬运系统的柔顺减振装置设计及其振动控制研究。

1.2 课题研究背景及意义

机器人技术是衡量一个国家制造业水平的重要体现^[1]，国务院发布的《中国制造 2025》明确提出要大力发展机器人技术^[2]。相较于传统工业而言，工业机器人以其高灵活性和可靠性渗透到各行各业的工业领域中，在各种新兴产业中大放光彩^[3-4]，例如搬运、钻孔、打磨等方面。同时机器人的便捷性和可编程性使工业制造在更简单、更智能化的同时保障了产品的效率和质量^[5]。随着现代科技的快速发展，制造业革新了很多行业的生产模式^[6-7]。工业机器人作为机器人一个重要研究领域，融合了各种工业自动化应用的先进技术，近年来备受制造业的关注^[8-12]。



图 1-1 机器人搬运作业

物料搬运是常见的生产作业场景，传统的人工作业模式难以满足智能化升级的需要，而机器人搬运系统能够提高生产过程的柔性化和生产效率，近年来在物料搬运、装配、物流等场景中得到广泛应用^[13-16]。随着显示行业的飞速发展，作为重要材料的基板玻璃的使用量也在增加^[17]，而在其生产过程过，不可

避免的要在各个生产线上进行转线搬运加工，如图 1-1 所示。因此，如何能同时保持良品率和搬运效率，成为目前的学术研究热点。目前基板玻璃在往着更大更薄的方向发展^[18]，如图 1-2 所示，机器人搬运过程的平稳性是保证作业精度的前提。由于机器人本体低刚度以及负载扰动的影响，机器人在搬运过程中，尤其是运动转换时表现出不可忽略的残余振动，这将降低机器人搬运系统的作业精度、效率和稳定性^[19-20]。例如，在大型玻璃基板的生产中，随着玻璃基板向更大、更薄方向发展，玻璃基板易产生振动扰动而产生破碎^[21-22]。由于机器人本体和弹性薄壁件的低刚度特性，搬运作业过程系统易产生弹性振动以及刚柔耦合系统的振动传递行为，弹性薄壁件机器人搬运系统的振动抑制对搬运稳定性具有重要意义。



图 1-2 薄壁件机器人搬运作业

1.3 国内外研究现状

1.3.1 机器人搬运系统设计及特性分析

在搬运机器人的作业载荷能力方面，对于低负载机器人而言，通常应用在高速产线上。李春光等人设计了一种通过视觉控制机器人的控制系统^[23]，进一步提高了机器人的作业效率。对于重载作业的功能需求，Bock 设计了一种大型建筑模块自动装配抓握系统的设计，还研究了重载搬运机器人的作业稳定性问题^[24]，Yu 开发了一种新型的独立动力外骨骼机器人套装，用于辅助在搬运重物料，该技术大大减少了操作员的身体疲劳^[25]，My 设计了一种新型机器人一种新颖的机器人机构，通过在串联连杆之间增加并联连杆和使用液压执行器驱动机

器关节。增加结构刚度的同时还可以减少关节变量的数量，并限制末端执行器平行于地面移动，以便机器人以更有效和简化的方式抓取和释放工件^[26]。Hanwen Yu 等人基于柔性减速器的简化模型和拉格朗日第二方程，建立了描述高速重载码垛机器人关节柔性的刚柔耦合动力学模型，分析了机器人的振动特性^[27]。You 利用 Lagrange 方程和假设模态法建立的工业机器人动力学模型，考虑了关节和连杆弹性的重载，然后针对伺服控制回路设计了基于奇异摄动理论的复合控制算法，大大提高了机器人的控制性能^[28]。Sakai 研究了不确定环境参数下重载搬运机器人的控制问题^[29]，Wu 提出了两种强化学习算法，即策略迭代（PI）算法和价值迭代（VI）算法。然后，结合两种算法的优点，即分别具有令人满意的收敛速度和不受可行性初始控制策略的限制，提出了一种混合迭代（HI）算法，该算法既能达到令人满意的收敛速度，又能消除可行性初始控制策略的限制^[30]，为了提高作业效率和灵活性，已有研究主要是通过智能优化算法对机器人的作业路径进行规划^[31-33]。现有搬运机器人的扰动抑制主要是通过机器人本体作业轨迹优化^[34-37]和输入整形控制^[38-41]

1.3.2 搬运机器人末端执行器设计

搬运机器人通过末端执行器与工件接触，末端执行器的结构性能直接决定了作业效率和质量。在此方面的研究，主要是针对作业对象的需求，设计新型的末端执行器，例如针对柔软物质的柔顺末端执行器或仿生机械手爪^[42-44]，同时，通过与机器视觉相融合，能够实现搬运过程对环境的智能感知^[45]。

为了提高作业效率，搬运机器人可以采用多末端执行器或多机械臂^[46-49]，在提高精度的同时也提高了作业效率。Gürel 提供了一种机器人单元，由多台机器人和在机器之间传递零件的物料搬运机器人组成的串行生产系统，提出了将机器人速度和机器人活动排序决策结合在一起的模型和算法，效率更高且可以显著节约能源^[50]。Neil^[51],Drobouchevitch^[52]等进一步研究了双爪夹持搬运机器人的作业调度问题，考虑生产完全相同零件的双夹持器机器人细胞中的调度操作问题,使生产零件的长期平均时间最小化，进一步提高效率。苗登雨等人设计出了一种新型的真空抓取吸盘，可以实现不同类别的抓取^[53]。

末端执行器的在机器人的实际应用领域取得了一定的发展，但仍面临一些

问题。大多数末端执行器的专用行较强但通用行较差，对于机器人产生的振动，只能通过本身固有的结构进行被动减振，针对上述情况，主动控制应运而生。管声启等人提出一种力控策略，进一步提高了欠驱动机械手在易碎零件分拣过程中的稳定性^[54]，李坚提出一种机器人磨削力控制，进一步提高了打磨精度^[55]。力控末端执行器未来必然将向高精度、高频响、电驱化、多自由度柔顺、重载化、高集成化和智能化等方向发展^[56]。余觉设计了电磁柔顺装置及其力反馈控制系统，相比目前主要的变刚度设计，显著提高了柔顺控制的响应速度、精度和稳定性^[57]。赵亚平提出了一种气囊式气缸，既具有气囊式气缸承载能力大、缓和冲击能力强的特点，同时也具有音圈电机的快速响应特性进行快速力补偿的特点^[58]。机器人在搬运方向逐渐在往电气化，信息化、智能化方向发展，但主要是通过改进机器人结构或者优化算法，对于弹性薄壁件振动控制的末端装置的研究较少。

1.4 主要研究内容

本文针对弹性薄壁件机器人搬运系统柔顺减振的装置设计及振动控制研究，具体内容如下：

第一章：绪论。结合弹性薄壁件机器人搬运系统柔顺减振装置设计及振动控制研究存在的问题，介绍课题研究背景及意义，分析搬运机器人结构特性、控制特性、机器人末端执行器的国内外研究现状。

第二章：弹性薄壁件机器人搬运系统动力学特性分析。利用 DH 参数法建立机器人运动学模型，基于机器人运动学模型和胡克定律得到机器人的末端等效刚度，利用有限元刚度法建立弹性薄壁件的等效刚度模型。基于机器人和弹性薄壁件的等效刚度模型，结合虚拟样机仿真模态数据建立机器人-弹性薄壁件整体系统的等效动力学模型，分析不同位姿下机器人搬运系统的振动特性，以及机器人与弹性薄壁件之间的振动耦合关系，为后续弹性薄壁件机器人搬运系统的柔顺减振装置设计提供理论基础。

第三章：设计电磁驱动柔顺减振装置。根据弹性薄壁件机器人搬运系统的振动传递特性，设计一种具有机器人与弹性薄壁件联接和振动传递抑制功能的电磁驱动柔顺减振装置，并建立电磁驱动柔顺减振装置的机电耦合动力学方程。

利用毕奥萨伐尔定律建立电磁线圈-永磁铁交互动力学模型，并对电磁线圈和永磁铁进行参数仿真分析，对电磁线圈-永磁铁交互动力系统进行仿真分析，验证电磁特性。分析电磁驱动柔顺减振装置的幅频特性和振动位移传递特性。最后对电磁驱动柔顺减振装置和机器人搬运整体系统进行特性分析。

第四章：弹性薄壁件机器人搬运系统振动控制策略研究。基于设计研制的电磁驱动柔顺减振装置，确定弹性薄壁件机器人搬运系统的控制策略，确定反馈信号并搭建弹性薄壁件机器人搬运系统的控制系统，通过电磁驱动柔顺减振装置的电磁力控制实现机器人搬运系统的振动主动控制，进行仿真分析。然后搭建虚拟样机联合仿真平台，进一步验证系统性能。

第五章：弹性薄壁件机器人搬运系统实验研究。研制电磁驱动柔顺减振装置实验样机和所需硬件选择，并根据前文内容搭建弹性薄壁件机器人搬运实验系统和上位机程序设计。然后开展弹性薄壁件机器人搬运实验测试，设置不同对比组别，通过激光位移传感器采集薄壁件振动位移，对比验证电磁装置减振效果。

第六章：总结与展望。对全文的内容进行总结并进行展望。

1.5 本章小结

介绍了机器人搬运系统存在的问题和课题研究背景及意义，分析了搬运机器人系统设计及特性分析、搬运机器人末端执行器设计的国内外研究现状，引出本文的主要研究内容。

第2章 弹性薄壁件机器人搬运系统振动特性分析

弹性薄壁件机器人搬运系统是由机器人、末端执行器和弹性薄壁件组成的刚柔耦合系统，由于机器人本体和弹性薄壁件的低刚度特性，搬运作业过程系统易产生弹性振动以及振动传递行为。本章结合弹性薄壁件机器人搬运系统构成，采用机器人和弹性薄壁件的等效刚度模型，结合虚拟样机仿真模态数据建立机器人-弹性薄壁件整体系统的等效动力学模型，分析弹性薄壁件机器人搬运系统的振动特性。

2.1 系统构成

如图 2-1 所示为弹性薄壁件机器人搬运系统示意图，主要由机器人、电磁驱动柔顺减振装置、吸盘和弹性薄壁件构成。

(1) 机器人：选用 EFT 工业机器人，最大负载 10kg，性能稳定、准确度高

(2) 电磁驱动柔顺减振装置：电磁柔顺减振装置通过减振法兰与六自由度机械臂末端相连，主要起到减振作用，能够有效的抑制工件在搬运过程中产生的振动，避免工件损坏。

(3) 末端执行器：真空式吸盘作为末端执行器的一种，结构简单、质量小且使用方便，主要通过真空发生器，形成一定强度的负压，从而起到吸附工件，达到搬运的作用。

(4) 弹性薄壁件：选用 PVE 材质的工件，需要吸盘吸附一端面，在搬运过程中会产生振动。

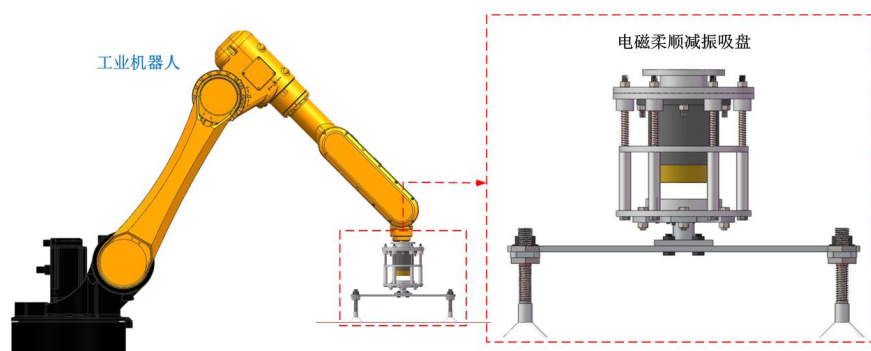


图 2-1 弹性薄壁件机器人搬运系统示意图

2.2 机器人振动特性分析

2.2.1 机器人末端等效刚度

由于机器人结构复杂，为便于分析机器人的振动特性，采用等效刚度的方法，将机器人整体等效为弹簧结合机器人虚拟样机的模态参数去分析机器人的振动特性。

由于机器人的末端等效刚度模型与到机器人末端的位置坐标有密切关系，在实际搬运的过程中，机器人的位姿调整主要依靠大臂的角度调整，故将六自由度机器人简化为二自由度机器人，建立机器人运动学模型^[59]，然后计算其等效末端刚度，如图 2-2 所示。

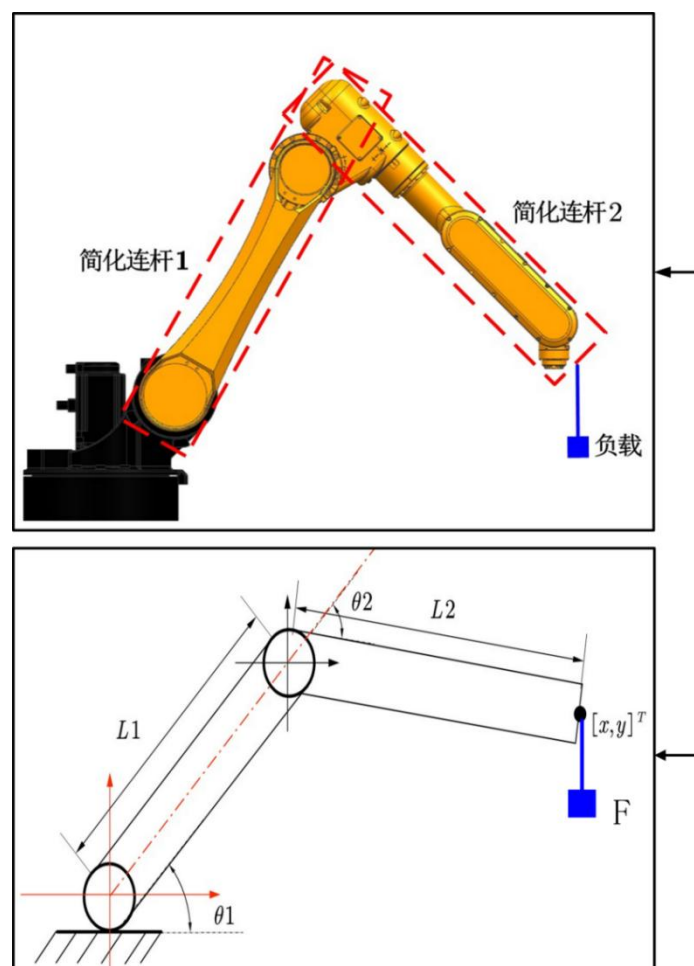


图 2-2 机器人简化模型

根据胡克定律可得，机器人末端在受到力时，会在 Z 轴向产生一个位移，轴向位移主要由机械臂关节变形和机械臂臂杆挠度变形叠加组成^[60]，其末端刚

度为:

$$K_j = \frac{F_x}{\Delta \delta} \quad (2-1)$$

$$\Delta \delta = \Delta \delta_\theta + \Delta \delta_l \quad (2-2)$$

(1) 机械臂关节变形

为分析机械臂关节的变形，首先建立机器人的雅可比矩阵和位姿矩阵，然后得到机器人的末端受力时的位移。因此建立搬运机器人的运动学模型，此时 DH 参数为表 2-1 所示

表 2-1 机器人初始 DH 参数

连杆	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	a_1	0	0	θ_1
2	a_2	0	0	$-\theta_2$

机器人末端点的位置与等效连杆旋转角度之间的关系为

$$\begin{cases} x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (2-3)$$

将其微分，得

$$\begin{cases} dx = \frac{\partial x}{\partial \theta_1} d\theta_1 + \frac{\partial x}{\partial \theta_2} d\theta_2 \\ dy = \frac{\partial y}{\partial \theta_1} d\theta_1 + \frac{\partial y}{\partial \theta_2} d\theta_2 \end{cases} \quad (2-4)$$

改写成矩阵模式得

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

令 J 为机器人的速度雅可比矩阵

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

上式可简化为

$$dX = Jd\theta \quad (2-7)$$

当末端受到力 $F(x,y)$ 时，机械臂的力雅克比矩阵为

$$J^T = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

从而得到臂杆 1 和臂杆 2 的力矩为

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

机器人主要关节参数如表 2-2 所示

表 2-2 机器人关节参数

关节	刚度系数 k (Nm/arc.min)	转动惯量 j (J/×10 ⁻⁴ kg·m ²)
J ₁	196	9.1
J ₂	196	9.1
J ₃	108	1.3
J ₄	6.42	0.44
J ₅	3.72	0.27
J ₆	2.35	0.27

将机器人各关节刚度映射到机器人整体工作空间中，结合机器人运动雅克比矩阵和力雅克比矩阵将机器人关节的变形映射到机器人操作空间中，从而将机器人整体关节的微变形叠加体现到机器人末端。当机器人末端在搬运负载时，将其等效为末端受到一个力 F ，通过机器人动力学逆解可以得出关节 i 所受到的力 τ ，设机器人关节的微变形为 d_i ，得：

$$\tau = k_{\theta} d_i \quad (2-10)$$

通过查阅上述图表，运用所建立的雅克比矩阵，得出机器人的关节刚度和机器人末端等效刚度之间的关系。机器人的力雅克比矩阵为

$$\tau = J^T(q)F_2 \quad (2-11)$$

机器人的运动雅克比矩阵为

$$\Delta \delta_{\theta} = J(q)d_{qi} \quad (2-12)$$

结合上式，可得：

$$\Delta \delta_\theta = J(q)k_\theta^{-1}J^T(q)F \quad (2-13)$$

在不考虑机械臂杆挠度产生形变的情况下，此时

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & \cos(\theta_1)L_1 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & \sin(\theta_1)L_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & \cos(\theta_2)L_2 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & \sin(\theta_2)L_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

则机器人末端坐标系为

$${}^0T = {}^0A_1A_2 \quad (2-16)$$

(2) 机械臂杆挠度变形

为便于分析，本节假定机器人臂杆的质量均匀分布，且材料均匀，并将其简化为一个满足胡克定律的柔性杆进行等效处理，只考虑其弯曲变形。如图 2-3 所示为机器人臂杆末端受到力 F 时产生的挠度变形 W_B 。

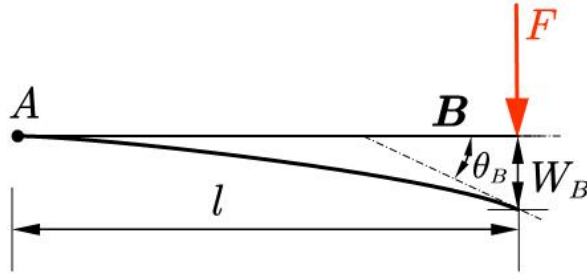


图 2-3 柔性杆受力模型

$$W = -\frac{Fx^2}{6EI}(3l-x) \quad (2-17)$$

假设机械臂末端负载和位移的成正比

$$k_g = \frac{F}{W} \quad (2-18)$$

F 为受到的广义力， W 为变形位移，此时，对于机器人臂杆 i 刚度为

$$k_{ii} = \{k_{xi} \quad k_{yi} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0\} \quad (2-19)$$

当广义力 F 施加在臂杆末端时，其形变为

$$w_i = \begin{bmatrix} \frac{F_{xi}}{k_{xi}} & \frac{F_{yi}}{k_{yi}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2-20)$$

其中, $\Delta_{xi} = \frac{F_{xi}}{k_{xi}}, \Delta_{yi} = \frac{F_{yi}}{k_{yi}}$ 由弹性材料力学可得 $E=210\text{Gpa}$, $I_l=0.00011$,

$I_2=0.00026$

$$\Delta x_i = \frac{F_{xi} l_i^3}{3EI_i}, \Delta t_i = \frac{3I_i}{l_i^2}, \Delta x_i = \frac{F_{xi} l_i}{EA t_i} \quad (2-21)$$

$$\Delta x_1 = \frac{F_{x1} l_1}{EA t_1}, \Delta x_2 = \frac{F_{x1} l_1}{EA t_1} + \frac{F_{x2} l_2}{EA t_2} \quad (2-22)$$

在机器人臂杆垂直平面内, 收到力 F_x 时产生的微变形 Δx , 在弹性变形内, 可以理解为臂杆进行了一个微小角度的旋转, 由于变形量较小, 可得角度

$$\sin \beta = \beta, \beta = \frac{F_{xi}}{k_{xi} l_i} = \frac{F_{xi}}{EA_i} \quad (2-23)$$

此时位姿变换矩阵为

$$A_1^* = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \beta_1) & -\sin(\theta_1 + \beta_1) & 0 & \cos(\theta_1 + \beta_1)L_1 \\ \sin(\theta_1 + \beta_1) & \cos(\theta_1 + \beta_1) & 0 & \sin(\theta_1 + \beta_1)L_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

$$A_2^* = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 + \beta_2) & -\sin(\theta_2 + \beta_2) & 0 & \cos(\theta_2 + \beta_2)L_2 \\ \sin(\theta_2 + \beta_2) & \cos(\theta_2 + \beta_2) & 0 & \sin(\theta_2 + \beta_2)L_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

则机器人末端坐标系为

$${}^0_2T^* = {}^0_1A^* {}^1_2A^* \quad (2-26)$$

此时参数表如表 2-3 所示

表 2-3 机器人受力 DH 参数

连杆	a_i	α_i	d_i	θ_i	β
1	a_1	0	0	θ_1	β_1
2	a_2	0	0	$-\theta_2$	$-\beta_2$

当未施加负载的情况下时, 设机器人末端的初始变换矩阵为 T , 末端施加负载时, 臂杆形变, 最终变换矩阵为 T^* 。

取 ΔT 为理想情况下的坐标系到实际应用坐标系的微分变换，既.

$$\begin{aligned} {}^0_2T \cdot \Delta T &= {}^0_2T^* \\ \Delta T &= {}^0_2T^{-1} \cdot {}^0_2T^* \end{aligned} \quad (2-27)$$

$$\Delta T = \begin{bmatrix} \Delta n_{lx} & \Delta o_{lx} & \Delta a_{lx} & \Delta p_{lx} \\ \Delta n_{ly} & \Delta o_{ly} & \Delta a_{ly} & \Delta p_{ly} \\ \Delta n_{lz} & \Delta o_{lz} & \Delta a_{lz} & \Delta p_{lz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-28)$$

根据上述内容求出机器人等效杆的旋转变换量

$$\Delta \delta_{lx} = \frac{(\Delta o_{ly} - \Delta a_{lx})}{\sqrt{(\Delta o_{lz} - \Delta a_{ly})^2 + (\Delta a_{lx} - \Delta n_{lz})^2 + (\Delta n_{ly} - \Delta o_{lx})^2}} \quad (2-29)$$

从而可以得到机器人等效臂杆在末端受到负载时所产生的形变为

$$\Delta \delta_l = [\Delta \delta_{lx} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (2-30)$$

叠加机器人关节挠度和臂杆挠度得到机器人在搬运负载的总挠度，即

$$\Delta \delta = \Delta \delta_\theta + \Delta \delta_l \quad (2-31)$$

将机器人关节刚度产生的振动位移和臂杆刚度产生的振动位移进行叠加，得到机器人末端的总振动位移，即

$$\Delta \delta = \Delta \delta_\theta + \Delta \delta_l \quad (2-32)$$

假设机器人末端的受到力 F :

$$F = [F_x \quad F_y \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (2-33)$$

从而得到机器人在末端垂直方向的等效刚度

$$K_j = \frac{F_x}{\Delta \delta} \quad (2-34)$$

2.2.2 机器人刚度仿真分析

上文通过等效刚度法得出了机器人的等效刚度理论模型，由于理论模型存在精度问题，无法分析结构复杂的机器人，故通过理论结合仿真分析进行优化。在 SolidWorks 中建立机器人的简化模型，将其导入 ADAMS 中，在机器人各个关节之间添加阻尼和刚度，具体数值如表 2-2 所示。

在机器人模型末端施加不同的负载，通过输出机器人末端标记点的位移，得出机器人末端的等效刚度。为模拟实际应用的过程，本文将通过竖直方向和

水平方向六个位姿去验证上文内容，每个位姿对应的角度变化如表 2-4 所示。

表 2-4 机器人位姿角度

位姿	角度 1	角度 2
纵向位姿 1	60.9°	-115.8°
纵向位姿 2	70.8°	-112.0°
纵向位姿 3	76.9°	-103.7°
横向位姿 1	71.0°	-112.0°
横向位姿 2	70.1°	-110.8°
横向位姿 3	65.7°	101.7°

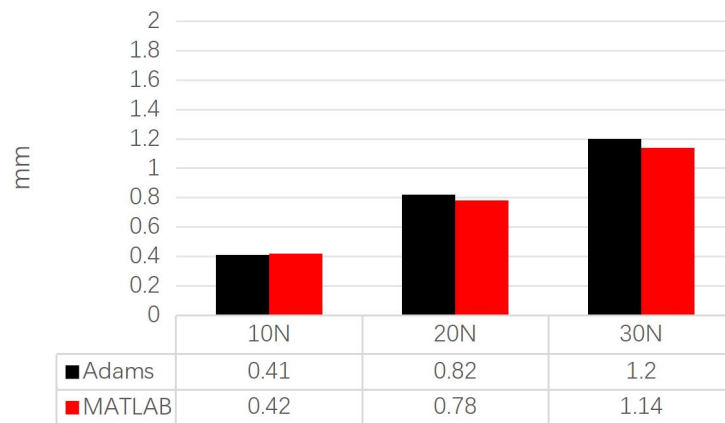


图 2-4 机器人竖向搬运位姿示意图

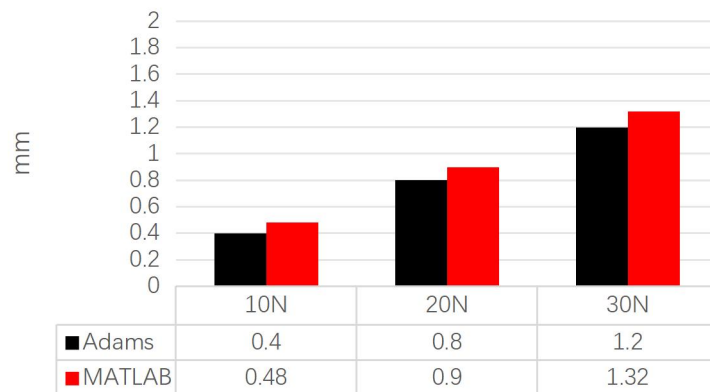
如图 2-4 所示为机器人横向搬运位姿示意图，通过在机器人末端施加不同的负载，从而得到机器人末端负载和位移的关系，结果如图表 2-1 图表 2-2 图表 2-3 所示，可以看出在纵向搬运不同的位姿下，机器人末端在受到负载时，在 adams 和 MATLAB 中得到的位移数值是由大到小的，由胡克定律可以得出，机器人在纵向搬运的过程中由于机器人大臂角度逐渐提升，所以有一定的刚度变化。



图表 2-1 竖向位姿 1 机器人末端位移响应



图表 2-2 竖向位姿 2 机器人末端位移响应



图表 2-3 竖向位姿 3 机器人末端位移响应

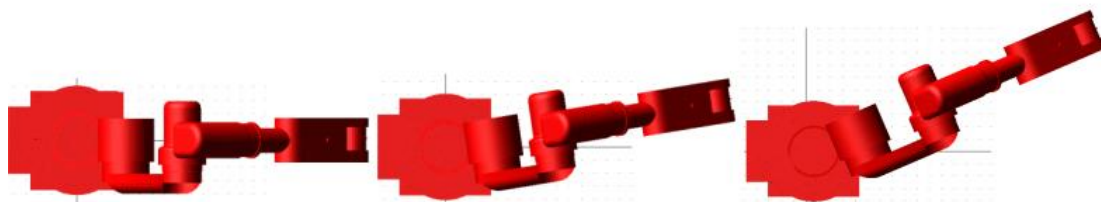
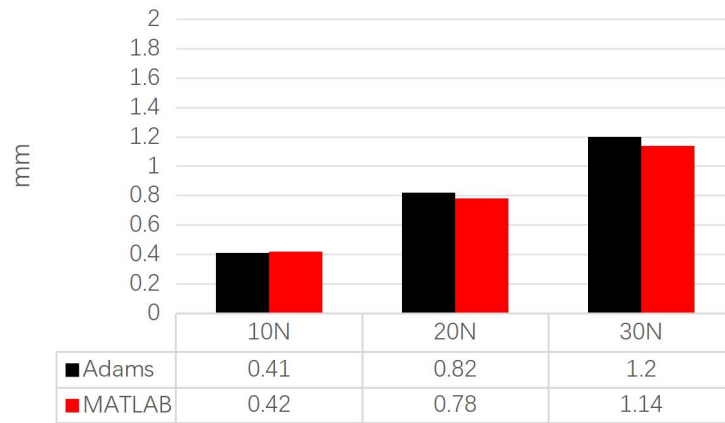
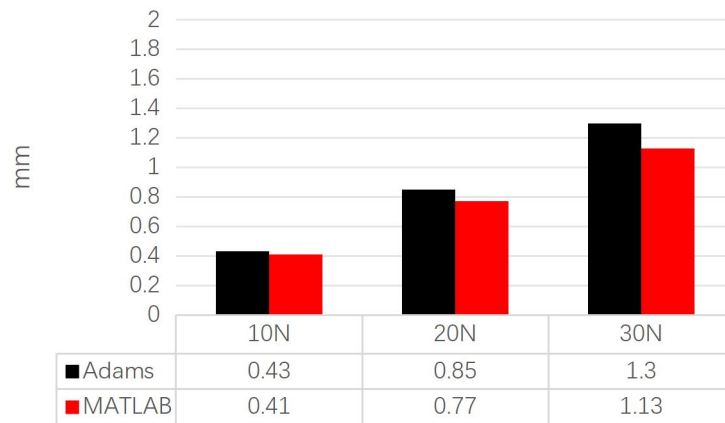


图 2-5 机器人横向搬运位姿示意图

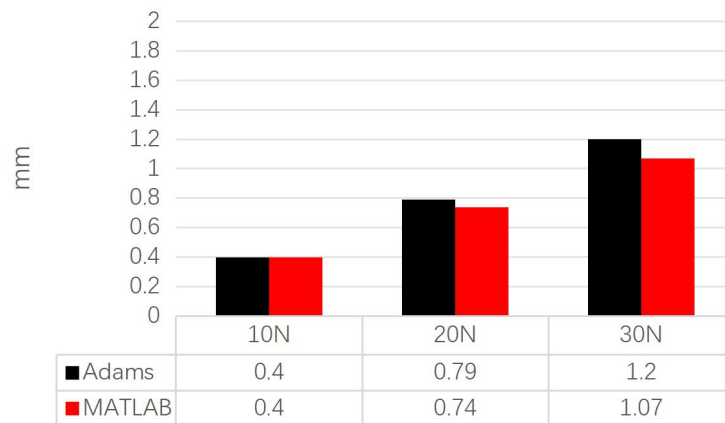
如图 2-5 所示为机器人横向搬运位姿示意图，通过在机器人末端施加不同的负载，从而得到机器人末端负载和位移的关系。由图表 2-4 图表 2-5 图表 2-6 可以看出在横向搬运不同的位姿下，机器人末端在受到负载时，在 **adams** 和 **MATLAB** 中得到的位移数值是比较接近的，由胡克定律可以得出，机器人在横向搬运的过程中由于机器人手臂角度变化较小，所以刚度变化较小。



图表 2-4 横向位姿 1 机器人末端位移响应



图表 2-5 横向位姿 2 机器人末端位移响应



图表 2-6 横向位姿 3 机器人末端位移响应

通过对比上文机器人末端负载和位移理论计算与仿真分析的结果，可以看出，两种方法得到的末端位移均随着负载的变化而变化，且位移和负载近乎呈

线性关系，满足胡克定律，从而满足末端等效刚度的推导。由于理论分析得到的机器人末端等效刚度是将六自由度机器人进行简化成二自由度机器人推导的，所以和仿真结果有些偏差，但两种方法所求解的机器人末端等效刚度的变化趋势一致，说明了理论方法的可行性。

2.2.3 机器人模态参数仿真求解

在上节导入到 Adams 模型并施加参数的基础上中，对模型进行模态分析，如图通过施加不同的条件，从而得到机器人的幅频特性曲线。得到的机器人竖向位姿一的模态信息如图 2-6 所示。

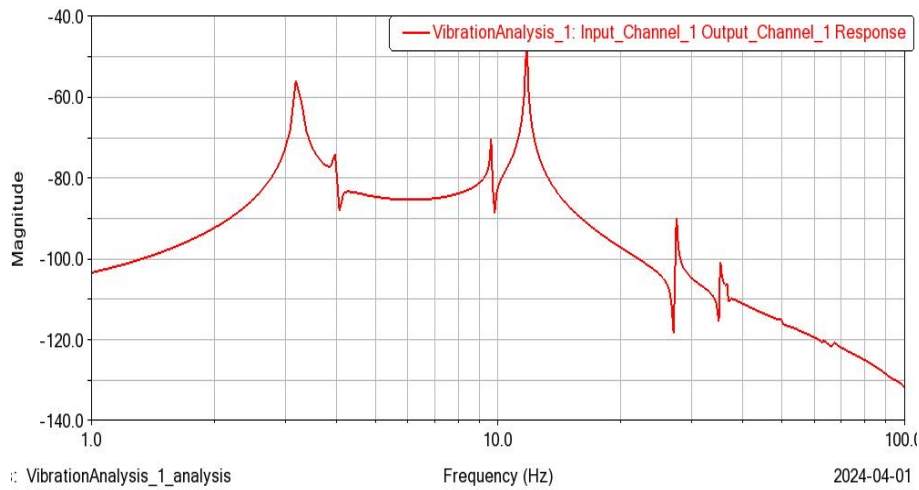


图 2-6 机器人位姿模态分析

通过模态分析得到机器人的参数并带入公式^[61]

$$\begin{cases} M = \frac{K}{\omega_n^2} \\ C = \frac{2K\varepsilon}{\omega_n} \end{cases} \quad (2-69)$$

表 2-5 末端等效参数信息

位姿	固有模态 ω_n	阻尼比 ε	等效刚度 N/mm
纵向位姿 1	19.34	0.00033	21.6
纵向位姿 2	18.71	0.00032	24.5
纵向位姿 3	18.09	0.00031	25.0
横向位姿 1	18.71	0.00032	24.5
横向位姿 2	18.71	0.00034	23.5
横向位姿 3	19.34	0.00032	25.1

通过对多个机器人位姿进行模态分析，代入仿真数据可得，结合机器人末

端刚度得到的机器人末端等效参数如表 2-5 所示，机器人末端等效质量和阻尼如表 2-6 所示。

表 2-6 机器人等效质量和阻尼

位姿	$M_j \cdot kg$	$C_j \cdot (N \cdot m^{-1} \cdot s)$
纵向位姿 1	69.78	0.0046
纵向位姿 2	69.98	0.0053
纵向位姿 3	76.39	0.0054
横向位姿 1	69.99	0.0053
横向位姿 2	67.13	0.0053
横向位姿 3	67.11	0.0052

2.2.4 机器人幅频特性分析

通过上文理论计算的机器人末端刚度结合机器人模态仿真得到的机器人参数信息，将机器人等效为质量-弹簧-阻尼系统，结合仿真数据与理论模型对机器人系统进行振动特性分析。如图 2-7 中右侧为机器人的质量-弹簧-阻尼模型，将上述所得的末端等效刚度和机器人的等效质量和阻尼参数带入，将机器人的力扰动作为输入量，机器人末端位移作为输出量。

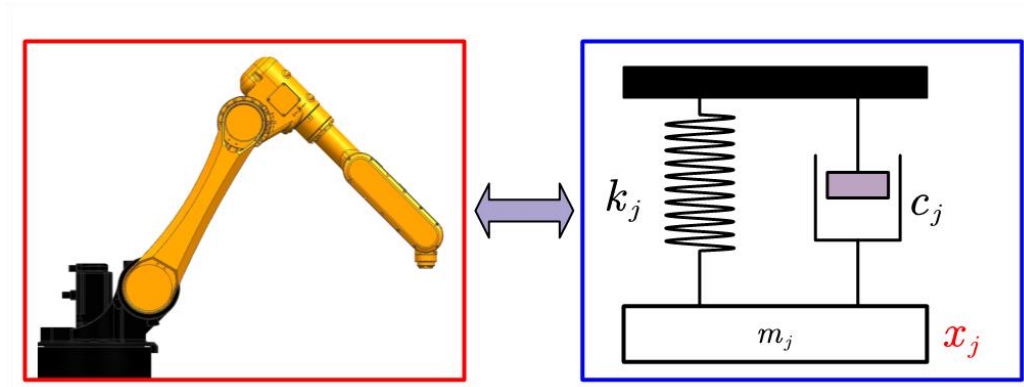


图 2-7 机器人刚度的等效模型

动力学方程为，当受到位移简谐激励 $f_r = A \cos(\omega t)$ 的作用，其中 A 表示激励幅值，将位移激励转化为扰动力，得到如下方程

$$m_j \ddot{x}_j + c_j \dot{x}_j + k_j x_j = f_r \quad (2-70)$$

其中 m_j 机器人等效质量， k_j 和 c_j 分别是机器人的末端等效弹簧刚度和等效阻尼， f_r 是外部施加的激励力。

为分析机器人在不同位姿下，不同频率对机器人系统振动特性的影响，对

其作幅频特性分析。由图 2-8 和图 2-9 可以看出机器人在模拟搬运的横向和纵向位姿下，整体的响应较为接近，自身在低频振动时位移响应较大，位移传递率较高；在中低频阶段由于机器人自身固有的刚度特性，位移响应较小，位移传递率低。

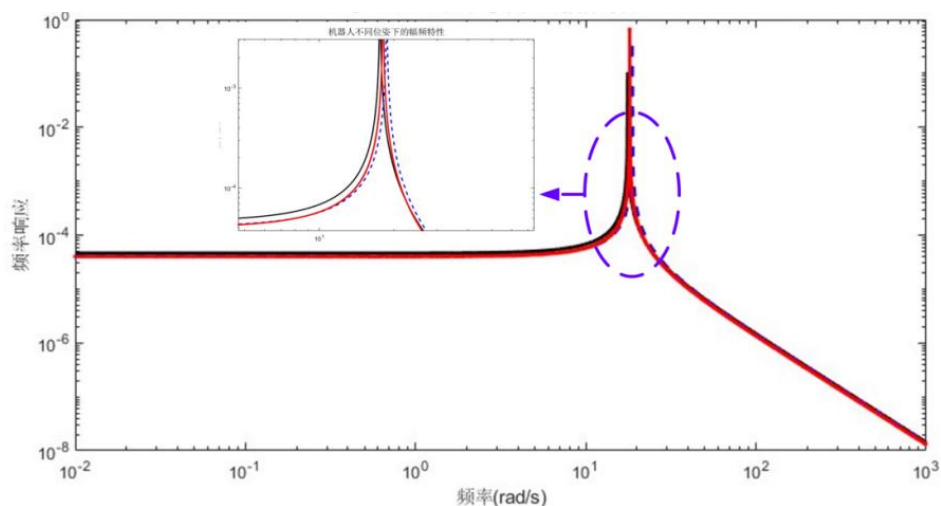


图 2-8 机器人横向搬运位姿幅频特性

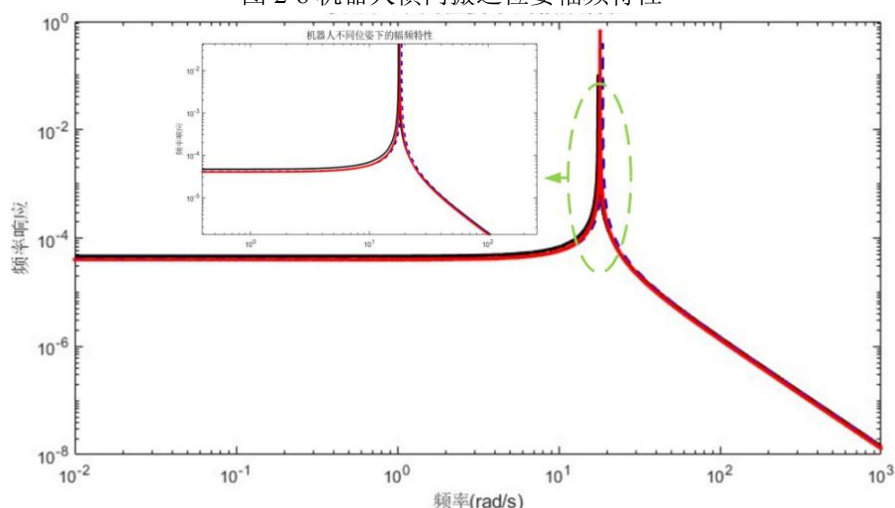


图 2-9 机器人纵向搬运位姿幅频特性

2.3 机器人搬运系统振动特性分析

为了分析弹性薄壁件机器人搬运系统的振动特性，在机器人等效刚度模型的基础上，采用有限元法求解弹性薄壁件的等效刚度，建立机器人搬运系统的等效动力学方程，从而分析机器人搬运系统的振动特性。本文采用弹性薄板模拟弹性薄壁件进行分析。

2.3.1 弹性薄板等效刚度

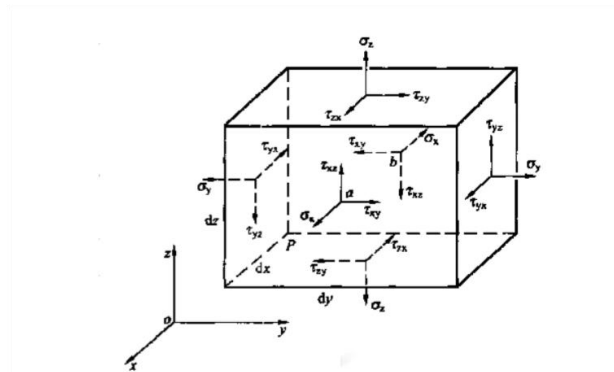


图 2-10 薄板剪应力

对于薄板而言，由图 2-10 可以看出，剪应力相互等效可得

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (2-35)$$

对于空间问题而言，应力的独立分量有六个，

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix}, \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix}, \quad (2-36)$$

二维问题的有限元求解用到二维单元，为保证精度，本文利用平面三角形单元离散平面结构，划分节点进行求解。图 2-11 给出了平面微元的应力状态，由于泊松效应的存在，在平面应力状态下，薄板的 Z 方向的受到正应力，以及应变状态下的 Z 方向的受到正应力，但由广义胡克定律可知无论是平面应力还是平面应变状态，应力和应变的独立变量都只有 3 个。

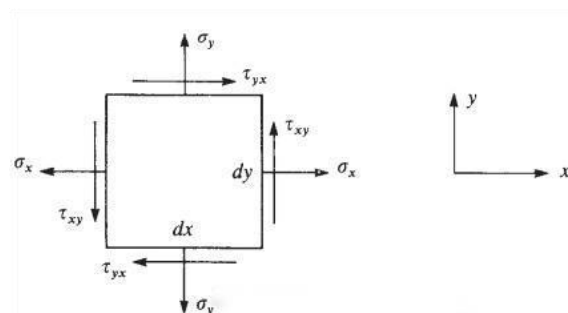


图 2-11 平面微元的应力状态

此时，平面问题应力和应变独立变量的列向量为

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}, \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (2-37)$$

此时薄板的应力和应变关系为

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (2-38)$$

对于薄板的应力状态

$$[D] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

此时薄板的平面应力状态

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2-40)$$

对于薄板的平面问题，对于划分的节点而言，在平面上两个方向的自由度，故每个三角形单元共有六个自由度，如图 2-12 所示。

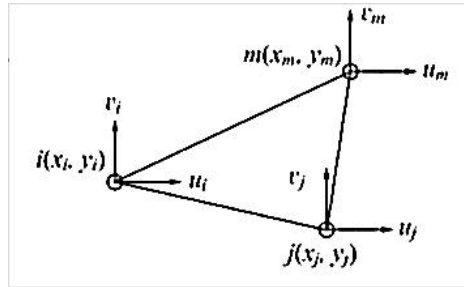


图 2-12 单元自由度

$$\{d\} = \left\{ \begin{Bmatrix} d_i \\ d_j \\ d_m \end{Bmatrix} \right\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_m \\ v_m \end{Bmatrix} \quad (2-41)$$

选取所划分的三角形单元的线性位移函数如下

$$\begin{aligned} u(x, y) &= a_1 + a_2x + a_3y \\ v(x, y) &= a_4 + a_5x + a_6y \end{aligned} \quad (2-42)$$

带入节点位移及对于坐标可得

$$\begin{aligned}
 u_i &= u(x_i, y_i) = a_1 + a_2 x_i + a_3 y_i \\
 u_j &= u(x_j, y_j) = a_1 + a_2 x_j + a_3 y_j \\
 u_m &= u(x_m, y_m) = a_1 + a_2 x_m + a_3 y_m \\
 v_i &= v(x_i, y_i) = a_4 + a_5 x_i + a_6 y_i \\
 v_j &= v(x_j, y_j) = a_4 + a_5 x_j + a_6 y_j \\
 v_m &= v(x_m, y_m) = a_4 + a_5 x_m + a_6 y_m
 \end{aligned} \tag{2-43}$$

得到形函数为

$$\begin{aligned}
 N_i &= \frac{1}{2A}(\alpha_i + \beta_i x + \gamma_i y) \\
 N_j &= \frac{1}{2A}(\alpha_j + \beta_j x + \gamma_j y) \\
 N_m &= \frac{1}{2A}(\alpha_m + \beta_m x + \gamma_m y)
 \end{aligned} \tag{2-44}$$

其中

$$\begin{aligned}
 \alpha_i &= x_j y_m - y_j x_m, \alpha_j = y_i x_m - x_i y_m, \alpha_m = x_i y_j - y_i x_j \\
 \beta_i &= y_i - y_m, \beta_j = y_m - y_i, \beta_m = y_i - y_j \\
 \gamma_i &= x_m - x_j, \gamma_j = x_i - x_m, \gamma_m = x_j - x_i
 \end{aligned} \tag{2-45}$$

此时位移场表达式为

$$\{\psi\} = \begin{bmatrix} N_i & 0 & N_j & 0 & N_m & 0 \\ 0 & N_i & 0 & N_j & 0 & N_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_m \\ v_m \end{Bmatrix} \tag{2-46}$$

形函数矩阵为

$$[N] = \begin{bmatrix} N_i & 0 & N_j & 0 & N_m & 0 \\ 0 & N_i & 0 & N_j & 0 & N_m \end{bmatrix} \tag{2-47}$$

对于薄板的应变力而言

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (2-48)$$

此时，将应变力公式带入位移场表达式可得

$$\{\varepsilon\} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \beta_i & 0 & \beta_j & 0 & \beta_m & 0 \\ 0 & \gamma_i & 0 & \gamma_j & 0 & \gamma_m \\ \gamma_i & \beta_i & \gamma_j & \beta_j & \gamma_m & \beta_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_m \\ v_m \end{Bmatrix} \quad (2-49)$$

定义梯度矩阵

$$[B] = [[B_i] \quad [B_j] \quad [B_m]] \quad (2-50)$$

$$[B_i] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \beta_i & 0 \\ 0 & \gamma_i \\ \gamma_i & \beta_i \end{bmatrix}, [B_j] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \beta_j & 0 \\ 0 & \gamma_j \\ \gamma_j & \beta_j \end{bmatrix}, [B_m] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \beta_m & 0 \\ 0 & \gamma_m \\ \gamma_m & \beta_m \end{bmatrix} \quad (2-51)$$

可得应变力和应变位移的关系

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2-52)$$

结合应变位移关系得

$$\{\sigma\} = [D][B]\{d\} \quad (2-53)$$

由牛顿力学可知，系统能量守恒

$$\pi_p = \frac{1}{2} \{d\}^T \iiint_V [B]^T [D][B] dV \{d\} - \{d\}^T \{f\} \quad (2-54)$$

根据最小势能原理

$$\frac{\partial \pi_p}{\partial \{d\}} = \left[\iiint_V [B]^T [D][B] dV \right] \{d\} - \{d\}^T \{f\} = 0 \quad (2-55)$$

得

$$\iiint_V [B]^T [D][B] dV \{d\} = \{f\} \quad (2-56)$$

令单元刚度矩阵为

$$[k] = \iiint_V [B]^T [D][B] dV \quad (2-57)$$

对于线性位移函数的三角形单元，单元内的应变为常数，梯度矩阵为各元素为常值，则单元刚度矩阵可写为

$$[k] = tA[B]^T [D][B] \quad (2-58)$$

单元刚度矩阵方程为

$$\begin{Bmatrix} f_{1x} \\ f_{1y} \\ f_{2x} \\ f_{2y} \\ f_{3x} \\ f_{3y} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix} \quad (2-59)$$

对薄板进行节点划分，示意图如图 2-13 所示，节点坐标如表 2-7 所示，其中节点 2345 为固定点，节点 1 为受力点。

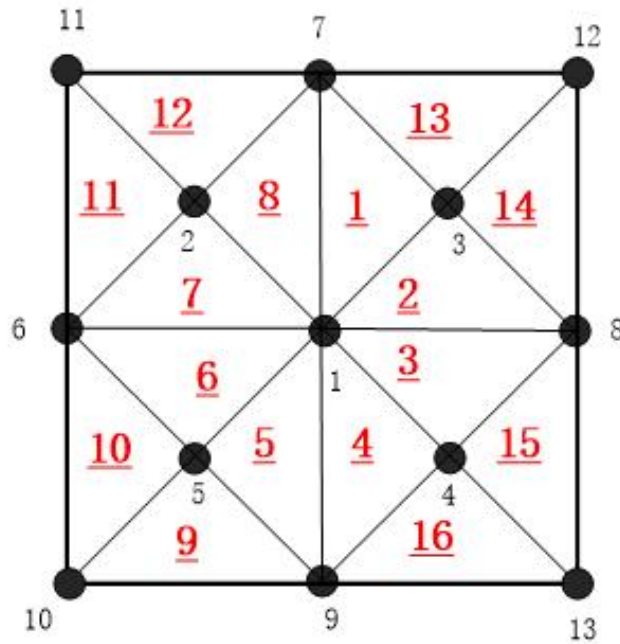


图 2-13 节点划分示意图

表 2-7 节点坐标

节点	1	2	3	4	5	6
x	2	1	3	3	1	0
y	2	3	3	1	1	2
7	8	9	10	11	12	13
2	4	2	0	0	4	4
4	2	0	0	4	4	0

由于板相较于中心点对称，考虑到结构和载荷的对称性，故取板结构的四分之一进行研究，首先通过在 ANSYS 中进行施加预应力的模态仿真，用于判别可行性。将整体的板进行进一步的划分，取四分之一板进行节点划分，示意图如图 2-14 所示。

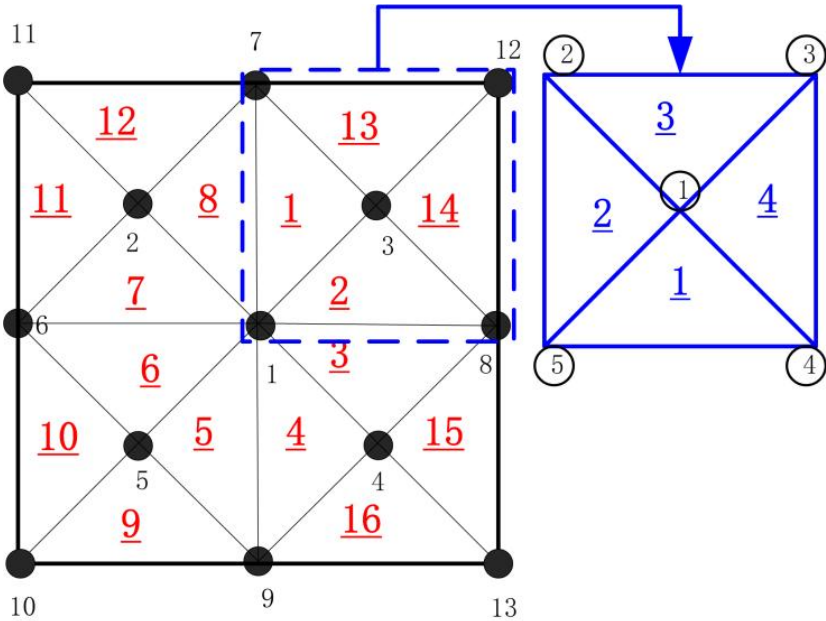


图 2-14 四分之一节点示意图

该结构进一步划分为若干三角形单元，每个单元的节点的坐标值见表 2-8。

表 2-8 四分之一节点坐标

节点	1	2	3	4	5
x	3	2	4	4	2
y	3	4	4	2	2

$$\begin{aligned}
[K_{rs}] &= \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix}_{rs} \\
&= \frac{E * h}{4(1-\nu^2)\Delta} \begin{bmatrix} b_r b_s + \frac{1-\nu^2}{2} a_r a_s & \nu b_r a_s + \frac{1-\nu}{2} a_r b_s \\ \nu a_r b_s + \frac{1-\nu}{2} b_r a_s & a_r a_s + \frac{1-\nu}{2} b_r b_s \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad (2-60)$$

式中（r=i,j,k 轮换；s=i,j,k 轮换），三节点三角形单元刚度矩阵是 6×6 阶矩阵，式中

$$\begin{aligned}
b_1 &= y_2 - y_3, b_2 = y_3 - y_1, b_3 = y_1 - y_2; \\
a_1 &= -(x_2 - x_3), a_2 = -(x_3 - x_1), a_3 = -(x_1 - x_2); \\
\Delta &= \frac{1}{2}(b_2 a_3 - b_3 a_2);
\end{aligned} \quad (2-61)$$

从而求得单元的刚度矩阵

$$\begin{aligned}
[k]_{6 \times 6}^1 &= \begin{bmatrix} [k_{11}]^1 & [k_{12}]^1 & [k_{13}]^1 \\ [k_{21}]^1 & [k_{22}]^1 & [k_{23}]^1 \\ [k_{31}]^1 & [k_{32}]^1 & [k_{33}]^1 \end{bmatrix}, [k]_{6 \times 6}^2 = \begin{bmatrix} [k_{11}]^2 & [k_{12}]^2 & [k_{13}]^2 \\ [k_{21}]^2 & [k_{22}]^2 & [k_{23}]^2 \\ [k_{31}]^2 & [k_{32}]^2 & [k_{33}]^2 \end{bmatrix} \\
[k]_{6 \times 6}^3 &= \begin{bmatrix} [k_{11}]^3 & [k_{12}]^3 & [k_{13}]^3 \\ [k_{21}]^3 & [k_{22}]^3 & [k_{23}]^3 \\ [k_{31}]^3 & [k_{32}]^3 & [k_{33}]^3 \end{bmatrix}, [k]_{6 \times 6}^4 = \begin{bmatrix} [k_{11}]^4 & [k_{12}]^4 & [k_{13}]^4 \\ [k_{21}]^4 & [k_{22}]^4 & [k_{23}]^4 \\ [k_{31}]^4 & [k_{32}]^4 & [k_{33}]^4 \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad (2-62)$$

结构参数如表 2-9 所示，其中 ρ 为板的密度， h 为板的厚度， D 为板的弯曲刚度， E 为材料的杨氏模量， ν 为材料的泊松比，各节点的坐标值如表 2-10 所示

表 2-9 结构参数

名称	E（杨氏模量）	V（泊松比）	H（m）	M（kg）	ρ 密度
数值	$3.5 \times 10^9 \text{pa}$	0.35	0.0005	0.117	1350kg/m^3

表 2-10 节点坐标

节点	1	4	5	节点	1	2	5
单元	3	4	2	单元	3	2	2
1	3	2	2	2	3	4	2
节点	1	2	3	节点	1	3	4
单元	3	2	4	单元	3	4	4
3	3	4	4	4	3	4	2

通过组装节点的刚度矩阵，得到薄板整体刚度矩阵为

$$K = \begin{bmatrix} k_{55}^1 + k_{55}^2 & k_{54}^1 & k_{55}^1 + k_{51}^2 & k_{52}^1 & 0 \\ k_{45}^1 & k_{44}^1 + k_{44}^4 & k_{41}^1 + k_{41}^4 & 0 & k_{43}^4 \\ k_{15}^1 + k_{15}^2 & k_{14}^1 + k_{14}^4 & k_{11}^1 + k_{11}^2 + k_{11}^3 + k_{11}^4 & k_{12}^2 + k_{12}^3 & k_{13}^3 + k_{13}^4 \\ k_{25}^2 & 0 & k_{21}^2 + k_{21}^3 & k_{22}^2 + k_{22}^3 & k_{23}^3 \\ 0 & k_{34}^4 & k_{31}^3 + k_{31}^4 & k_{32}^3 & k_{33}^3 + k_{33}^4 \end{bmatrix} \quad (2-63)$$

带入边界条件，对刚度方程进行求解，从总体刚度方程中将未知节点位移求解方程提取出来，消去自由度位移为 0 所对应的的行和列，此时，薄板整体刚度矩阵为

$$K_1 = \begin{bmatrix} k_{55}^1 + k_{55}^2 & k_{54}^1 & 0 & k_{52}^1 & 0 \\ k_{45}^1 & k_{44}^1 + k_{44}^4 & 0 & 0 & k_{43}^4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{25}^2 & 0 & 0 & k_{22}^2 + k_{22}^3 & k_{23}^3 \\ 0 & k_{34}^4 & 0 & k_{32}^3 & k_{33}^3 + k_{33}^4 \end{bmatrix} \quad (2-64)$$

此时，在节点 5 处施加 1N 的力，力矩阵如下

$$F_d = [F_{5x} \ F_{5y} \ F_{4x} \ F_{4y} \ F_{1x} \ F_{1y} \ F_{2x} \ F_{2y} \ F_{3x} \ F_{3y}]^T \quad (2-65)$$

式中， F_{5x} ， F_{5y} 为 1N 的力，其余节点不受力，大小为零,在节点施加力后，可以得到该节点的位移

$$U_d = [U_1 \ U_1 \ U_2 \ U_2 \ U_3 \ U_3 \ U_4 \ U_4 \ U_5 \ U_5] \quad (2-66)$$

由弹性力学

$$F_d = K_1 U_d \quad (2-67)$$

得板的受力位移为

$$U_d = [K]^{-1} F_d \quad (2-68)$$

通过在 MATLAB 中进行数据处理，板的受力位移和刚度数值如表 2-11 所示

表 2-11 等效刚度数值		
预应力 (N)	理论位移 (mm)	等效刚度数值 (N/mm)
1N	0.29	3.45
2N	0.58	3.45
3N	0.87	3.45

2.3.2 有限元仿真验证

在 ANSYS 中进行有限元仿真分析，进行对比验证，得到的结果如图 2-15

所示，预应力位移如表 2-12 所示，通过结果可以看出，仿真和理论较为接近：

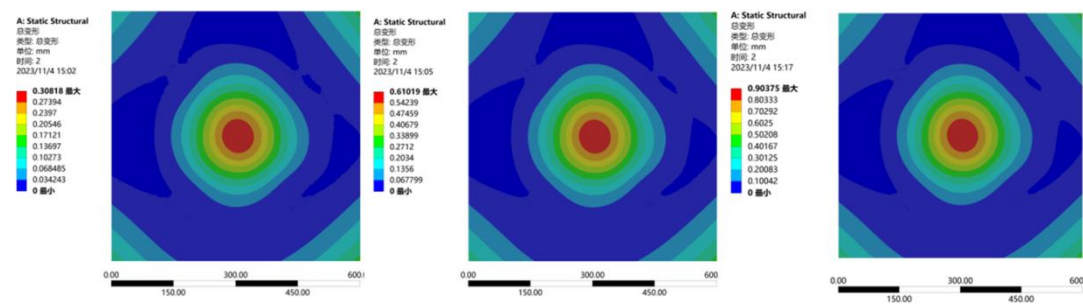


图 2-15 ANSYS 仿真结果

表 2-12 预应力位移

预应力（N）	理论位移（mm）	仿真位移（mm）
1N	0.29	0.30818
2N	0.58	0.61019
3N	0.87	0.90375

2.3.3 机器人搬运系统幅频特性分析

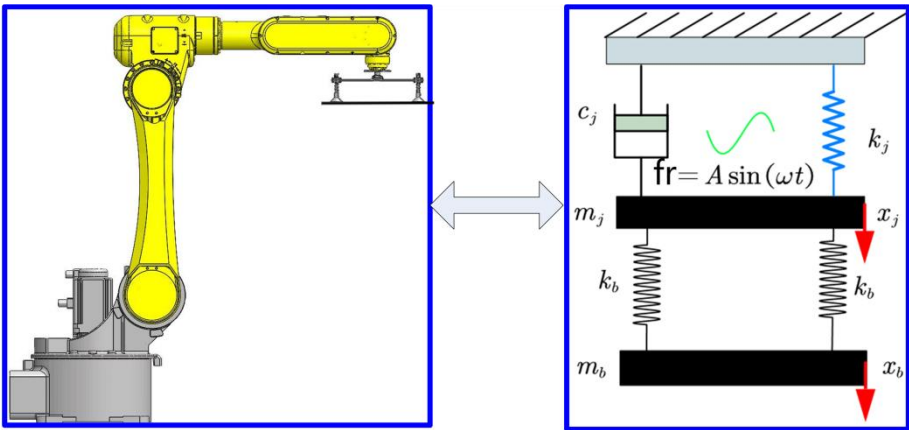


图 2-16 机器人搬运系统等效动力学模型

根据得到的机器人末端等效刚度和薄壁件等效刚度，将机器人等效成刚度为 k_j 、质量为 m_j 的弹簧质量系统，将薄壁件等效为一个刚度为 k_b 、质量为 m_b 的弹簧质量系统，建立机器人搬运系统等效动力学模型如图 2-16 所示。

假设机器人在运动过程中受到的激振力为 $f_r=-Aw^2cos(wt)$ ，根据动力学方程可得

$$\begin{cases} m_j \ddot{x}_j + (c_j + c_b) \dot{x}_j - c_b \dot{x}_b + (k_j + k_b)x_j - k_b x_b = f_r \\ m_b \ddot{x}_b + c_b (\dot{x}_b - \dot{x}_j) + k_b (x_b - x_j) = 0 \end{cases} \quad (2-71)$$

将上述式子写成如下的矩阵形式：

$$M \ddot{x}(t) + C \dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (2-72)$$

式中, M , C 和 K 分别称为质量矩阵(mass matrix)、阻尼矩阵(damping matrix)和刚度矩阵(stiffness matrix),具体形式如下:

$$M = \begin{bmatrix} m_j & 0 \\ 0 & m_b \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} c_b + c_j & -c_b \\ -c_b & c_b \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} k_b + k_j & -k_b \\ -k_b & k_b \end{bmatrix} \quad (2-73)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_j \\ x_b \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} f_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-74)$$

设解为

$$\begin{aligned} x_j &= X_j \cos(\omega t) \\ x_b &= X_b \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (2-75)$$

带入上式得

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 m_j + \omega(c_j + c_b) + k_j + k_b & -\omega c_b - k_b \\ -\omega c_b - k_b & -\omega^2 m_b + \omega c_b + k_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_j \\ X_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2-76)$$

其中, f_0 为扰动力的幅值, 在不考虑阻尼的情况下, 设机械阻抗为:

$$Z_{rs}(\omega) = -\omega^2 M_{rs} + K_{rs}, r, s = 1, 2 \quad (2-77)$$

则上述为

$$[Z(\omega)]X = F \quad (2-78)$$

$$[Z(\omega)] = \begin{bmatrix} Z_{11}(\omega) & Z_{12}(\omega) \\ Z_{21}(\omega) & Z_{22}(\omega) \end{bmatrix} = \text{阻抗矩阵}, X = \begin{Bmatrix} X_j \\ X_b \end{Bmatrix}, F = \begin{Bmatrix} f_0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$X = [Z(\omega)]^{-1} F \quad (2-79)$$

$$\begin{aligned} X_j(\omega) &= \frac{Z_{22}(\omega)f_0}{Z_{11}(\omega)Z_{22}(\omega) - Z_{12}^2(\omega)}; \\ X_b(\omega) &= \frac{-Z_{12}(\omega)f_0}{Z_{11}(\omega)Z_{22}(\omega) - Z_{12}^2(\omega)}; \end{aligned} \quad (2-80)$$

带入式 (2-77) 得

$$\begin{aligned} X_j(\omega) &= \frac{(-\omega^2 m_b + k_b)f_0}{(-\omega^2 m_j + k_j + k_b)(-\omega^2 m_b + k_b) - k_b^2} \\ X_b(\omega) &= \frac{k_b f_0}{(-\omega^2 m_j + k_j + k_b)(-\omega^2 m_b + k_b) - k_b^2} \end{aligned} \quad (2-81)$$

基于建立的机器人搬运系统等效动力学方程，对机器人搬运系统的幅频特性进行分析，仿真参数采用薄壁件等效刚度法求得的等效刚度 k_b 。

如图 2-17 所示为机器人受到扰动激励时，机器人末端和薄壁件的振动位移幅值，通过分析可以看出，在中低频阶段，机器人末端在受到扰动力时，末端位移和薄壁件的位移极为接近，在高频阶段，薄壁件的振动位移要大，但整体偏差不多，综上可得，薄壁件在搬运过程中的振动主要由机器人末端产生，故只要隔离来自机器人末端的振动，就可以实现薄壁件的稳定搬运。

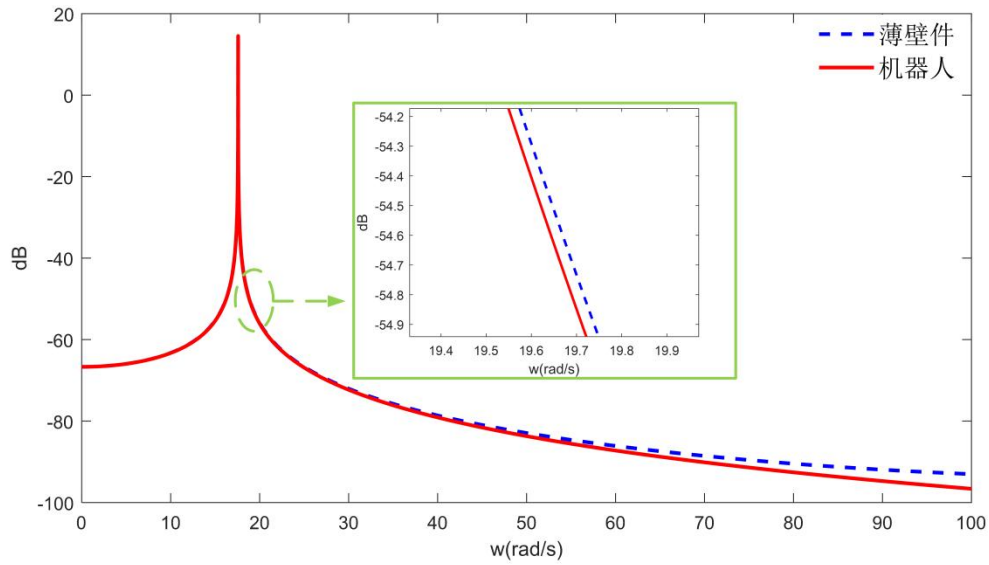


图 2-17 机器人搬运系统的幅频特性

2.4 本章小结

本章介绍了弹性薄壁件机器人搬运系统构成，并基于机器人运动学模型和胡克定律得到了机器人的末端等效刚度，利用有限元刚度法建立了弹性薄壁件的等效刚度模型。开展了机器人的虚拟样机模态仿真，结合虚拟样机模态仿真数据建立机器人-弹性薄壁件整体系统的等效动力学模型，分析不同位姿下机器人搬运系统振动特性，以及机器人与弹性薄壁件之间的振动耦合关系，得出薄壁件在搬运过程中的振动来源主要由机器人末端产生，通过隔离机器人末端的扰动，可以起到薄壁件振动抑制的效果，为后续的电磁装置设计与控制提供理论基础。

第3章 电磁驱动柔顺减振装置设计及性能分析

根据上文可知，弹性薄壁件在搬运过程中的振动与机器人末端的振动具有耦合关系，机器人搬运系统在实际作业过程中产生的振动主要由机器人末端传递到薄壁件上。本章设计一种新型的电磁驱动柔顺减振装置，用于减小机器人末端的振动传递，并对其减振性能进行分析。

3.1 电磁驱动柔顺减振装置设计

3.1.1 结构设计

本文设计的电磁驱动柔顺减振装置包括被动减振单元、主动减振单元、下减振法兰和吸盘组成，下减振法兰分别安装在被动减振单元的下端，主动减振单元位于被动减振单元的内部，下减振法兰用于安装吸盘。如图 3-1 所示为电磁驱动柔顺减振装置的示意图。电磁柔顺减振装置主要由电磁线圈，永磁铁，导向杆，减振弹簧，减振法兰等组成。电磁柔顺减振装置的控制原理，通过检测末端的位移变化，并搭建控制系统，从而改变输入电流的大小，改变电磁力的大小，使安装在下连接底座上的永磁铁受到不同大小的电磁吸力，从而起到抑制振动的作用。

（1）被动减振单元

被动减振单元由上压板、安装板、直线轴承、弹簧、限位板、导向杆、支撑底板组成，限位板位于安装板和支撑底板之间。其中安装板的截面为工字形，安装板的上端开有周向分布的上减振法兰安装孔，安装板的下端外圆部分开有周向分布的轴承安装座，安装板的下端内圆部分开有安装主动减振单元的安装孔，直线轴承放置在轴承安装座内，直线轴承上方通过上压板压紧。弹簧的上端与轴承安装座的底部相接触，下端与限位板相接触。

（2）主动减振单元

主动减振单元由线圈安装底座、电磁线圈和永磁铁组成，电磁线圈安装在线圈安装底座上，线圈安装底座上设置有利于电磁线圈的导线引出的通孔；永磁铁安装在支撑底板的磁铁安装座内，与线圈安装底座和线圈之间留有一定的距离。

装置设计的参数如表 3-1 所示。

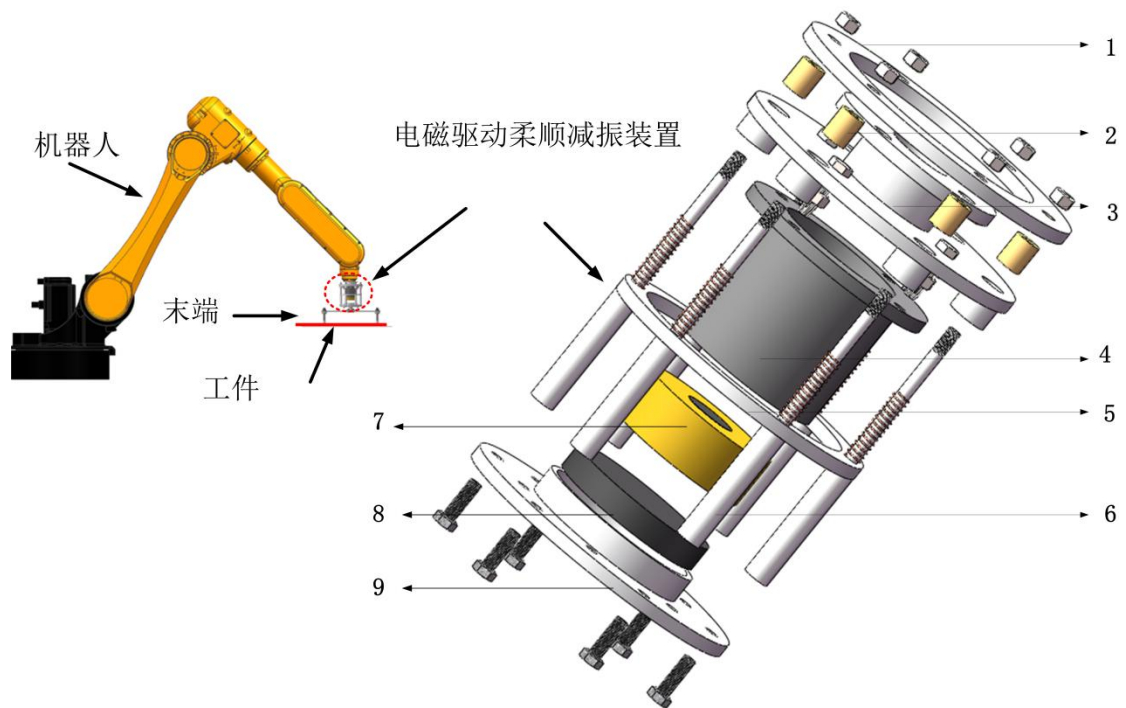


图 3-1 磁驱动柔顺减振装置的结构图

(1-上压板、2-直线轴承、3-安装板、4-线圈安装底座、5-限位板、6-导向杆、7-线圈、
8-永磁体、9-磁铁安装底座)

表 3-1 装置结构参数

参数名称	数值
线圈外径 R_c	30mm
线圈内径 r_c	10mm
线圈长度 l_c	20mm
永磁铁半径 R_m	25mm
永磁铁厚度 l_m	10mm
初始电磁气隙	10mm
线圈匝数	1000 匝

3.1.2 动力学模型

对于电磁柔顺隔振系统动力学而言，假设质量均匀分布，将其简化成一个单自由度弹簧阻尼系统来考虑。如图 3-2 所示为电磁柔顺隔振系统的被动减振系统的模型，图中 m_d 为工件的质量， k_d 和 c_d 分别是电磁驱动柔顺减振装置的刚度和阻尼， f_r 是扰动激振力， f_d 为电磁驱动柔顺减振装置产生的电磁力， x 为工件的振动响应位移，方向向上。

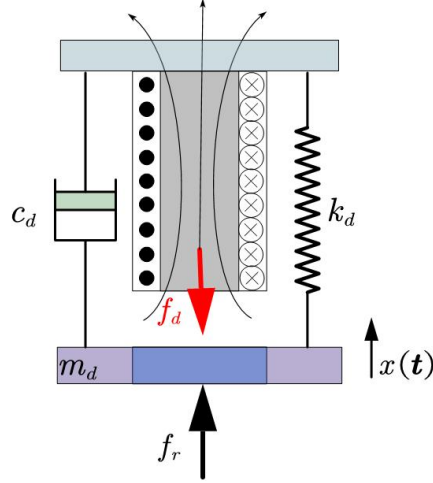


图 3-2 电磁柔顺减振系统模型

进一步地，根据图 3-2 所示的电磁驱动柔顺减振装置的动力学模型，电磁驱动柔顺减振装置在扰动力作用下的动力学方程为，由牛顿第二定律，可得电磁柔顺减振系统的动力学微分方程为^[62]

$$m_d \ddot{x}(t) + c_d \dot{x}(t) + k_d x(t) = f_r(t) + f_d(t) \quad (3-1)$$

对上式进行拉普拉斯变换后得

$$f_r(s) = m_d s^2 x(s) + c_d s x(s) + k_d x(s) \quad (3-2)$$

则薄壁件的位移响应与扰动力之间的传递函数为

$$G(s) = \frac{x(s)}{f_r(s)} = \frac{1}{m_d s^2 + c_d s + k_d} \quad (3-3)$$

假设系统的位移响应为

$$x = X \cos(\omega t - \varphi) \quad (3-4)$$

式中， X 为稳态响应的幅值，带入得

$$X = \frac{F_0 + f_d}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2}} \quad (3-5)$$

式中， F_0 为激振力幅值， s 为频率比 $s = \omega/\omega_n$ ， ω_n 为电磁驱动柔顺减振装置的固有频率， ζ 为阻尼比

带入式（3-5）可得系统在固定扰动力的幅频响应为

$$X = \frac{F_0 + f_d}{k_d \sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (3-6)$$

为进一步分析系统的隔振特性，当 f_d 为零时，引入位移简谐激励 y

$$m_d \ddot{x} + c_d (\dot{x} - \dot{y}) + k_d (x - y) = 0 \quad (3-7)$$

式中， y 为

$$y(t) = A \sin(\omega t) \quad (3-8)$$

带入得

$$\begin{aligned} m_d \ddot{x} + c_d \dot{x} + k_d x &= k_d A \sin(\omega t) + c_d \omega A \cos(\omega t) \\ &= F_0 \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (3-9)$$

式中， F_0 为激振力幅值， ω 为扰动频率

$$F_0 = A \sqrt{k_d^2 + (c_d \omega)^2} \quad (3-10)$$

带入系统的幅频响应方程可得

$$X = \frac{A \sqrt{k_d^2 + (c_d \omega)^2}}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + c^2 \omega^2}} \quad (3-11)$$

求解可得，电磁驱动柔顺减振装置的振动传递率为

$$\beta = \frac{X}{A} = \sqrt{\frac{1 + (2\xi r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \quad (3-12)$$

3.2 电磁驱动柔顺减振装置驱动力分析

3.2.1 电磁线圈磁场强度计算

毕奥-萨伐尔定律是静磁学中的基本定律，电流会产生磁场。毕奥-萨伐尔定律（Biot-Savart Law）描述了电流元在空间任意点产生的磁感应强度的大小和方向。根据这个定律，在静磁近似中，磁场的变化相对于电场的变化被忽略，这通常适用于低频或准静态的情况，本文对电磁线圈和永磁铁动力学交互的理论计算流程如图 3-3 所示。

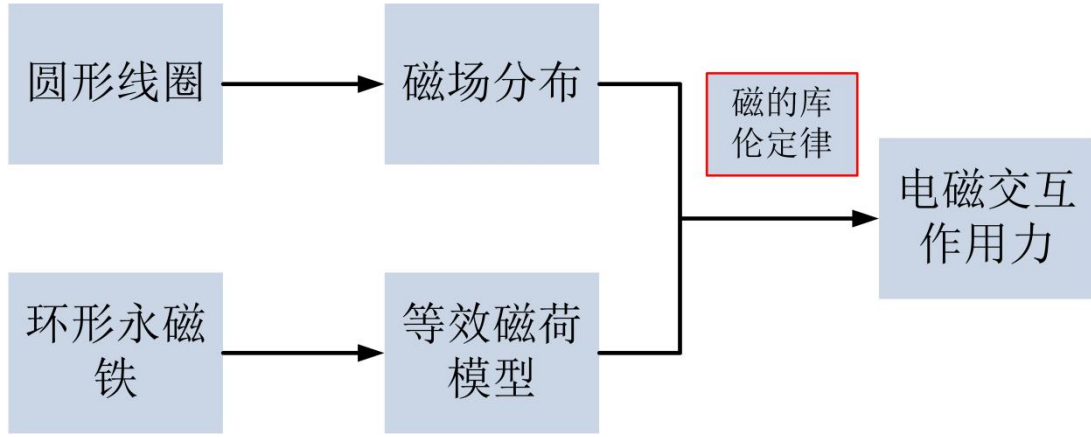


图 3-3 电磁交互计算流程

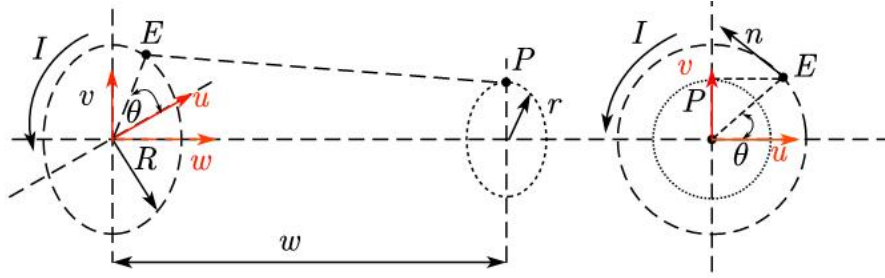


图 3-4 磁场等效结构示意图

电流元在 P 处所产生的磁场，作为中心对称结构，其对称点的轴向磁感应强度数值一样，如图 3-4 所示，在圆环导线上，我们定义了一个电流元 $I*dl=IR*d\theta$ ，其中 I 代表电流强度。为了研究磁场的影响，选定点 P ，距圆形导线距离为 w ，根据毕奥萨伐尔定律^[63]，得到电流元 E 在点 P 产生的磁感应强度。

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl}{|\vec{EP}|^2} \sin(\alpha); \alpha = \langle n, EP \rangle$$

$$|\vec{EP}| = \sqrt{R^2 + r^2 + w^2 - 2Rr \sin \theta}$$

$$n = (-\sin \theta, \cos \theta, 0)$$
(3-13)

α 为电流元矢量与 EP 方向矢量之间的夹角， $\mu_0=4\pi \times 10^{-7} \text{T}\cdot\text{m/A}$ ，表示真空导磁率，易得

$$\sin \alpha = \frac{\sqrt{R^2 + r^2 \sin^2 \theta + w^2 - 2Rr \sin \theta}}{\sqrt{R^2 + r^2 + w^2 - 2Rr \sin \theta}}$$
(3-14)

另一方面，对于电流元 E 在 P 点产生的轴向磁感应强度，其数学表达式可以表述为：

$$dB_\alpha = dB \cdot \cos \beta$$

$$\beta = \left\langle \vec{n} \times \vec{EP}, \vec{w} \right\rangle \quad (3-15)$$

电流元与轴向单位矢量之间的角度用 β 表示，表达式如下。

$$\cos \beta = \frac{R - r \sin \theta}{\sqrt{R^2 + r^2 \sin^2 \theta + w^2 - 2Rr \sin \theta}} \quad (3-16)$$

所以电流元在 p 点产生的磁场强度总和为电流元磁场强度之和，即

$$B_\alpha = \int_0^{2\pi} \frac{\mu_0 IR \cdot (R - r \sin \theta)}{4\pi \cdot (R^2 + r^2 + w^2 - 2Rr \sin \theta)^{3/2}} d\theta \quad (3-17)$$

圆柱线圈产生的磁场由多个单层线圈叠加。而单层圆盘通电线圈可视为由多个半径逐渐增大的圆形导线沿径向叠加而成。根据前文内容，设宽为 dR 的环形线圈产生的轴向磁感应强度为 B ， r_c 和 R_c 分别为圆盘线圈的内外半径，故载流圆盘线圈产生的轴向磁感应强度分布为：

$$\overline{B}_\alpha = \int_{r_c}^{R_c} n_r dR \int_0^{2\pi} \frac{\mu_0 IR \cdot (R - r \sin \theta)}{4\pi \cdot (R^2 + r^2 + w^2 - 2Rr \sin \theta)^{3/2}} d\theta \quad (3-18)$$

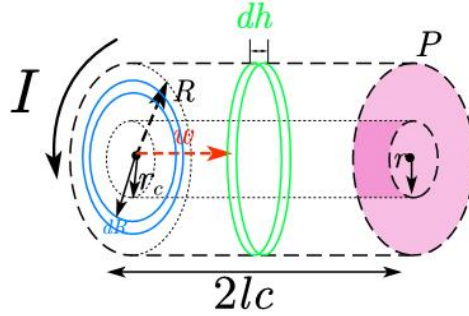


图 3-5 圆柱线圈轴向磁感强度

对于整体圆柱线圈，假设为多个单层圆盘线圈沿轴向的叠加，如图 3-5 所示。假设线圈沿轴向长度内有 n 层线圈。根据前文内容，高度为 dh 的圆柱线圈，在空间任意点 P 产生的轴向磁感应强度为 B_α 。圆柱线圈的总长度为 $2l$ ，故圆柱线圈空间轴向磁感应强度分布的表达式为：

$$\overline{B}_\alpha = \int_0^{2l_c} n_\alpha dh \int_{r_c}^{R_c} n_r dR \int_0^{2\pi} \frac{\mu_0 IR \cdot (R - r \sin \theta)}{4\pi \cdot (R^2 + r^2 + w^2 - 2Rr \sin \theta)^{3/2}} d\theta \quad (3-19)$$

由于 nr 和 $n\alpha$ 与导线的半径及导线绕制的疏密程度有关，在理想情况下，线圈总匝数

$$N = 2l_c (R_c - r_c) \xi, \xi = n_r n_\alpha \quad (3-20)$$

故

$$\begin{aligned}\bar{B}_\alpha(z, r) &= \frac{\mu_0 I \zeta}{4\pi} \int_0^{2l_c} dh \int_{r_c}^{R_c} dR \int_0^{2\pi} \frac{R \cdot (R - r \sin \theta)}{(R^2 + r^2 + w^2 - 2Rr \sin \theta)^{3/2}} \\ &= \frac{\mu_0 I N}{8\pi l_c (R_c - r_c)} \int_0^{2l_c} dh \int_{r_c}^{R_c} dR \int_0^{2\pi} \frac{R \cdot (R - r \sin \theta)}{(R^2 + r^2 + w^2 - 2Rr \sin \theta)^{3/2}} d\theta\end{aligned}\quad (3-21)$$

3.2.2 电磁驱动力的输出特性

将永磁铁放置在载流圆柱线圈共轴的轴线上，永磁铁的厚度为 l_m ，与线圈中心的轴向偏移量为 z ，如图 3-6 所示。

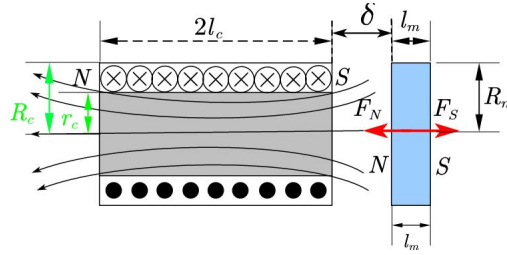


图 3-6 线圈-永磁铁系统示意图

假设永磁铁两端面之间的磁场强度差表示为：

$$\Delta H(z, r) = H(z + \delta, r) - H(z + \delta + l_m, r) \quad (3-22)$$

式中 H 为线圈产生的磁场强度。在理想状态下，线圈产生的磁场强度与其磁感应强度之间存在线性关系。假设永磁铁磁性材料分布均匀，利用等效磁荷的方法，将其简化为两个磁性相反的磁极面，则永磁铁受到的电流载荷为

$$dp = B_r ds = B_r r d\ell dr \quad (3-23)$$

式中， S 为永磁铁面积， dq 为元磁荷。利用磁的库仑定律，得出永磁铁在通电线圈中所受到的电磁力为

$$F = \int_s \Delta H \cdot dq \quad (3-24)$$

结合上述公式可得磁力表达式

$$F = \frac{B_\alpha I \zeta}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{r_c}^{R_c} \int_0^{2l_c} \int_0^{2\pi} \left[\frac{rR(R - r \sin \theta)}{4\pi \cdot (R^2 + r^2 + (z + \delta + h)^2 - 2Rr \sin \theta)^{3/2}} - \frac{rR(R - r \sin \theta)}{4\pi \cdot (R^2 + r^2 + (z + \delta + l_m + h)^2 - 2Rr \sin \theta)^{3/2}} \right] d\theta dl R dh dr \quad (3-25)$$

对公式进行解析求积,得

$$\begin{aligned}
F &= \frac{B_a I \zeta}{2} \int_0^{R_m} \int_{r_c}^{R_c} \int_0^{2\pi} \left[\frac{\Theta(z+l_c+\delta) + \Theta(z-l_c+\delta+l_m) - \Theta(z+l_c+\delta+l_m) + \Theta(z-l_c+\delta)}{\Theta(z+l_c+\delta+l_m) + \Theta(z-l_c+\delta)} \right] d\theta dR dr \\
&= \frac{B_a N I}{4l_c(R_c - r_c)} \int_0^{R_m} \int_{r_c}^{R_c} \int_0^{2\pi} \left[\frac{\Theta(z+l_c+\delta) + \Theta(z-l_c+\delta+l_m) - \Theta(z+l_c+\delta+l_m) + \Theta(z-l_c+\delta)}{\Theta(z+l_c+\delta+l_m) + \Theta(z-l_c+\delta)} \right] d\theta dR dr \\
\Theta(z) &= \frac{zrR \cdot (R - r \sin \theta)}{(R^2 + r^2 - 2Rr \sin \theta) \sqrt{R^2 + r^2 + z^2 - 2Rr \sin \theta}}
\end{aligned} \tag{3-26}$$

将装置的实际参数带入，可以得到如下关于线圈匝数，电流和气隙的电磁力公式：

$$F = N(20.051I - 1.3295I\delta) \times (10)^{-3} \tag{3-27}$$

通过在 MATLAB 中对上述积分公式进行仿真计算，分析电磁减振装置中气隙对电磁力的影响。得出结果如图 3-7 所示，随着电流的增加，永磁体所受到的力也逐渐增加，并呈现出线性关系，并且在 1A 电流下随着气隙的减小，电磁力也在逐渐增加，结果如图 3-8 所示。

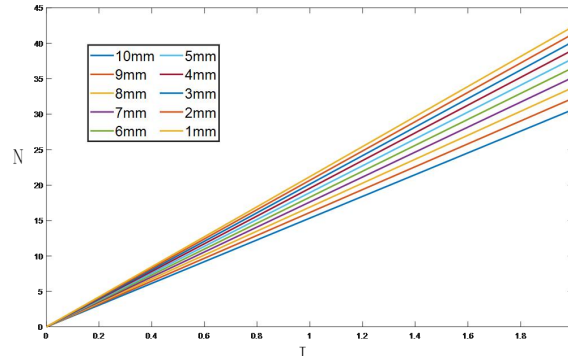


图 3-7 同气隙下电磁力的输出响应

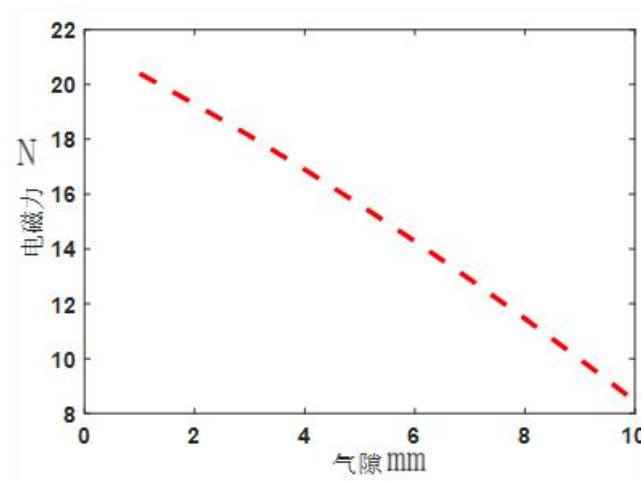


图 3-8 1A 电流下气隙对电磁力的影响

3.3 电磁驱动力仿真分析

3.3.1 永磁铁磁场强度仿真

为使电磁吸附效果更好，采用永磁体作为被吸附对象，通过电磁线圈产生的磁场和永磁体自身固有的磁场叠加，使吸附效果更好，由于永磁体的结构参数对永磁体自身固有的磁场影响较大，固下文对不同厚度和直径的永磁体进行静磁学仿真，从而确定合适的尺寸。具体步骤如下：

采用 Maxwell 软件，模型包括空气域和永磁体，绘制一个矩形区域作为空气域，属性默认为 vacuum，在空气域中，绘制永磁体，并指派材料属性。材料属性指派为 NdFe30，充磁方向设置为 Y Component。

完成材料属性指派后，可以在模型树中看到，不同的模型已被赋予相应的材料属性。选择空气域边缘设置边界条件为 Vector Potential，取值为 100。插入默认求解器，进行求解右击生成所求解的磁场强度示意图。如图 3-9 所示为厚度为 8mm，半径为 20mm 的永磁体磁场强度示意图。

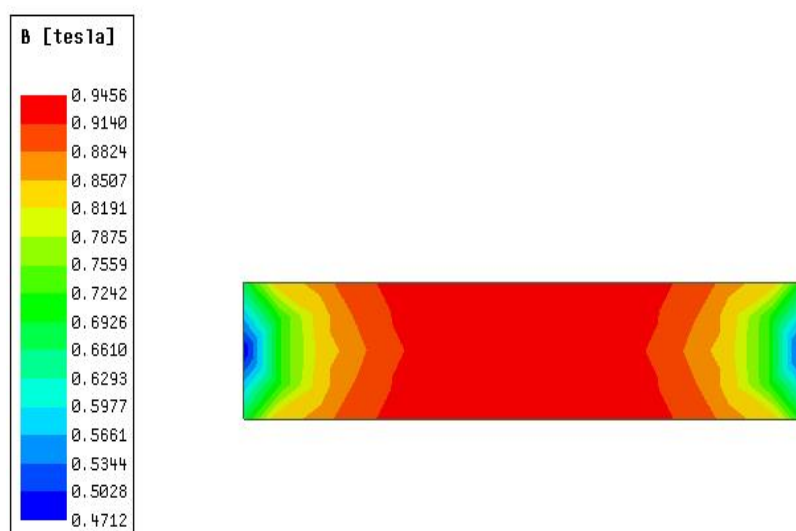


图 3-9 永磁铁磁场强度示意图

在永磁体属性中选中结构参数，分别改变永磁体厚度和半径，并重复上述步骤，得到的最大磁场强度如表 3-2 所示。

表 3-2 永磁体结构参数					
半径 \ 厚度	6mm	8mm	10mm	12mm	14mm
1mm	1.7637	1.8336	2.0007	1.9522	1.8895
5mm	1.5699	1.9124	1.6106	1.6461	1.8594
10mm	1.8066	1.6634	1.9109	1.5699	1.6500
15mm	1.4389	1.6055	1.8345	1.6634	1.7469
20mm	1.9311	1.4389	1.2947	1.6866	1.4756
25mm	1.6939	1.6256	1.6737	1.6238	1.3319
30mm	1.5549	1.9105	1.6164	1.4389	1.6917

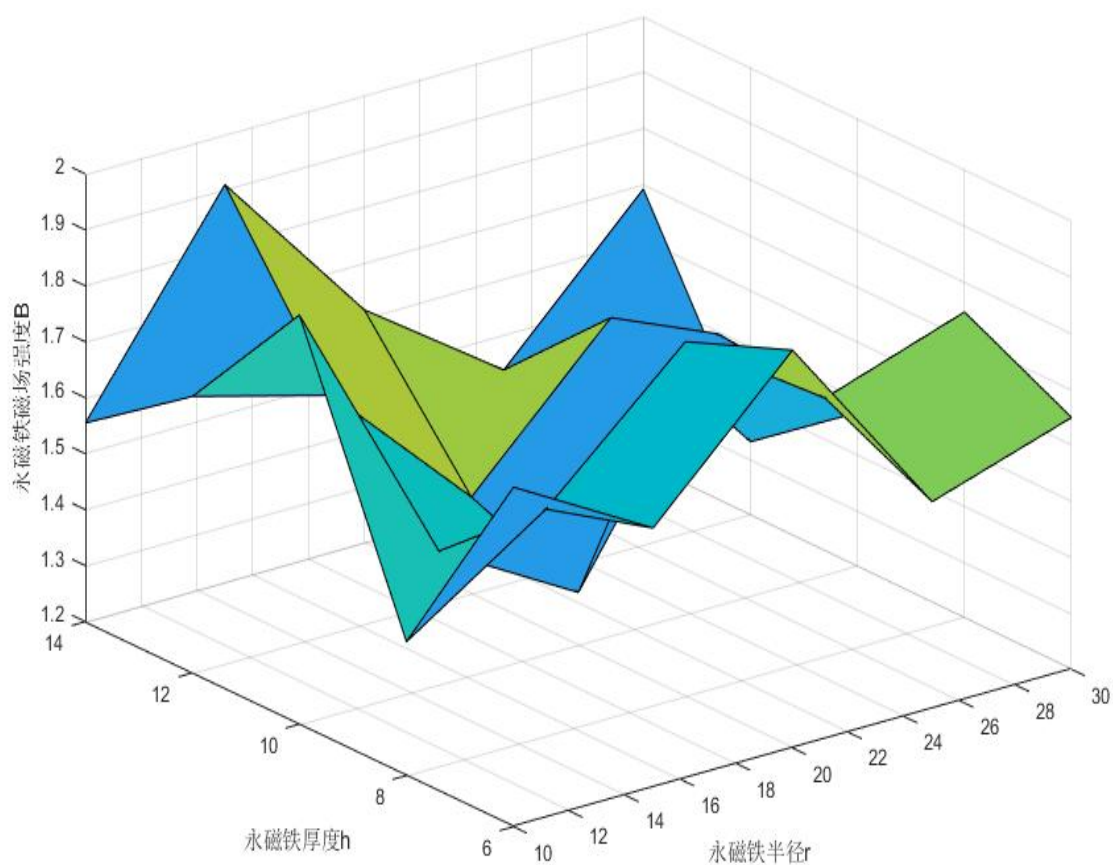


图 3-10 永磁体结构参数对磁场的影响

图 3-10 为永磁体厚度和半径对永磁体磁场强度影响的三维模型图，表 3-3 为永磁铁半径对力的影响，图 3-11 为三维示意图，结果表明，永磁铁的半径和厚度对其在电磁线圈产生的磁场中的受力有重要影响，结合电磁驱动柔顺减振装置设计和仿真结果选取半径为 20mm，厚度为 10mm 的永磁体。

表 3-3 永磁铁半径对力的影响

永磁铁半径和厚度在 1A 电流下对电磁力的影响					
厚度 半径	6mm	8mm	10mm	12mm	14mm
1mm	0.0184	0.0196	0.0219	0.0217	0.0213
5mm	0.421	0.526	0.454	0.4726	0.542
10mm	2.1086	1.9997	2.354	1.9735	2.1097
15mm	4.2677	4.9183	5.8023	5.2913	5.7342
20mm	11.7175	9.0430	8.3828	11.2008	10.0145
25mm	18.5529	18.4875	16.1358	19.6121	16.4784
30mm	28.1771	36.0246	31.554	28.9429	34.9330

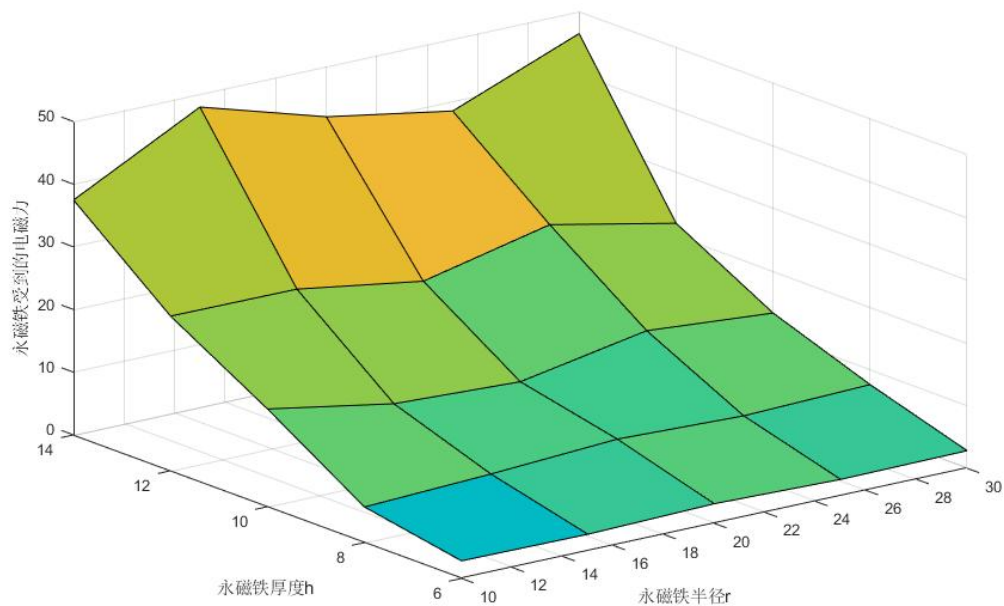


图 3-11 永磁体力三维示意图

3.3.2 电磁力仿真

根据上述公式可得，对于电磁线圈-永磁铁动力交互系统而言，电磁线圈产生的磁场强度对整体装置的设计起到至关重要的作用，本节在 ANSYS 分析软件中对不同电流下的电磁线圈产生的磁场强度进行仿真分析，从而得出不同电流下磁场强度。打开 workbench 中的 Maxwell2D 模块，在 Geometry 中进行模型绘制，由于进行的是电磁线圈的仿真，为柱体，故采用 Z 轴旋转绘图，同时选择仿真的求解器，由于是静磁场分析，选择第一个静磁场求解器。在绘图界面用矩形模拟线圈界面，并在属性里面改变尺寸大小，将数值设置为设计的尺寸大小。

由于线圈是由漆包铜线缠绕组成的，所以给线圈部分设置的材料为 **copper**，铁芯设置为 **stell**，最后划定空气域 **Balloon**，并选中空气域四个边界线右击设置为磁场边界。利用设定的求解器去划分线圈铁芯的网格，划分好网格之后，右击左端线圈添加电流，由于线圈是由矩形代替，所以此时的电流大小为线圈乘匝数，方向选择正向；右击右端线圈添加电流，数值同上，方向选择逆向，此时线圈就形成了一个完整的闭合回路。插入默认求解器，进行求解，选中线圈和铁芯，右击生成所求解的磁场强度示意图。

本节结合建立的电磁驱动柔顺减振装置的动力学模型，对电磁驱动柔顺减振装置的电磁输出特性和隔振性能进行分析。根据前面分析可知，电磁驱动柔顺减振装置是典型的机电耦合系统，对电磁线圈和永磁铁动力交互系统而言，电磁线圈产生的磁场强度对整体装置的动态性能具有重要影响。为了分析电磁驱动柔顺减振装置的电磁力输出性能，本节首先对不同电流和气隙下电磁线圈的磁场强度和电磁力进行仿真分析。

图 3-12 为不同电流下电磁驱动柔顺减振装置电磁线圈产生的磁场强度，图 3-13 为不同气隙下电磁驱动柔顺减振装置的电磁力，可以看出，电流和气隙参数对电磁驱动柔顺减振装置的电磁力输出特性具有重要影响。

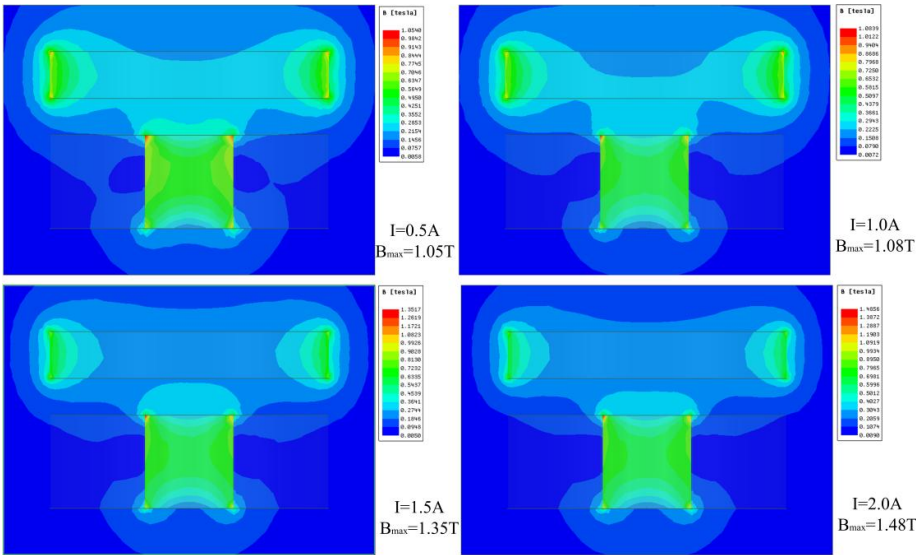


图 3-12 不同电流下电磁驱动柔顺减振装置的磁场强度

(I 为施加的电流，气隙 $\delta=8\text{mm}$ ， B_{max} 为最大磁场强度)

综上可得，对于电磁驱动柔顺减振装置，当电流增加时，电磁吸力逐渐增加；而当气隙增大时，电磁吸力逐渐减小。由此可见，电磁驱动柔顺减振装置

的电磁吸力与电流和气隙的关系与理论模型一，且对下文电磁驱动柔顺减振装置的振动控制具有指导意义。

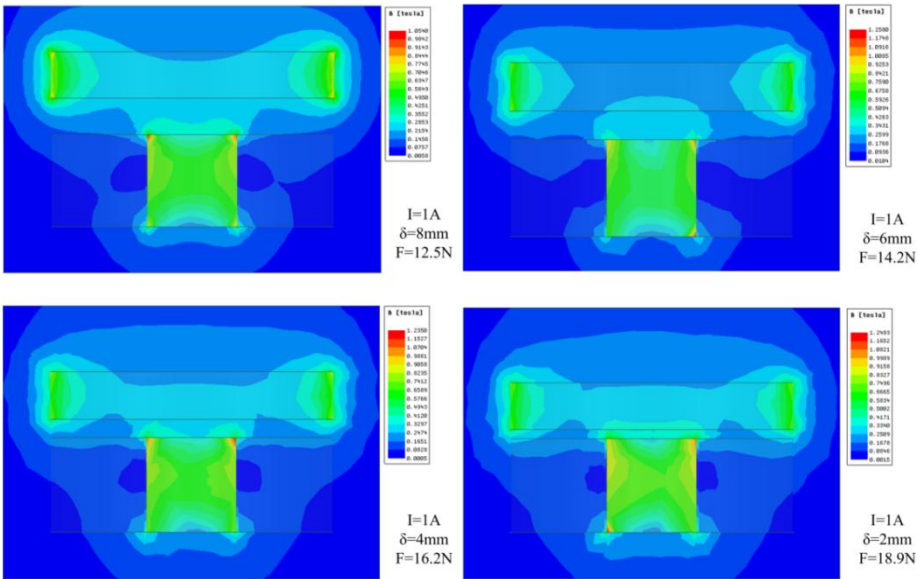


图 3-13 不同气隙下电磁驱动柔顺减振装置的磁场强度

(电流 $I=1A$ ， δ 为气隙， F 为永磁体在磁场中所受的力)

3.3.3 电磁驱动力动态特性仿真分析

由于永磁体在电磁线圈产生的磁场中会受到电磁力的吸引或者排斥作用，所以本章节对电磁驱动柔顺减振装置电磁驱动力动态特性进行仿真分析，进一步分析装置的动力学特性。

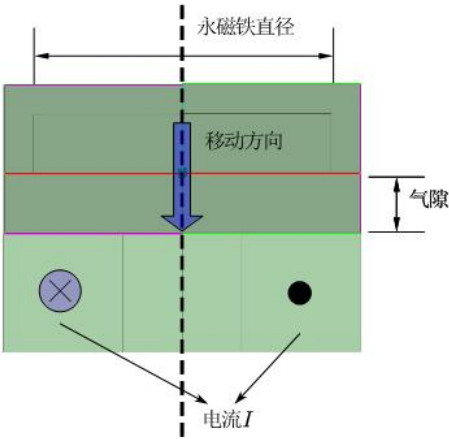


图 3-14 Maxwell 仿真模型

使用上节中的模型文件，包括电磁线圈和永磁铁的 3D 模型。在 Maxwell 中创建新项目，并导入已绘制的电磁线圈和永磁铁模型，并确定线圈匝数、直径、厚度和永磁铁的材料、尺寸；设置磁场的边界条件；进一步选取设置永磁

体的运动范围边界并确定运动方向，具体模型如图 3-14 所示。

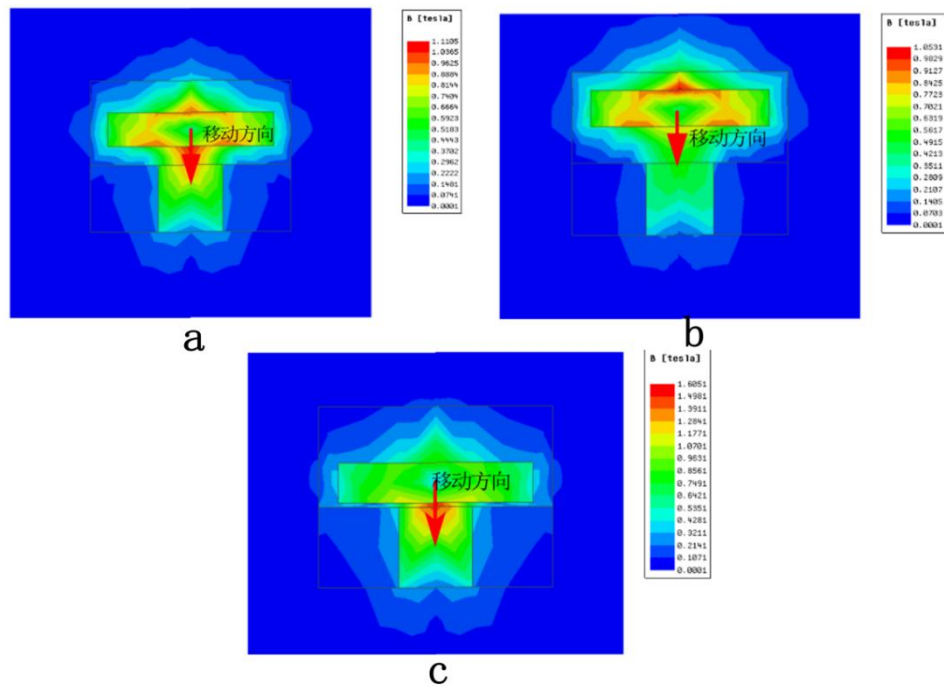


图 3-15 电磁线圈-永磁铁交互动力系统仿真结果

将瞬态求解器改变为动态求解器，检查后进行仿真分析，从而得到磁场强度、磁场力等数据。如图 3-15 所示为电磁线圈-永磁铁交互动力系统仿真结果，可以看出，随着电流的施加，永磁体在线圈产生的电磁场中，受到电磁线圈的电磁吸力并逐渐向电磁线圈靠近，从而起到调节的作用。

3.4 电磁驱动柔顺减振装置减振性能分析

本文设计的电磁驱动柔顺减振装置地主要功能是实现机器人和末端执行器之间地柔顺减振和机器人搬运过程的振动抑制。分析电磁驱动柔顺减振装置的动态性能，本文分析了电磁驱动柔顺减振装置的幅频特性和振动传递特性，如图 3-16~图 3-17 所示为装置在受到幅值为 10N 的激振力的情况下，电磁驱动柔顺减振装置的弹簧刚度和阻尼比对幅频特性的影响。图 3-18~图 3-19 为装置在受到幅值为 10N 的激振力和电磁力的情况下，电磁驱动柔顺减振装置的电流和气隙对对幅频特性的影响。

结果表明随着弹簧刚度和阻尼比的增大，系统的幅频响应越低，在施加电磁力的情况下，随着电流的增大和气隙的减小，系统的幅频响应越低。

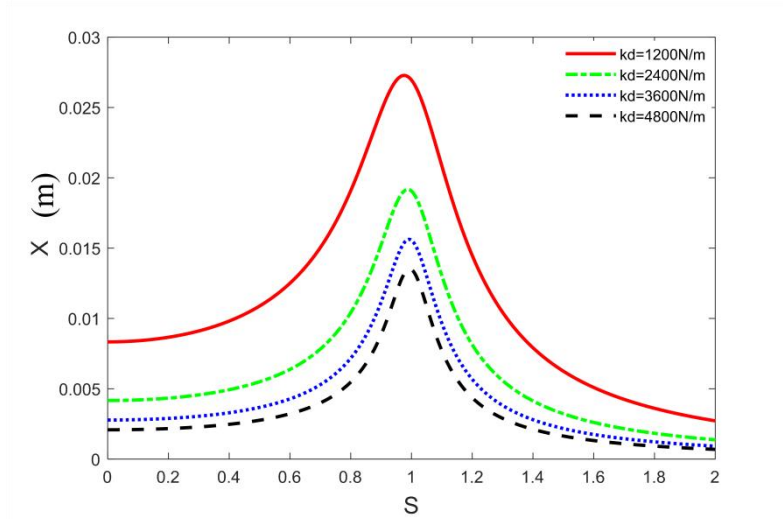


图 3-16 不同弹簧刚度下电磁驱动柔顺减振装置的幅频特性

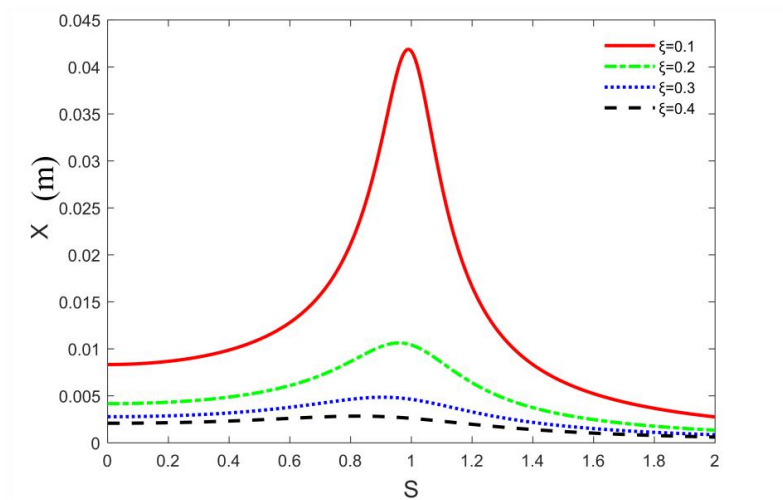


图 3-17 不同阻尼比下电磁驱动柔顺减振装置的幅频特性

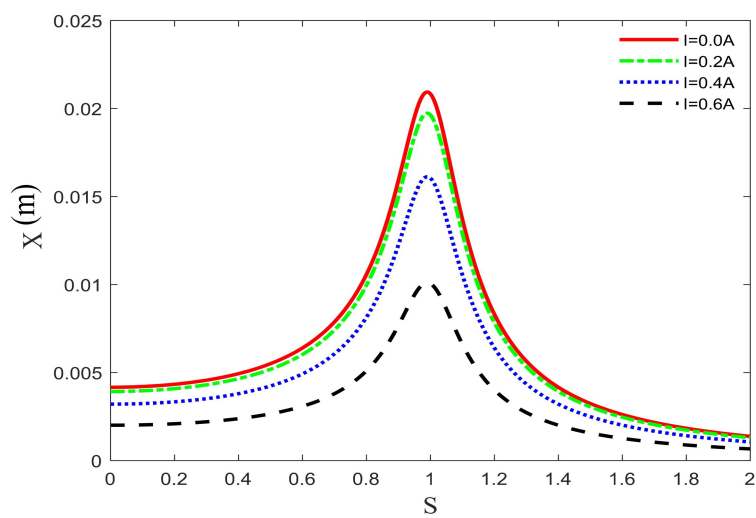


图 3-18 不同电流下电磁驱动柔顺减振装置的幅频特性

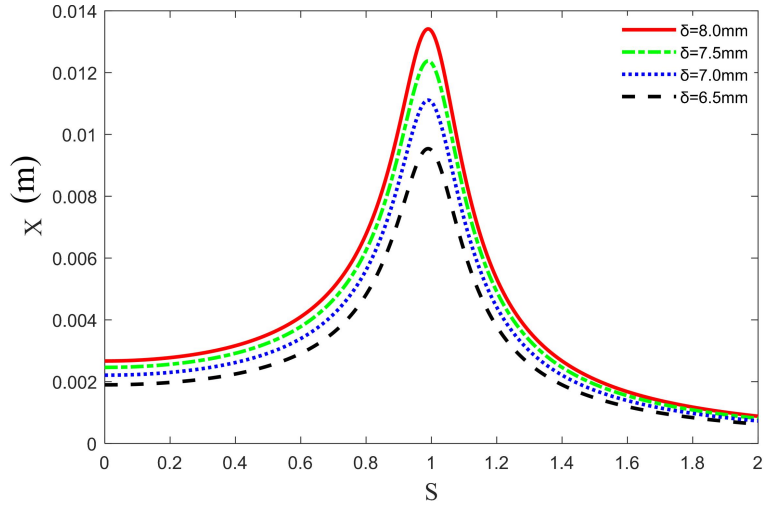


图 3-19 不同气隙下电磁驱动柔顺减振装置的幅频特性

图 3-20~图 3-21 所示为电磁驱动柔顺减振装置的刚度和阻尼参数对位移传递率的影响：当 S 小于等于 1 时，即激振频率小于或等于系统固有频率时，此时装置没有减振效果，并且峰值随着阻尼的增大而减小；当 S 小于 $\sqrt{2}$ 时，随着刚度的变大，阻尼比越小，则位移传递率越大；当 S 大于 $\sqrt{2}$ 时，即激振频率大于系统固有频率的 $\sqrt{2}$ 时，位移传递率小于 1，说明系统此时起到减振的作用，刚度越大，阻尼比越小，则位移传递率越小。由此可见，改变系统的刚度，对于隔绝系统的响应振幅，有较好的效果；当 S 大于 3 时，装置减振效果较好。

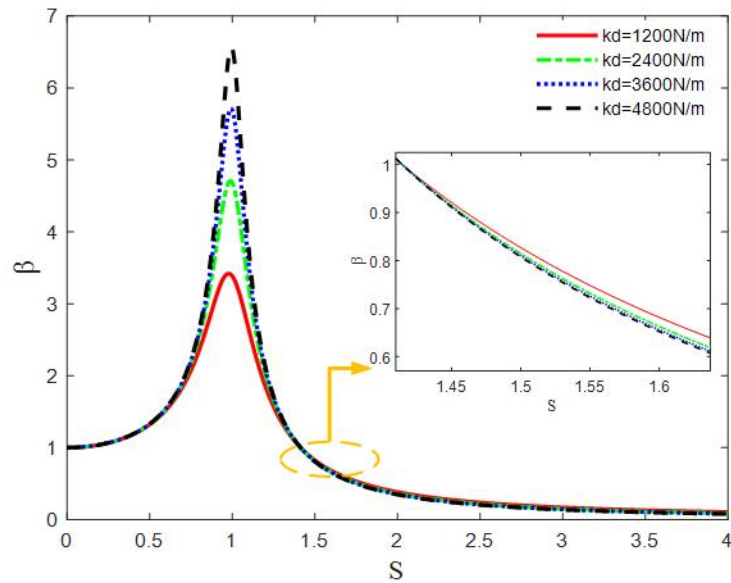


图 3-20 不同刚度下电磁驱动柔顺减振装置的振动传递率

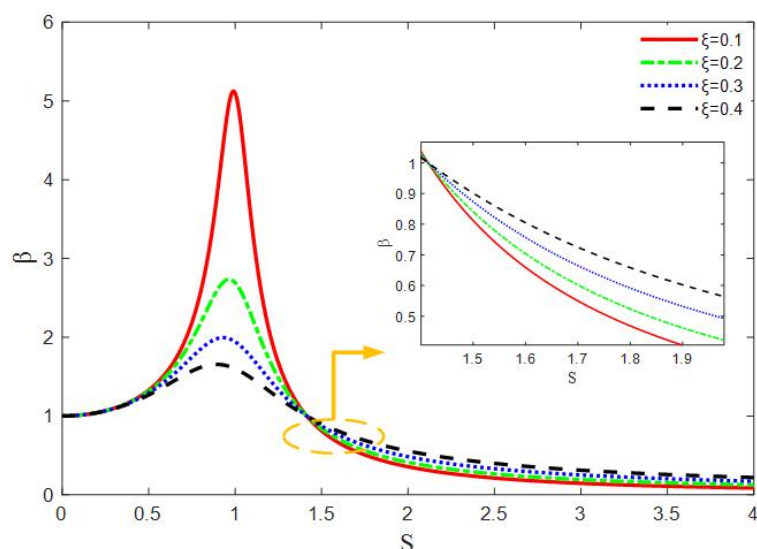


图 3-21 不同阻尼比下电磁驱动柔顺减振装置的振动传递率

3.5 整体系统减振性能分析

将机器人-电磁减振装置-弹性薄壁件整体动力学系统等效为三自由度弹簧系统，如图 3-22 所示。图中 m_j 、 m_d 、 m_b 分别为机器人末端等效质量、电磁装置的质量和弹性薄壁件的质量， k_j 、 k_d 、 k_b 分别为机器人末端等效弹簧刚度、电磁装置的刚度和弹性薄壁件的等效刚度， f_r 为对应机器人末端受到的扰动力。

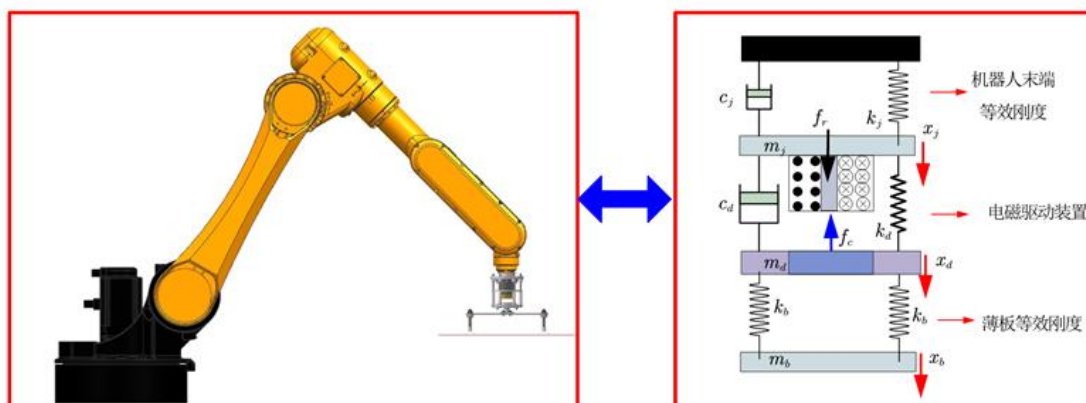


图 3-22 机器人搬运系统等效动力学模型

相较于传统动力学系统，三自由度动力学较为复杂，利用空间状态方程，可以涵盖系统不同参数对位移响应的影响。将机器人-电磁减振装置-弹性薄壁件整体动力学的状态空间描述为

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu \\ Y = CX + Du \end{cases} \quad (3-28)$$

式中， X 是状态矢量； Y 是输出矢量； u 是输入（控制）矢量； A 是系统矩阵； B 是输入矩阵； C 是输出矩阵； D 为直接传递矩阵^[64]。将机器人-电磁减振装置-弹性薄壁件的位移 x_j 、 x_d 、 x_b 和速度 $\dot{x}_j$ 、 $\dot{x}_d$ 、 $\dot{x}_b$ 设为状态变量，即 $x_1=x_j$ 、 $x_2=x_d$ 、 $x_3=x_b$ 、 $x_4=dx_j/dt$ 、 $x_5=dx_d/dt$ 、 $x_6=dx_b/dt$ ，根据牛顿定律，得到系统的整体方程为

$$\begin{cases} m_j \ddot{x}_j = f_r - k_j x_j + k_d (x_d - x_j) - c_j \dot{x}_j + c_d (\dot{x}_d - \dot{x}_j) \\ m_d \ddot{x}_d = k_d (x_j - x_d) + k_b (x_b - x_d) + c_d (\dot{x}_j - \dot{x}_d) \\ m_b \ddot{x}_b = k_b (x_d - x_b) \end{cases} \quad (3-29)$$

带入状态变量得

$$\begin{cases} \dot{x}_4 = \frac{f_r - (k_d + k_j)x_j + k_d x_d - (c_j + c_d)\dot{x}_j + c_d \dot{x}_d}{m_j} \\ \dot{x}_5 = \frac{k_d x_j - (k_b + k_d)x_d + k_b x_b + c_d \dot{x}_j - c_d \dot{x}_d}{m_d} \\ \dot{x}_6 = \frac{k_b (x_d - x_b)}{m_b} \end{cases} \quad (3-30)$$

$$\dot{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T \quad (3-31)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_j + k_d}{m_j} & \frac{k_d}{m_j} & 0 & -(c_j + c_d) & c_d & 0 \\ \frac{k_d}{m_d} & -\frac{k_b + k_d}{m_d} & \frac{k_b}{m_d} & c_d & -c_d & 0 \\ 0 & \frac{k_b}{m_b} & -\frac{k_b}{m_b} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{m_j} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-32)$$

则输出方程为

$$\begin{pmatrix} x_j \\ x_d \\ x_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} \quad (3-33)$$

根据上述空间状态方程，通过 MATLAB 软件输入参数后中进行仿真分析，

得到的幅频特性分析如所示，如图 3-23 所示，通过观察幅频特性可以看出，对于机器人-电磁减振装置-弹性薄壁件整体动力学系统的电磁减振装置和弹性薄壁件的位移在中低频阶段极为接近，在高频阶段有小范围偏差。

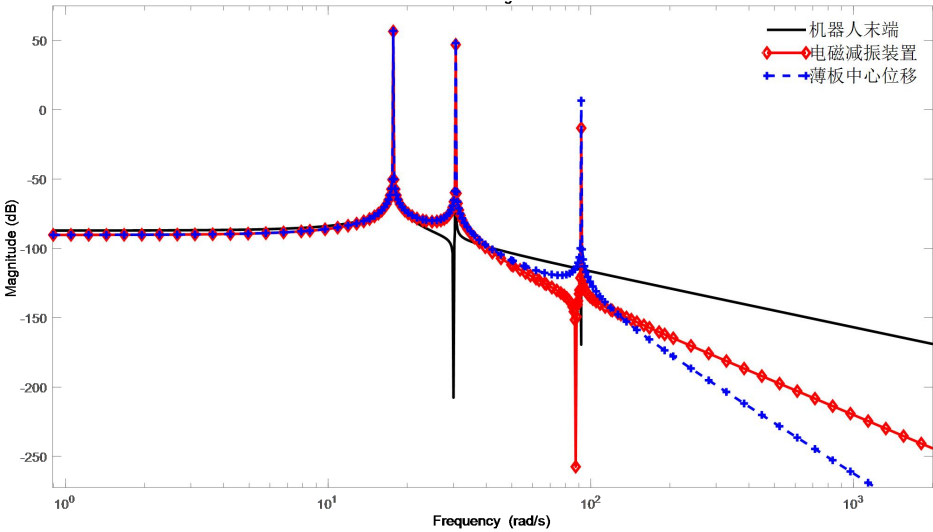


图 3-23 机器人搬运系统等效幅频特性分析

在 MATLAB 软件软件中对上述动力学模型进行仿真分析，输入一个幅值为 10N 的正弦扰动力，如图 3-24 所示，在横向搬运过程中，机器人在不同位姿下受到扰动力，得到的薄壁件的振动位移在幅值上有细微偏差，但整体频率和走向一致；在同一个机器人位姿下，分别改变电磁驱动柔顺减振装置的弹簧刚度，得到的薄壁件的振动位移如图 3-25 所示。

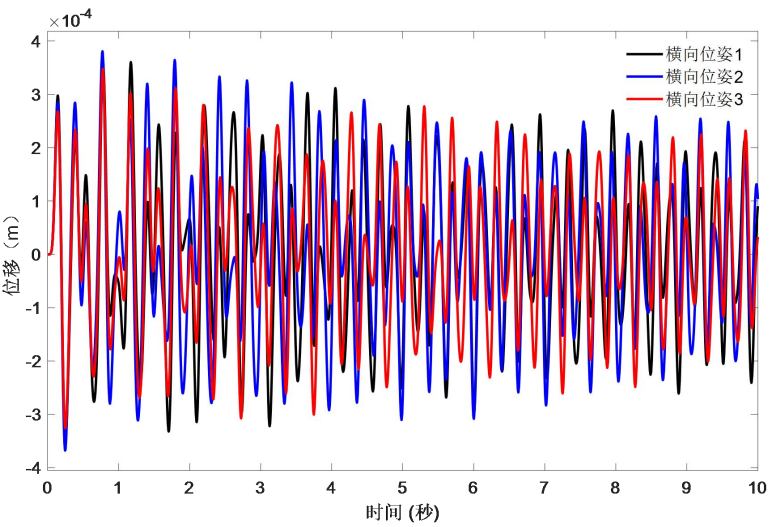


图 3-24 横向位姿薄壁件振动位移

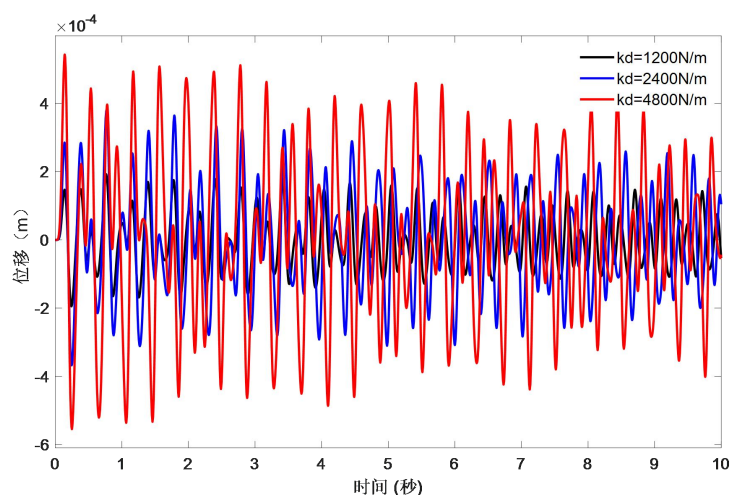


图 3-25 不同刚度下薄壁件振动位移

3.6 本章小结

本章针对弹性薄壁件机器人搬运系统的振动传递行为，设计了一种新型的电磁驱动柔顺减振装置，抑制搬运系统存在的振动传递。建立了电磁驱动柔顺减振装置的机电耦合动力学方程和电磁线圈-永磁铁交互动力学模型，并对电磁线圈和永磁铁进行了仿真分析验证。最后对电磁驱动柔顺减振装置和机器人搬运整体系统进行特性分析，得出电磁驱动柔顺减振装置在被动模式下对于高频激励具有较好的隔振功能。

第 4 章 弹性薄壁件机器人搬运系统振动控制策略研究

通过电磁驱动柔顺减振装置的振动位移传递特性分析可以看出，本文设计的电磁驱动柔顺减振装置在一定频率范围内即高频激励下具有被动隔振功能，能够在一定程度上抑制机器人末端的振动传递。为了进一步提升电磁驱动柔顺减振装置的隔振性能，实现低频到高频的全频段的振动控制，本文基于PID控制器设计了电磁驱动柔顺减振装置的振动主动控制策略。

4.1 主动振动控制策略

在机械控制系统中，PID 控制稳定性好、可靠性高。因此，本节搭建基于PID控制的自适应减振控制系统。

PID 控制通过线性组合偏差的比例（P）、积分（I）和微分（D）来生成控制量，从而对控制对象进行调整。典型的 PID 控制系统由 PID 控制器和被控对象组成，其中，三个校正环节——比例（P）、积分（I）、微分（D）的参数设定对于 PID 控制器的控制效果和动态特性至关重要。具体来说，比例环节通过比例放大偏差信号以减小偏差；积分环节通过消除系统的稳态误差，提升控制过程的无差度；而微分环节则通过改变偏差信号的趋势，加快反应速度，从而缩短调节时间。如图 4-1 所示是电磁驱动柔顺减振装置 PID 控制的原理框图。

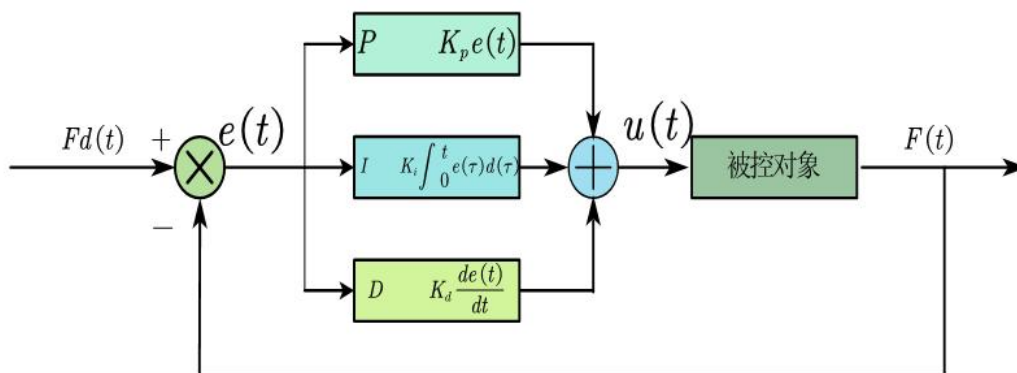


图 4-1 PID 控制原理

4.1.1 反馈系统特性分析

定义电磁驱动柔顺减振装置的质量为 m ，弹簧刚度为 $k=2400\text{N/m}$ ， $\alpha=1500\text{N/m}$ ， $\beta=2.4\text{N}\cdot\text{s/m}$ ， $\lambda=0.4\text{Kg}$ 。利用 MATLAB 绘制位移传递率与频率之间

的关系曲线。当采用位移振动被用作反馈信号时，我们将该信号标记为 α ，有 $f=\alpha z$ ，带入上式得

$$F_r(t) = m\ddot{Z}(t) + C\dot{Z}(t) + (k + \alpha)Z(t) \quad (4-1)$$

对上式进行拉普拉斯变换后得

$$F_r(S) = ms^2 Z(s) + DsZ(s) + (k + \alpha)Z(s) \quad (4-2)$$

则电磁柔顺减振装置末端的位移响应与扰动力之间的传递函数为

$$G(s) = \frac{Z(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + Ds + K + \alpha} \quad (4-3)$$

由上述可得，系统的振幅和频率的关系如下：

$$x_1 = \frac{F_0}{\sqrt{(k + \alpha - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \quad (4-4)$$

本文运用位移传递率作为评价指标，对减振系统的减振效果进行量化评估。

$$\eta_1 = \frac{x_0}{A} \quad (4-5)$$

A 为激振力位移的幅值

$$\eta_1 = \frac{-m\omega^2}{\sqrt{(k + \alpha - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \quad (4-6)$$

当质量为 m 的板的速度振动被用作反馈信号时，我们将该信号标记为 β ，有 $f = \beta\dot{x}$ ，同理可得系统的位移传递率为

$$\eta_2 = \frac{-m\omega^2}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c + \beta\omega)^2}} \quad (4-7)$$

当质量为 m 的板的加速度振动被用作反馈信号时，我们将该信号标记为 λ ，有 $f = \lambda\ddot{x}$ ，同理可得系统的位移传递率为

$$\eta_3 = \frac{-(m + \lambda)\omega^2}{\sqrt{(k - (m + \lambda)\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \quad (4-8)$$

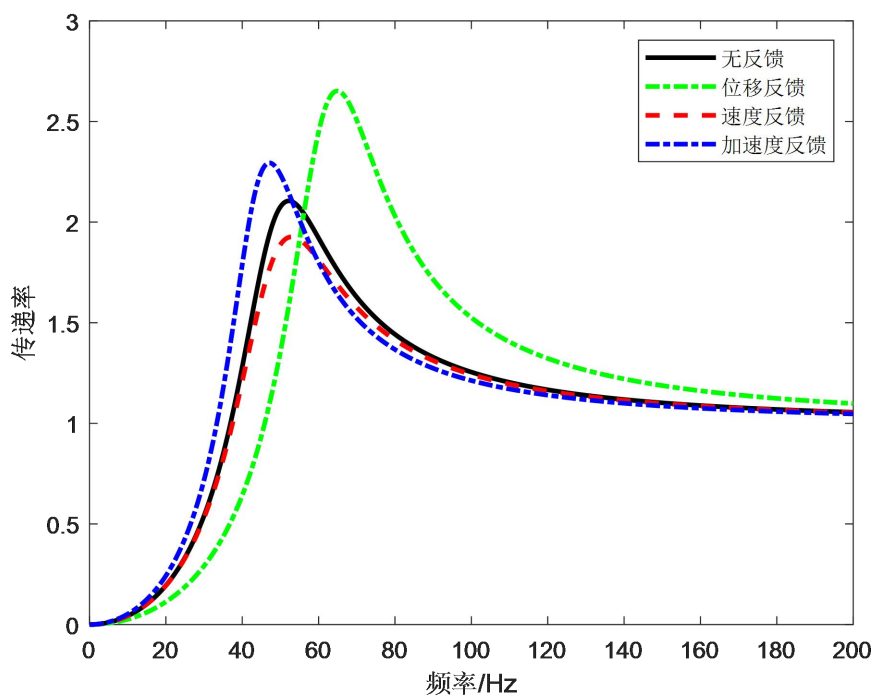


图 4-2 系统反馈特性

由图 4-2 可以得知，位移反馈控制改变了电磁减振系统的位移传递，使其整体向右偏移，优化了低频段的减振性能，劣化了高频段系统的减振性，增加了共振峰值；速度反馈控制使电磁减振系统的位移传递率整体变化不大，在低频段和高频段减振系统的性能有一定改善，在系统达到共振时，振动减小；加速度反馈控制其整体向左偏移，劣化了低频段的减振性能，优化了高频段系统的减振性，增加了共振峰值。结合前文内容，故本文采用位移进行反馈。

4.1.2 控制系统搭建

电磁驱动柔顺减振装置的振动主动控制流程为：当吸盘末端受到激励时，弹性薄壁件产生振动位移，并与电磁力具有耦合作用，改变电磁力的大小，同时改变弹簧弹力大小。通过改变线圈两端电流 I ，使电磁线圈产生电磁力 F_d 作用于减振底座，在搬运的过程中产生位移 x 。根据振动位移实时调节电磁驱动减振装置电磁线圈的控制电流，经控制器调节后得到电流变化量，从而施加到电磁柔顺减振装置中，进而改变系统输出位移，从而通过电磁线圈电磁力的补偿控制实现弹性薄壁件的振动抑制，图 4-3 为控制系统反馈流程图。

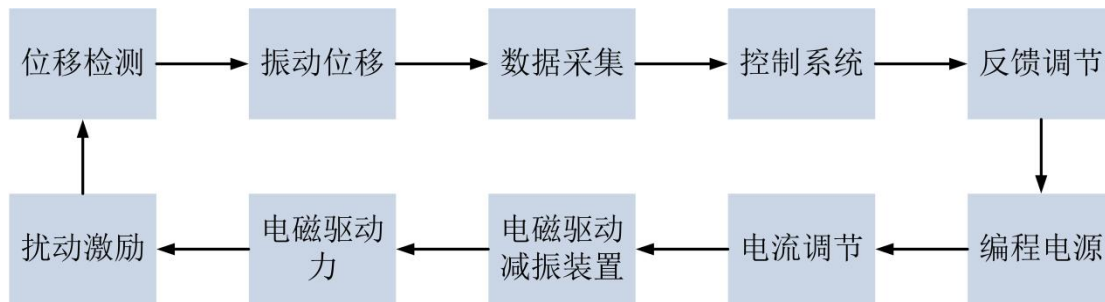


图 4-3 控制系统反馈流程图

图 4-4 为基于 MATLAB/Simulink 软件搭建的电磁驱动柔顺减振装置振动控制模型，通过仿真分析电磁驱动柔顺减振装置的振动主动控制性能。

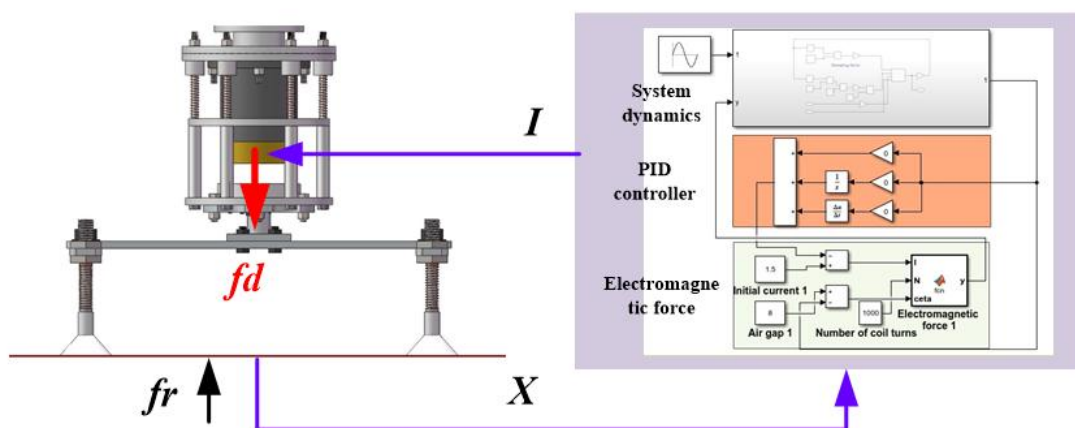


图 4-4 电磁驱动柔顺减振装置振动控制模型

在仿真分析时，在吸盘末端施加幅值为 $F_0=10\text{N}$ 的正弦扰动激励，为了做对比分析，激振频率分别取值为 24Hz，32Hz，64Hz。图 4-5(a)、图 4-5(b)、图 4-5(c)分别是不同正弦激振频率下系统的输出位移，可以看出在电磁驱动柔顺减振装置的被动控制模式下，对于高频激励(64Hz)，电磁驱动柔顺减振装置具有明显的被动隔振效果，对于中低频激励(24Hz，32Hz)被动隔振效果不明显，甚至会放大振动响应。

在电磁驱动柔顺减振装置的主动控制模式下，在施加正弦激励后，系统能够快速将其抑制，末端吸盘的振动位移均能得到有效的抑制，有效弥补中低频激励电磁驱动柔顺减振装置被动隔振存在的不足，实现全频段的振动控制，减振效果较好。

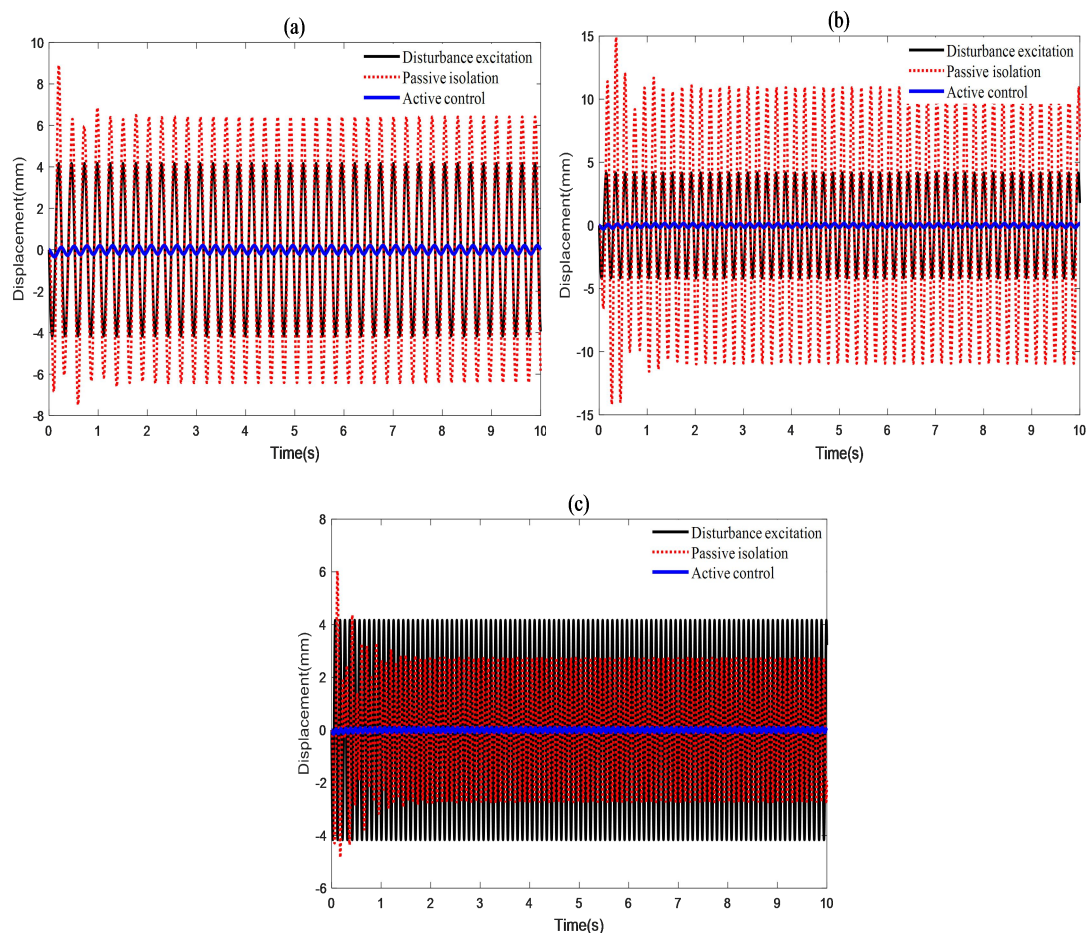


图 4-5 不同扰动激励下搬运吸盘的振动位移曲线：（a） $s=0.6$ ，（b） $s=0.8$ ，（c） $s=1.6$

4.2 振动控制虚拟样机实验

由于机器人复杂的结构，单一软件无法进行高效分析。ADAMS 软件不仅可以进行运动学和动力学分析，还可以进行模块控制，通过结合 MATLAB/Simulink，能够搭建具有反馈功能的控制系统。故先在 ADAMS 软件中构建电磁驱动柔顺减振装置的模型，创建通道，然后在 MATLAB/Simulink 中设计 PID 控制系统。

4.2.1 虚拟样机平台搭建

联合仿真流程如下：在 ADAMS 软件中，构建机器人模型，确定输入与输出变量。其中，输入变量为 Simulink 控制系统向 ADAMS 提供的数据，而输出变量为传输给 Simulink 控制系统的数据。ADAMS/Controls 模块可以生成用于数据交互的模块；Simulink 利用该模块构建的控制系统，接受 ADAMS 的输出变量控制主动力并作为输入变量传递回 ADAMS，从而实现了实时的双向数据

交换。两个软件协同工作，实现了对机器人搬运系统的联合仿真，如图 4-6 所示为联合仿真框图。

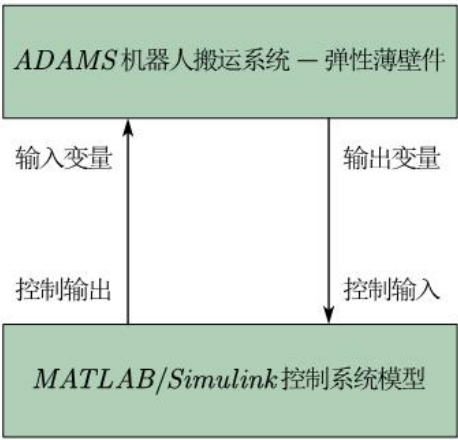


图 4-6 联合仿真框图

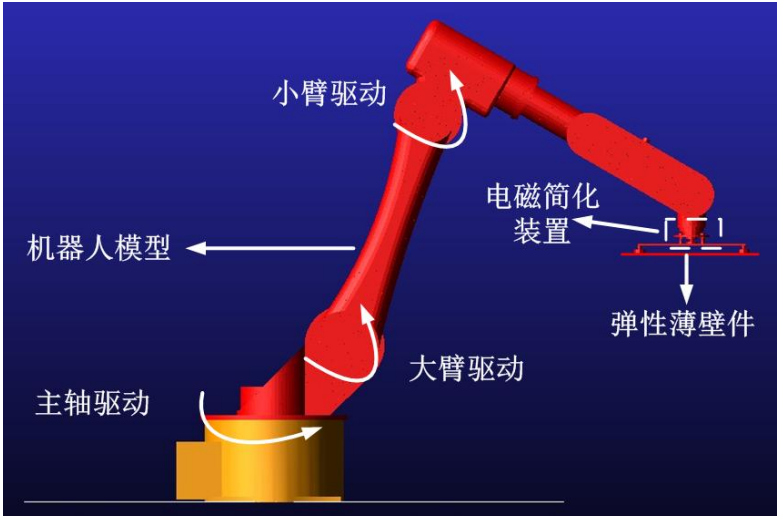


图 4-7 机器人简化模型

首先在 ADAMS 中导入机器人搬运系统的简化模型，然后对模型建立运动控制变量，本文选择的系统将机器人主轴的旋转驱动、机器人大臂和小臂的旋转驱动、施加在电磁简化装置的中心点的主动电磁力和施加在机器人末端的扰动力设为输入变量，将机器人末端吸附的薄壁件的中心点的振动位移设为输出变量，如图 4-7 所示。完成输出变量的设定后，界面如图 4-8 所示，从而进行后续的仿真分析或控制设计。

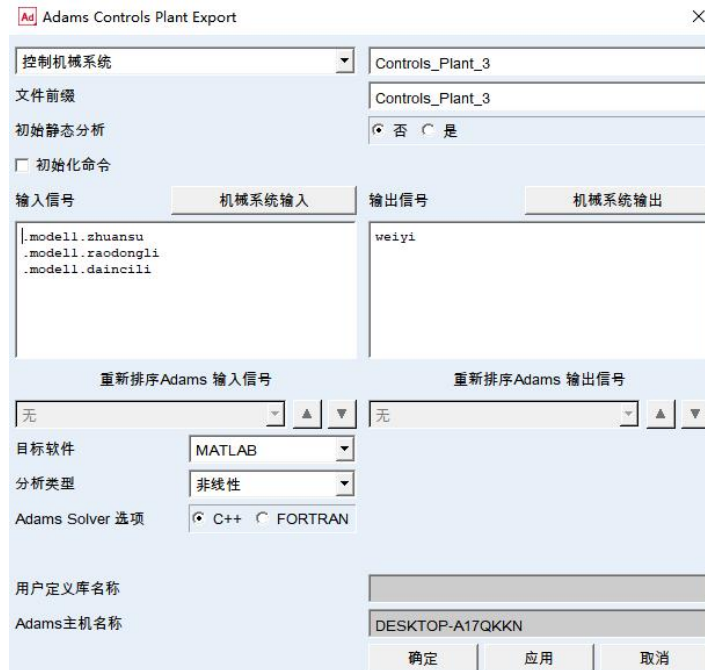


图 4-8 系统输出界面

如图 4-9 所示，ADAMS_sub 用于构建机器人搬运系统的主被动振动控制联合仿真模型，如图 4-10 所示。

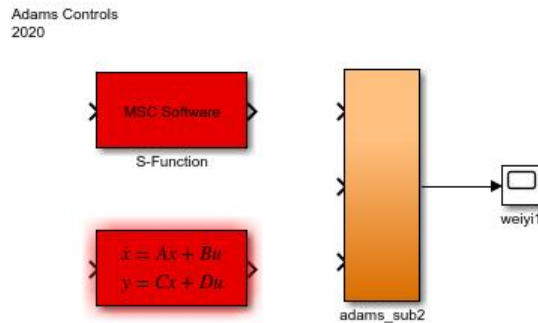


图 4-9 ADAMS_sub 模块

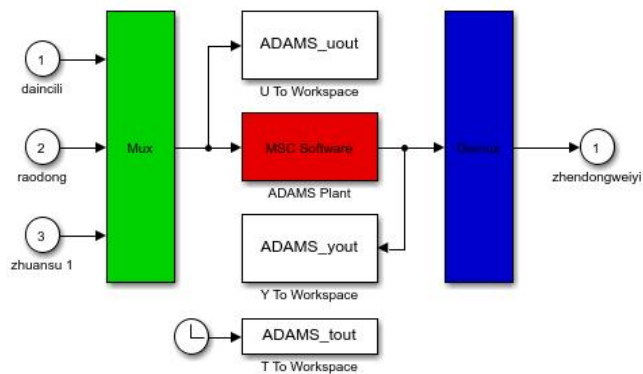


图 4-10 ADAMS_sys 模块

最后利用 ADAMS_sub 模块搭建基于 PID 的机器人搬运联合仿真控制系统，如图 4-11 所示。

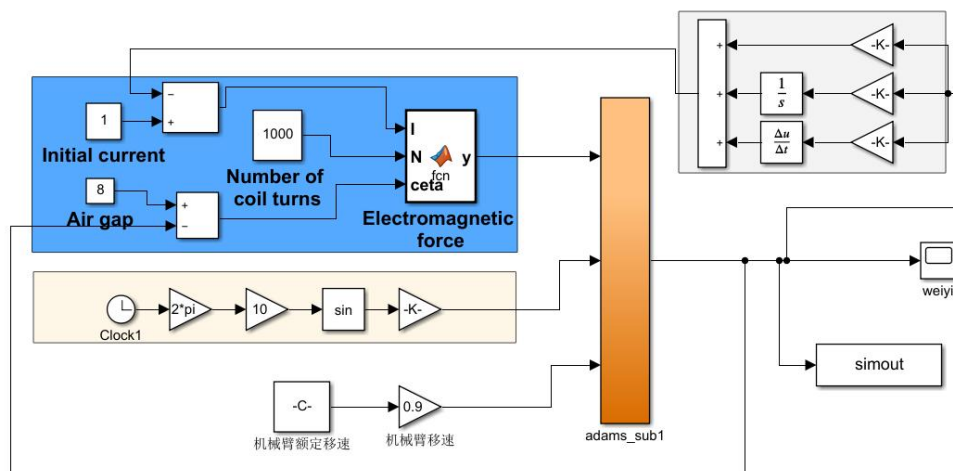


图 4-11 ADAMS 虚拟样机仿真系统图

4.2.2 仿真结果分析

为模拟实际搬运情况，假设机器人搬运的具体流程为：机器人移动到弹性薄壁件上方，机器人开始下行，机器人末端的吸盘接触到工件，开启气缸，吸盘进行吸附，机器人上行，移动到预定的位置，到达薄壁件预放位置，薄壁件释放，则搬运机器人结束本次工作。为进一步验证机器人实际搬运系统的主被动控制效果，将模拟固定位姿下施加扰动和不同移速下机器人搬运电磁驱动柔顺减振装置的减振效果。

（1）位姿固定

基于搭建的电磁驱动柔顺减振装置虚拟样机联合仿真实验平台进行实验测试，在实验过程中，在机器人末端上施加幅值为 $F_0=10\text{N}$ 的正弦扰动激励，为了做对比分析，激振频率分别取值为 24，32，64Hz，不同频率扰动激励下弹性薄壁件的振动位移响应曲线如图 4-12 所示。

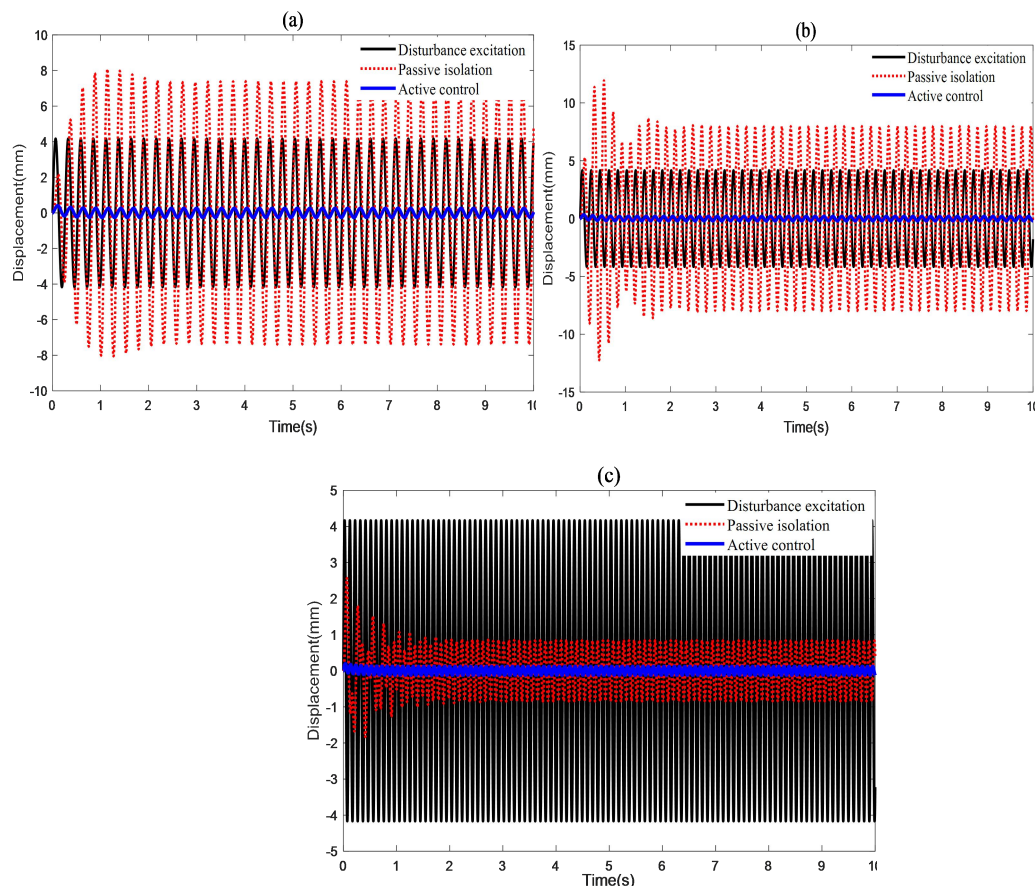


图 4-12 电磁驱动柔顺减振装置虚拟样机联合仿真实验结果：

(a) $w=24$, (b) $w=32$, (c) $v=64$

根据联合仿真实验结果同样可以看出，在被动控制模式下，对于高频激励，弹性薄壁件的振动位移能够得到一定的抑制，电磁驱动柔顺减振装置具有明显的被动隔振效果；在主动控制模式下，弹性薄壁件的振动位移均能得到有效的抑制，电磁驱动柔顺减振装置可实现全频段的振动控制。联合仿真实验结果与理论分析结果一致，验证了本文设计的电磁驱动柔顺减振装置的振动控制的有效性。

(2) 不同转速搬运

设定机械臂额定移速为 $150^\circ/\text{min}$ ，图 4-13 为机械臂 30%，50%，70%，90%额定移速下的主被动减振效果图，可以看出，系统在主被动控制下具有良好的减振效果，能有效的抑制弹性薄壁件在搬运工程中产生的响应振动。另外，不同转运速度下，弹性薄板的振动信号发生变化，电磁驱动柔顺减振装置通过算法调节电磁力能够适应振动激励的动态变化。

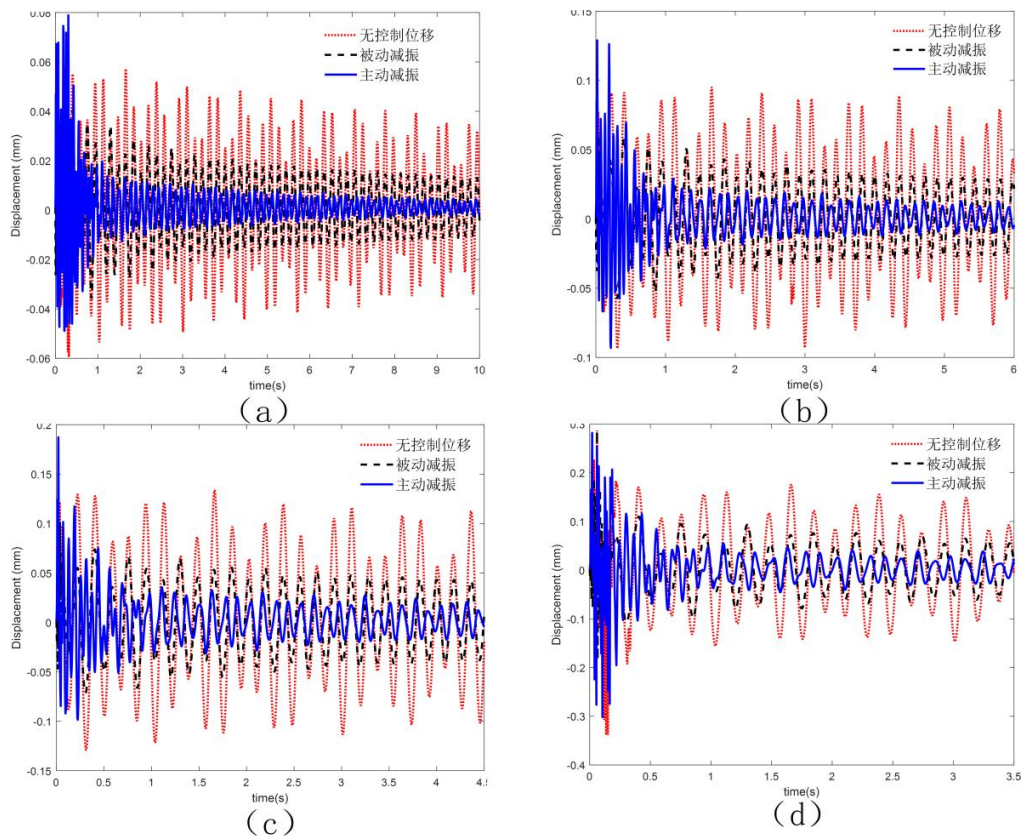


图 4-13 电磁驱动柔顺减振装置虚拟样机联合仿真实验结果：

(a) $v=0.3$, (b) $v=0.5$, (c) $v=0.7$, (d) $v=0.9$

4.3 本章小结

本章设计了弹性薄壁件机器人搬运系统的振动控制策略，通过弹性薄壁件位移反馈控制电磁驱动柔顺减振装置的电磁力实现振动主动控制；搭建了弹性薄壁件机器人搬运系统的控制系统和联合仿真平台，验证了主被动振动控制效果。结果表明，设计的振动控制策略能够实现全频段的振动控制，有效弥补中低频激励下减振装置被动隔振模式存在的不足。

第 5 章 弹性薄壁件机器人搬运系统实验研究

根据上文仿真结果可知，电磁驱动柔顺减振装置可以有效隔离来自机器人末端的振动，通过位移采集反馈控制电流能够进一步减小机器人在搬运薄壁件时产生的振动，减振效果较好。本章研制电磁驱动柔顺减振装置样机，搭建弹性薄壁件机器人搬运平台，开展弹性薄壁件机器人搬运实验测试，验证振动控制效果。

5.1 实验样机及平台搭建

5.1.1 样机研制

根据前文所创建的模型，通过 3D 打印技术采用白色树脂打造，连接杆采用铝合金打造，电磁线圈采用 0.5mm 漆包线，漆包线与可编程电源相连接，通过上位机程序控制电流，永磁铁选用钕铁硼磁铁。电磁驱动柔顺减振装置结构参数如上文所示，样机如图 5-1 所示。

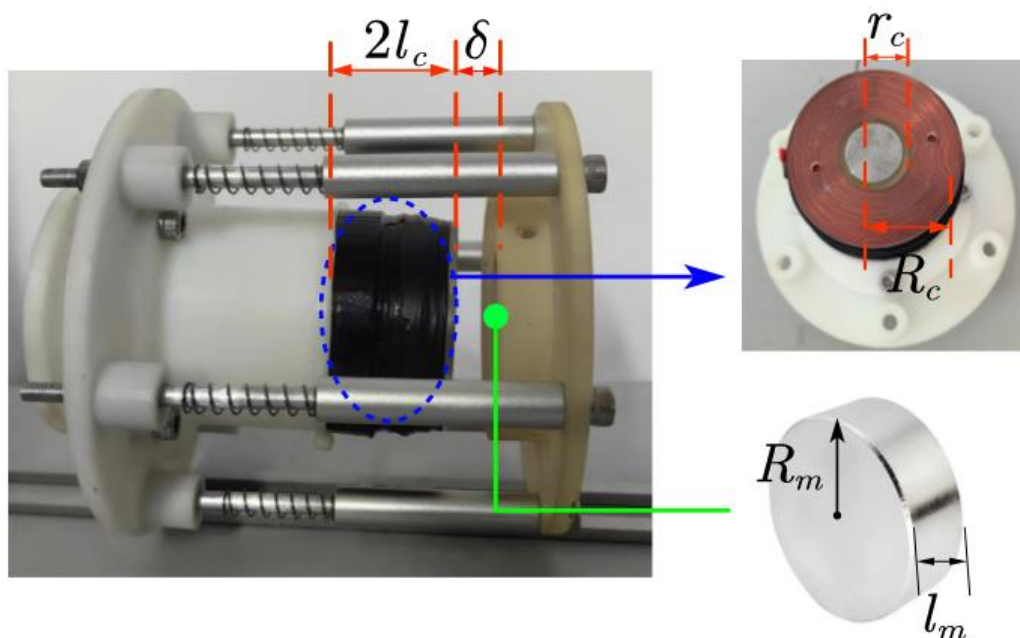


图 5-1 电磁柔顺减振装置样机

5.1.2 实验平台搭建

前面通过理论分析和虚拟样机仿真实验对本文设计的电磁驱动主被动柔顺

吸盘的减振效果进行了验证。本节搭建弹性薄板机器人搬运实验系统，通过实验测试，进一步验证主被动柔电磁驱动顺减振装置的减振效果。

实验系统主要由机械臂、电磁驱动柔顺减振装置、弹性薄壁件、激光位移传感器、动力源气泵等组成。电磁驱动柔顺吸盘上端由减振法兰安装到机械臂上，下端吸附弹性薄板。可以看出本文设计的电磁驱动柔顺减振装置能够很好的与机器人集成，说明设计方案是可行的。实验中设置给机器人设置相同搬运轨迹进行对比验证，利用激光位移传感器测量板的相对位移，利用数据采集卡在 Labview 中进行数据处理，并设计控制系统。通过优化数据采集过程，提高数据的准确性和实时性，为控制系统的设计和实现提供可靠的数据支持。将采集的数据反馈输入到可编程直流电源中，通过实时输出不同的电流调控电磁力实现主动振动抑制。通过搭建实验监测平台，实时观测弹性薄板的振动位移变化和主被动柔顺吸盘的电流变化，如图 5-2 所示。

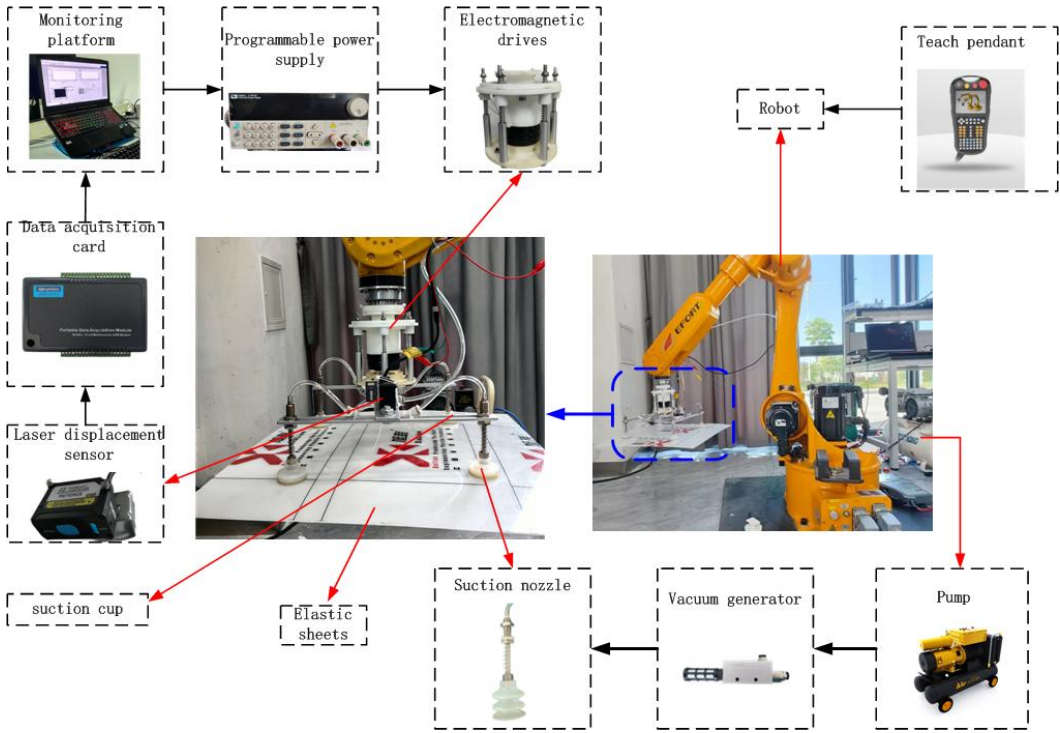


图 5-2 弹性薄板机器人搬运实验系统

5.1.3 硬件设备选型

（1）空气压缩机和真空发生器

如图 5-3 所示，空气压缩机和真空发生器。空气压缩机能产生的最大压力为 0.9 Mpa。真空发生器是一种能够产生负压的关键部件，其工作原理基于利用

喷管高速喷射压缩空气形成射流并产生卷吸流动，进而导致吸附腔内的压力降低至大气压以下，从而形成一定的真空度。选用的是正泰 CV-10 真空发生器，真空流量 110L/min，最大真空压力 92kpa。



图 5-3 空气压缩机和真空发生器

(2) 激光位移传感器

如图 5-4 所示，为位移传感器，选用的是基恩士的 IL-S065 激光位移传感器，光源为红色半导体激光，测量距离为 70-100mm，最小采样周期为 2ms，采样精度高，并且可以通过数据采集卡将数据传输到上位机程序中，通过更改采集数据方式，采集到所需要的数据。



图 5-4 激光位移传感器

(3) 激光位移传感器电源及放大器

如图 5-5 所示，激光位移传感器电源及放大器外接 24VDC，将电压转换成传感器所适配的电流，在每次采集前，可以按 zero 键位将采集数据归零，便于后续数据处理。



图 5-5 激光传感器放大器

(4) 数据采集卡

数据采集卡使用的是研华 USB-4704 型号，可以与 PC 机进行通讯，采样速率最高 48KHz。如图 5-6 数据采集卡。



图 5-6 数据采集卡

(5) 可编程直流电源

电源为 IT6833A 可编程直流电源，其实物图如图 5-7 所示。有通讯接口可与 PC 机进行通信，最高可以输出 72V 的电压和 3A 直流电流。



图 5-7 艾德克斯 IT6833A 可编程直流电源

5.1.4 上位机程序设计

本文所用上位机软件为美国 NI 公司研发的 Labview 上位机软件，通过数据采集卡采集数据并将处理后的数据输入到可编程直流电源，实现数据的交互处理，从而起到主动调控的作用。

图 5-8 为弹性薄壁件机器人搬运系统数据采集控制平台，主要由弹性薄壁件振动波形图、电流输出波形图和电压输出波形图组成，同时还可以进行实时参数调控及系统控制。

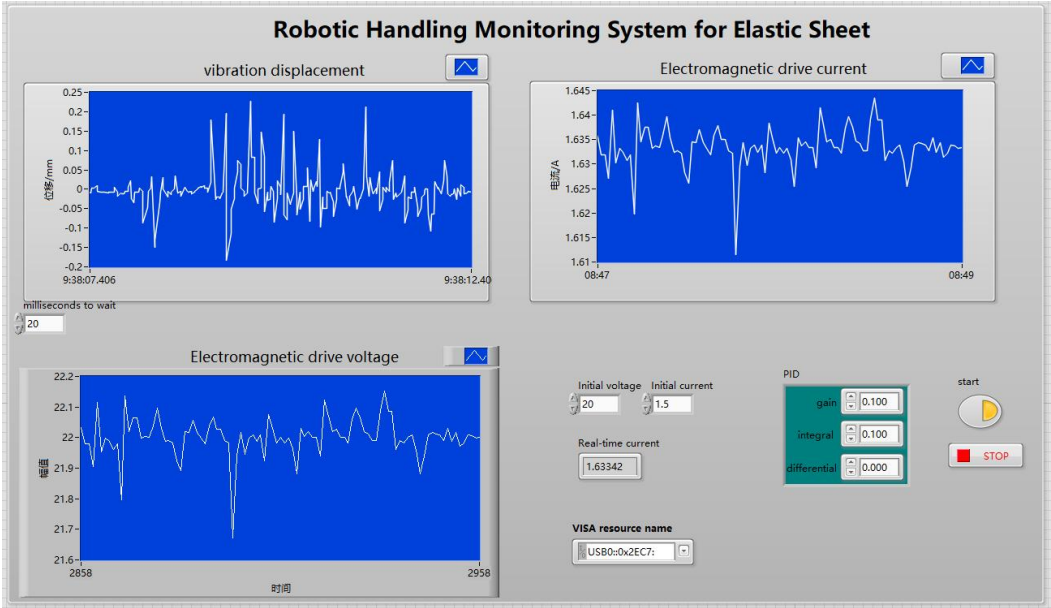


图 5-8 弹性薄壁件机器人搬运系统控制采集平台

5.2 实验测试及结果分析

5.2.1 实验方案设计

在薄壁件搬运系统中，为验证电磁驱动柔顺减振装置的减振效果及减振策略的有效性，先进行机器人竖直搬运振动控制实验验证机器人不同运行速度的对比效果，然后在进行多次对比搬运实验。位移测量点选在薄板的中心点，在吸盘的中心位置安装激光位移传感器，通过数据采集卡采集到上位机程序中，并进行后续处理。具体流程如下：

(1) 机器人竖直搬运振动控制实验

将机器人调整到相应的位姿，未加减振装置，放置薄壁件，在接通气源的情况下，吸盘通过真空发生器产生负压并吸附薄壁件，通过示教编程设置机器

人末端上下小幅度移动的工况，如图 5-9 所示，施加的机器人最大运行速度的 30%，60%，90%，通过激光位移传感器测量薄壁件的振动位移并记录数据；然后安装电磁驱动柔顺减振装置，放置薄壁件进行吸附，分别在施加主动力和不施加主动力的情况下，进行上述试验步骤，对比验证实验效果。



图 5-9 机器人竖直搬运弹性薄板振动控制实验运动示意图

(2) 机器人转运振动控制实验

首先将机器人调整到相应的位姿，未加减振装置，放置薄壁件，控制机器人至相应的搬运点，吸盘下降，在接通气源的情况下，吸盘通过真空发生器产生负压并吸附薄壁件，然后按照机器人最大运行速度的 30%，60%，90%进行搬运后，将薄板放置在指定位置。由于吸盘上装有激光位移传感器，在搬运的过程中会产生的信号会通过数据采集卡传输至主机中，同时将弹性薄壁件的振动位移通过数据采集卡传输至主机控制系统，记录数据；然后安装电磁驱动柔顺减振装置，放置薄壁件，控制机器人至相应的搬运点，接通气源，吸盘吸附薄壁件，在上位机程序中，给薄板期望位移。然后按照按照机器人最大运行速度的 30%，60%，90%进行搬运后，将薄壁件放置在指定位置。通过激光位移传感器测量薄壁件的振动位移并记录数据；然后安装电磁驱动柔顺减振装置，放置薄壁件进行吸附，分别在施加主动力和不施加主动力的情况下，进行上述试验步骤，对比验证实验效果。



图 5-10 机器人转运弹性薄板振动控制实验运动示意图

5.2.2 实验结果分析

(1) 机器人竖直搬运弹性薄板振动控制实验结果

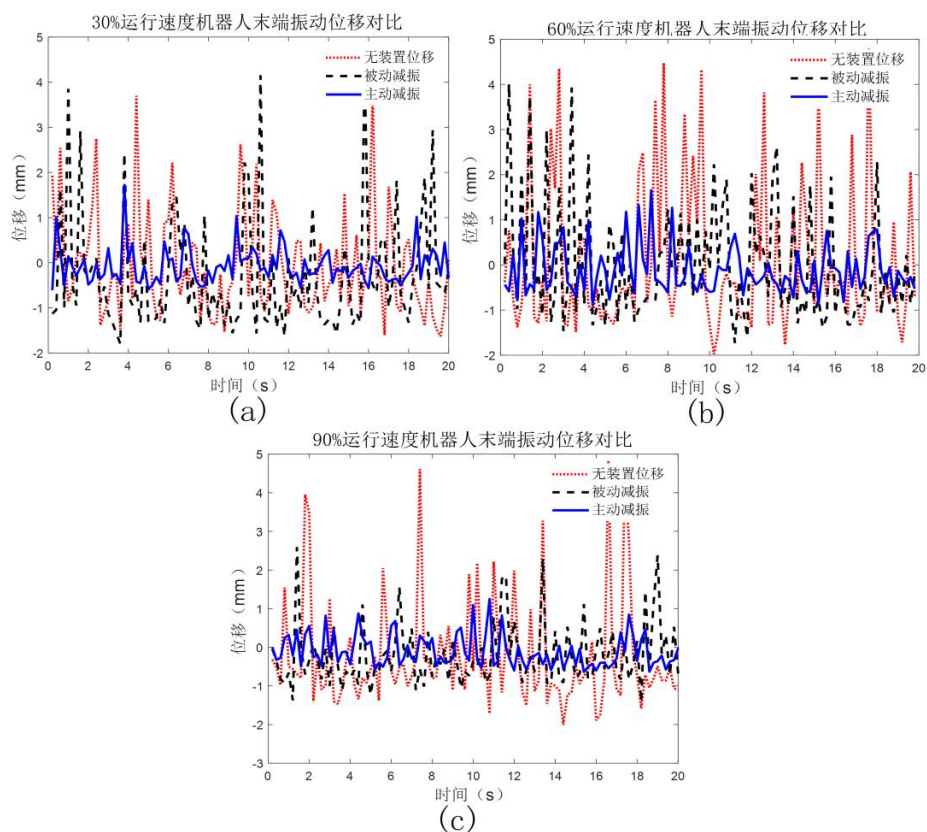


图 5-11 机器人竖直搬运弹性薄板振动控制实验结果:

(a) $v=0.3$;(b) $v=0.6$;(c) $v=0.9$

在机器人竖直搬运振动控制实验中，通过对比振动位移可以看出，机器人末端在机器人最大运行速度的 30%，60%，90%的情况下进行上下短幅度振动，装置的主被动减振功能都起到了良好的减振效果，尤其是主动减振情况下，整体振动抑制率较高。

(2) 机器人转运弹性薄板振动控制实验

在机器人转运振动控制实验中，对弹性薄板在搬运过程中产生的振动位移信号进行数据采集，并对比不同移速下有无电磁驱动减振装置时弹性薄板的振动位移，如图 5-12 所示。可以看出，电磁驱动柔顺减振装置能够有效抑制机器人不同转运速度下弹性薄板的振动，与前文仿真结果相对应。

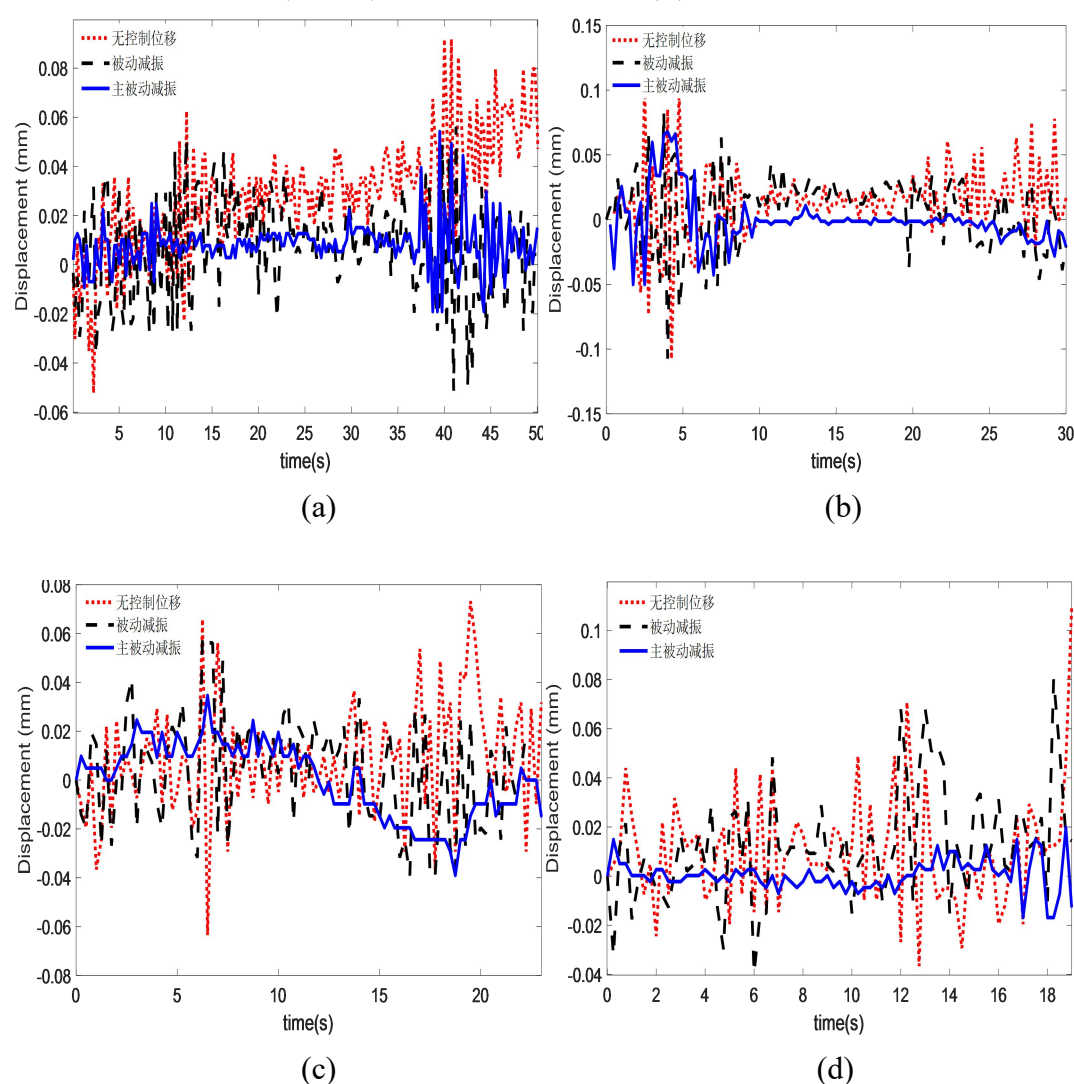


图 5-12 机器人转运弹性薄板振动控制实验结果：

(a) $v=0.3$;(b) $v=0.5$;(c) $v=0.7$;(d) $v=0.9$

5.3 本章小结

本章研制了电磁驱动柔顺减振装置的实验样机，完成了硬件设备的选型，搭建了弹性薄壁件机器人搬运实验系统平台，开展了机器人竖直搬运振动控制实验和机器人转运振动控制实验测试。实验结果表明，设计的电磁驱动柔顺减振装置具有较好的减振性能，能够有效抑制弹性薄壁件搬运过程中的振动，验证了理论分析和控制策略的有效性。

第 6 章 结论与展望

6.1 结论

本文针对弹性薄壁件机器人搬运系统的振动问题，开展了弹性薄壁件机器人搬运系统柔顺减振装置设计及振动控制研究，主要研究结论如下：

（1）建立了弹性薄壁件机器人搬运系统的等效动力学模型，分析了不同位姿对机器人末端刚度特性的影响以及机器人和弹性薄壁件之间的振动关系，结果表明，薄壁件在搬运过程中的振动来源主要由机器人末端产生，通过隔离机器人末端的扰动，能够起到薄壁件振动抑制的效果。

（2）设计了一种新型的电磁驱动柔顺减振装置，建立了电磁驱动柔顺减振装置的机电耦合动力学方程，分析了电磁驱动柔顺减振装置的电磁力驱动特性和减振特性，结果表明，电磁驱动柔顺减振装置被动减振模式下对高频激励具有一定的隔振效果。

（3）设计了弹性薄壁件机器人搬运系统振动的控制策略，搭建了控制系统联合仿真平台，开展了弹性薄壁件机器人搬运振动主动控制分析，结果表明，振动主动控制策略能够弥补被动减振模式中低频激励下电磁驱动柔顺减振装置存在的不足，实现低频到高频全频段的振动控制。

（4）研制了电磁驱动柔顺减振装置实验样机，搭建了弹性薄壁件机器人搬运实验系统平台，开展了弹性薄壁件机器人搬运实验验证，结果表明，设计的电磁驱动柔顺减振装置能够用于弹性薄壁件机器人搬运系统，能够有效降低在搬运过程中弹性薄壁件的弹性振动，验证了理论分析和控制策略的有效性。

6.2 展望

本文采用理论分析和实验手段开展了弹性薄壁件机器人搬运系统柔顺减振装置设计及振动控制研究，在本文研究的基础上，后续可继续开展以下研究工作：

（1）本文通过建立机器人和弹性薄壁件的等效动力学模型，构建弹性薄壁件机器人搬运系统的动力学模型分析系统的振动特性，然而弹性薄壁件机器人搬运系统是典型的动力学耦合系统，后续可以采用动力学机理模型与数据相结合的方法建立整体系统的动力学模型，从而更加精确的分析系统的振动耦合特性。

（2）本文采用电磁驱动方式设计了弹性薄壁件机器人搬运系统柔顺减振装置，如何提高系统的承载能力和集成化设计是值得深入研究的内容，同时，本文设计的振动控制策略主要采用常规工况进行验证，后续可以针对动态复杂工况，通过融合智能算法提高振动控制的动态自适应效果。

致谢

时间飞速的流逝，三年来，可谓是有喜有乐，在青春年华里，在漫长曲折的科研道路上，来自老师的谆谆教导和实验室的美好时光还历历在目。

遇到良师是读研路上的一大幸事，感谢我的导师刘玉飞老师，三年来，亦师亦友的关系让我在如沐春风的同时也感受到了科研的严谨规划，在生活上对我们无微不至的照顾，从课题方向，到论文架构，再到大论文的撰写以及人生的规划，都提供了悉心的指导，每一次的学术讨论，刘老师总能够一针见血的指出问题的根源所在，然后再去商讨解决，每次都令我受益匪浅。刘老师严谨的学术作风，以身作则的工作态度和平易近人的相处方式深深地烙在了我的心里。在此，谨向刘老师致以最衷心的感谢和最崇高的敬意。

感谢课题组鞠锦勇老师在研究生工作和学习上给予的关心和帮助，鞠老师强大的科研能力让我少走了许多弯路，在此由衷的祝愿鞠老师工作顺利。

同窗数载，千金易得，知己难寻。感谢师兄聂洋、汤东在科研道路上的引导和在课题上有求必应的帮助；感谢同门吴朗、严志川和纪旭阳在实验室一起刻苦学习，驰骋沙场，勇夺第一，认真科研，共同进步；感谢师妹包琪、金文丽、朱祖浩、邵传好与我和衷共济，与你们共同努力，共同进步，让枯燥的科研生活充满了干劲。

感谢我的父母和家人，是你们一直在我身后支持我，鼓励我，理解我，包容我，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。

最后，感谢在百忙之中抽出时间参与论文评审和答辩的专家，谢谢您给我宝贵的意见使我的论文更加完善和严谨。

参考文献

- [1] 汪冰.工业机器人在汽车生产制造中的应用与挑战分析[J].内燃机与配件,2024(10):64-66.DOI:10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2024.10.009.
- [2] 《中国制造 2025》规划系列解读之推动机器人发展[J]. 科技导报, 2015, 33(21): 76-78.
- [3] 张兴金, 邓忠林. 浅谈纤维复合材料与中国大飞机[J]. 纤维复合材料, 2009, 26(2): 24-26.
- [4] Wang F J, Zhao M, Fu R, et al. Novel chip-breaking structure of step drill for drilling damage reduction on CFRP/Al stack[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021(291): 117033.
- [5] Guo W J, Zhu Y G, He X. A Robotic Grinding Motion Planning Methodology for a Novel Automatic Seam Bead Grinding Robot Manipulator[J]. IEEE Access, 2020(99): 1-1.
- [6] Ahmed K, Du T T, Zhang Y J. A practical approach for automated polishing system of free-form surface path generation based on industrial arm robot[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017.
- [7] Kim S H, Nam E, Ha T I, et al. Robotic Machining: A Review of Recent Progress[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2019.
- [8] Garriz C, Domingo R. Development of Trajectories Through the Kalman Algorithm and Application to an Industrial Robot in the Automotive Industry[J]. IEEE Access, 2019: 1-1.
- [9] Huynh H N, Assadi H, Riviere-Lorphevre E, et al. Modelling the dynamics of industrial robots for milling operations[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2020(61): 101852.1-101852.16.
- [10] Sanchez, Jose, Corrales, et al. Robotic manipulation and sensing of deformable objects in domestic and industrial applications: a survey[J]. International Journal

of Robotics Research, 2018.

- [11]Zhang H, Wang Y, Zheng J, et al. Path Planning of Industrial Robot Based on Improved RRT Algorithm in Complex Environments[J]. IEEE Access, 2018(99): 1-1.
- [12]Zhang Y, Zhu W, Rosendo A. QR code-based self-calibration for a fault-tolerant industrial robot arm[J]. IEEE Access, 2019(99): 1-1.
- [13]Zhang Z H, Guo F Y, Tang Q, et al. Handling robot non-fixed high-velocity handling method [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023(1): 2492.
- [14]Wu X M, Chi J, Jin X Z, Deng C. Reinforcement learning approach to the control of heavy material handling manipulators for agricultural robots[J]. Computers and Electrical Engineering, 2022(104): 108433.
- [15]Yang J, Yu Y F, Zhang H Y,et al. Research on application of compliant control of smart meter box handling robot[J]. Energy Reports, 2023(9): 1494-1501.
- [16]Oskars V, Janis A, Karlis F, et al. Robotic System for Post Office Package Handling[J]. Applied Sciences, 2023(13).
- [17]柳旭, 基板玻璃搬运机器人末端执行器的设计及其轨迹规划仿真[D].中北大学,2015.
- [18]李程伟.气浮传输系统中玻璃基板变形研究[D].合肥工业大学,2018.
- [19]Cho P J , Kim D I , Kim H G. Real-time Static Deflection Compensation of an LCD Glass-Handling Robot[J]. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 2007, 17(4-5): 191-198.
- [20]Jong, Hwi, Seo, et al. Dynamic load analysis and design methodology of LCD transfer robot[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2008.
- [21]Wu Y, Zhou D T, Cheng H L, et al. A New Configuration Method for Glass Substrate Transfer Robot Modules Based on Kansei Engineering[J]. Applied Sciences, 2022(12): 10091-10091, .
- [22]Cho Y E, Kim J, Rhim S. Modeling of large scale solar cell handling robot with belt-driven flexible arms[J]. Theoretical & Applied Mechanics Letters, 2013, 3(01): 77-80.
- [23]李春光, 张宁, 徐宜璠等. 基于视觉导航的小型搬运机器人控制系统设计[J].湖南城市学院学报(自然科学版), 2018, 27(3): 54-58.
- [24]Bock T, Herbst J, Balaguer C,et al. Design of a Gripping System for the Automated Assembly of Large Building Modules[C], 17th International

Symposium on Automation and Robotics in Construction. 2000.

- [25] Yu H, Choi IS, Han KL, et al. Development of a Stand-alone Powered Exoskeleton Robot Suit in Steel Manufacturing[J]. ISIJ International, 2015(55) : 2609-2617.
- [26] My C A, Le C H, Packianather M, et al. Novel robot arm design and implementation for hot forging press automation[J]. International Journal of Production Research, 2016(57): 4579-4593.
- [27] Yu H W, Sun Q, Wang C, et al. Frequency response analysis of heavy-load palletizing robot considering elastic deformation[J]. Science Progress, 2019, 103(1).
- [28] You W, Kong M, Sun L, et al. Control system design for heavy duty industrial robot[J]. Industrial Robot, 2012(39): 365-380.
- [29] Sakai S, Osuka K, Maekawa T, et al. Robust Control Systems of a Heavy Material Handling Agricultural Robot: A Case Study for Initial Cost Problem[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(6): 1038-1048.
- [30] Wu X M, Chi J, Jin X Z, et al. Reinforcement learning approach to the control of heavy material handling manipulators for agricultural robots[J]. Computers and Electrical Engineering, 2022(104), 108433.
- [31] Zhao Y, Zhang Y, Wang S. A Review of Mobile Robot Path Planning Based on Deep Reinforcement Learning Algorithm[C]. Journal of Physics Conference Series, 2021.
- [32] Meng H, Zhang H. Mobile Robot Path Planning Method Based on Deep Reinforcement Learning Algorithm[J]. Journal of circuits, systems and computers, 2022.
- [33] Yang Y, Juntao L, Lingling P. Multi-robot path planning based on a deep reinforcement learning DQN algorithm[J]. CAAI Transactions on Intelligence Technology, 2020, 5(3).
- [34] Glorieux, Emile, Franciosa, et al. Quality and productivity driven trajectory optimisation for robotic handling of compliant sheet metal parts in multi-press stamping lines[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019(56): 264-275.
- [35] Gürel, Sinan, Gultekin H, et al. Energy conscious scheduling of a material handling robot in a manufacturing cell[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019(58): 97-108.
- [36] Guo S C, Fan S S. An Energy Consumption Optimization Method for Intelligent

-
- Transfer Robots in a Low-temperature Environment[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023(1): 2562.
- [37]Zhao Y. Dynamic Path Planning Analysis of Warehouse Handling Robot[J]. Journal of Sensors, 2022.
- [38]Kim J, Croft E A. Preshaping input trajectories of industrial robots for vibration suppression[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, (54): 35-44.
- [39]Thomsen D K, Se-Knudsen R, Balling O, et al. Vibration control of industrial robot arms by multi-mode time-varying input shaping[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021(155): 104072.
- [40]Liu C, Chen Y. Combined S-curve feedrate profiling and input shaping for glass substrate transfer robot vibration suppression[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2018.
- [41]Shan X, Li Y, Liu H, et al. Residual Vibration Reduction of High-Speed Pick-and-Place Parallel Robot Using Input Shaping[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35(1):1-8.
- [42]Glorieux E, Franciosa P , Ceglarek D. End-effector design optimisation and multi-robot motion planning for handling compliant parts[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2017, 57(3): 1-14.
- [43]Anastasia Koivikko, Dirk-Michael Drotlef, Metin Sitti,et al. Magnetically switchable soft suction grippers[J]. Extreme Mechanics Letters, 2021(44): 101263.
- [44]Shao G, Ware H, Huang J, et al. 3D printed magnetically-actuating micro-gripper operates in air and water[J]. Additive Manufacturing, 2021, 38(2): 101834.
- [45]Yan J L, Ying J W. Design of Sorting and Handling Robot Based on the Vision Recognition System[J]. Mechanical Research & Application, 2019.
- [46]Xiang W L, Pianhui W U, Ruipeng W .Design and Manufacture of A Small Sorting and Conveying Robot System Based on Machine Visual Recognition[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015.
- [47]Sethi, Suresh P, Sidney, et al. Scheduling in Dual Gripper Robotic Cells for Productivity Gains[J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 2001.
- [48]Hosek M, Wilkas S, Lipcon J. Material-handling robot with multiple end-effectors: US201815897374[P]. US10580682B2.
- [49]Chu H K, Mills J K, Cleghorn W L. Automated dual-arm micromanipulation with

-
- path planning for micro-object handling[J]. *Robotics & Autonomous Systems*, 2015(74): 166-174.
- [50] Gürel S, Gultekin H, Emiroglu N. Scheduling a dual gripper material handling robot with energy considerations[J]. *Journal of Manufacturing Systems*. 2023(67): 265-280.
- [51] H, Neil, Geismar, et al. Throughput Optimization in Constant Travel-Time Dual Gripper Robotic Cells with Parallel Machines[J]. *Production & Operations Management*, 2009.
- [52] Drobouchevitch I G , Sethi S P, Sriskandarajah C. Scheduling dual gripper robotic cell: One-unit cycles[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 171(2): 598-631.
- [53] 苗登雨, 周新, 张志伟等. 真空吸盘式多功能抓取装置的设计[J]. *包装与食品机械*, 2016, 34(6): 39-42.
- [54] 管声启, 张理博, 刘通等. 基于改进粒子群算法的机械手抓取力自整定模糊PID控制[J/OL]. *西安工程大学学报*, 2024(3): 1-8.
- [55] 李坚. 机器人抛磨力控制及表面质量检测研究[D]. 广东工业大学, 2023.
- [56] 张国龙, 张杰, 蒋亚南等. 机器人力控末端执行器综述[J]. *工程设计学报*, 2018, 25(6): 617-629.
- [57] 余觉. 电磁变刚度的机器人-环境交互柔顺控制方法研究[D]. 上海交通大学, 2020.
- [58] 赵亚平, 杨桂林, 杨巍等. 气电混合式机器人力控末端执行器研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2016(12): 103-106.
- [59] 景包睿. 二自由度机械臂建模与控制研究[D]. 昆明理工大学, 2018.
- [60] 刘文洲. 6R工业机器人刚度建模及其应用研究[D]. 兰州理工大学, 2014.
- [61] 袁阳林. 舰船浮筏隔振系统的主动控制研究[D]. 大连理工大学, 2022.
- [62] 聂洋. 弹性构件机器人钻削系统振动特性及控制策略研究[D]. 安徽工程大学, 2024.
- [63] Alexander C K. *Fundamentals of electric circuits*, 3rd ed.; McGraw-Hill: 2 Penn Plaza New York, America, 2013, 37-40.
- [64] 左林昌, 尹志宏. 三自由度弹簧质量系统的建模及性能分析[J]. *新技术新工艺*, 2015(10): 24-27.

攻读学位期间发表的学术论文目录

- [1] 实用新型：一种具有减振功能的机器人搬运装置，CN2024201884780，排名第 2（导师第 1）。
- [2] 一种电磁驱动的机器人柔顺搬运装置及其使用方法，CN2024101384233，排名第 3。
- [3] Experimental platform design of robotic flexible handling system with vibration suppression[C].2024 5th International Conference on Mechatronics Technology and Intelligent Manufacturing (ICMTIM 2024), EI 检索，排名第 2（导师第 1）。

尚德敏学 唯实惟新