

一种机器人铣削颤振抑制用磁流变弹性体吸振器的设计与试验研究

刘 鹏¹, 李 波¹, 赵 威¹, 崔光裕², 田 威¹, 廖文和¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109)

摘要: 为了解决工业机器人铣削加工过程中的低频颤振问题, 设计了一种用于抑制振动的磁流变弹性体(magnetorheological elastomer, MRE)吸振器。利用 MRE 特有的流变特性, 研究了不同质量配比的 MRE 磁流变效应, 通过理论计算和数值仿真确定了吸振器内部的线圈匝数及所通电流大小。通过模态仿真和振动台扫频激励试验发现, 设计的 MRE 吸振器具有 17.35~45.21 Hz 范围内的移频特性。建立了吸振器固有频率-电流映射关系, 在 KUKA KR500 机器人铣削加工过程中进行了试验验证。结果表明, 在低转速加工条件下机器人容易在其低阶固有频率处发生颤振, 通过 MRE 吸振器实现了颤振抑制。相对于不加吸振器的工况, 通电调频后机器人主轴 X 方向上的振动加速度峰峰值降低了 70.7%, 均方根值降低了 64.7%; Y 方向峰峰值降低了 54.7%, 均方根值降低了 49.9%。此外, 铣削工件的表面加工质量也有明显改善。

关键词: 工业机器人; MRE 吸振器; 机器人铣削加工; 颤振抑制

中图分类号: TP242.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.202308003

Design and experimental study of a magnetorheological elastomer vibration absorber for chatter suppression in robotic milling

LIU Peng¹, LI Bo¹, ZHAO Wei¹, CUI Guangyu², TIAN Wei¹, LIAO Wenhe¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China)

Abstract: A magnetorheological elastomer (MRE) vibration absorber is designed to suppress the vibration of industrial robotic milling in order to solve the low frequency chatter problem. The magnetorheological effect of MRE with different mass ratio is studied by using the unique rheological characteristics of MRE. The number of turns of coil and the current in the absorber are determined by theoretical calculation and numerical simulation. It is found that the designed MRE absorber has frequency shift characteristics in the range of 17.35~45.21 Hz through modal simulation and shaking table sweeping excitation experiment. The mapping relationship between natural frequency of absorber and current is established, which is verified by experiments in the milling process of KUKA KR500 robot. The results show that the robot is prone to chatter at its low order natural frequency under low rotational speed machining conditions, and the chatter suppression of the robot is realized by MRE absorber. Compared with the condition without vibration absorber, the peak-to-peak value of the vibration acceleration in the X direction of the robot spindle is reduced by 70.7%, and the root-mean-square value is reduced by 64.7% after being electrified. The peak-to-peak value in the Y direction is decreased by 54.7%, and the root-mean-square value is decreased by 49.9%. In addition, the machining surface quality of workpieces after milling has also been significantly improved.

Keywords: industrial robot; MRE vibration absorber; robotic milling; chatter suppression

近年来,工业机器人因其柔性化程度高、工作范围广、易于实现自动化与智能化加工,且较机床有更好的加工适应性,越来越多地被应用于汽车、船舶、航空航天等高端制造领域^[1-3]。然而,在机器人机械

加工过程中,由于本身结构的弱刚性导致的颤振以及不平滑的加工轨迹引发的振动会很大程度上影响工件的加工质量和加工精度^[4-6]。

为减小机器人作业过程中的振动,人们对振动

收稿日期: 2022-08-02; 修订日期: 2023-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52005254, 52075256, U22A20204); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(NT2022016)

机理不断研究,并发展出多种振动抑制方法,通常可以分为被动、主动和半主动三种。被动抑振方法主要包括通过机器人姿态优化、工艺参数优化、结构刚度强化等方式来优化加工系统的刚度和阻尼,以实现振动抑制。在姿态优化方面,国内外学者分别以静态刚度^[7-9]和加工过程中的振动响应^[10-11]为优化目标,借助冗余自由度对加工姿态进行优化,提高了加工稳定性。在工艺参数优化方面,通过建立加工动力学模型,研究加工过程中切削深度、主轴转速和进给速度对加工振动的影响机理^[12-13],通过优化工艺参数减小加工振动,提高加工质量^[14-15]。在结构刚度强化方面,通过在末端执行器中安装压力脚装置来增强末端的局部刚度^[16-18],一定程度上抑制了加工振动。虽然被动抑振方法具有结构简单、操作方便等优点,但是也存在灵活性差、控制效果有限等问题,缺少对突发环境变化的应变能力,无法主动适应机器人位姿和激励的变化。为使系统参数可动态调控,出现了主动抑制方法。研究者们通过在控制对象上安装的传感器实时感知加工过程中系统振动状态的变化,并通过致动器对系统施加抵消振动的激励,从而实现加工过程中的振动抑制。其中,采用压电驱动装置^[19-20]控制机械臂的残余振动是当前研究的热点,研究者通过数值模拟和试验测试验证了控制器的可行性,有效实现了机械臂的振动抑制。此外,控制电机对机器人加工姿态的实时调整也是实现主动振动抑制的一种方法。NGUYEN等^[21]提出了一种依赖于姿态的最优控制方法,以主动抑制机器人铣削中由周期性铣削力产生的刀尖振动,并通过偏置质量试验和铣削试验证明了控制方法的有效性。娄军强等^[22]针对伺服电动机、谐波齿轮减速器、柔性机械臂以及压电致动器组成的智能机械臂系统,提出对压电致动器采用模糊控制、对伺服电动机采用PD控制的复合控制策略,降低了机械臂的振动。虽然主动抑振方法具有极强的适应性和调节性,但由于其依赖于特定数学模型,在实际中误差不可避免,且存在能源需求量大、工艺复杂等问题,在实际工程应用中存在一定的限制。

随着新材料的不断涌现,出现了综合被动与主动抑振优点的半主动抑振方法,它可以通过改变系统刚度和阻尼来提高系统稳定性^[23-25]。磁流变弹性体(magnetorheological elastomer, MRE)是一种新型复合材料,具有刚度连续可控、响应迅速的优点^[26-27],基于MRE在半主动振动抑制领域的独特优势,MRE减振器的研究对于机械加工过程中的振动抑制有重要意义。

将MRE减振器应用于振动抑制领域,需要解

决与MRE特性密切相关的两个重要问题,一是MRE的磁流变效应,二是MRE减振器的结构和磁路设计。MRE减振器的减振性能很大程度上受MRE磁流变效应的影响,关于这方面的研究层出不穷。周陈程^[28]从原材料方面出发,制备出两种不同基体的磁流变弹性体:硅橡胶基磁流变弹性体和天然橡胶基磁流变弹性体,并对其进行动态性能测试。结果表明,硅橡胶基磁流变弹性体的磁流变效应高于天然橡胶基磁流变弹性体,能够更好地满足现代建筑对结构防风抗震的要求。针对精密加工抑振领域,龙浩天等^[29]探究了磁性颗粒的尺寸对MRE磁流变效应的影响。结果表明,在一定的粒径范围内,磁流变效应随磁性颗粒粒径的增大而增大。另外,MRE制备过程中的原料配比对磁流变效应也具有一定影响,但是目前针对该方面的研究较少。此外,MRE减振器的结构和磁路设计也会对减振性能产生较大影响。为了抑制机床镗孔过程中的刀具振动,提高切削性能,LAWRANCE等^[30]设计并开发了一种MRE减振装置,并考虑了活塞位置、电流强度和线圈缠绕方向等参数,分别开展了有/无MRE减振装置的刀架切削对比试验。结果表明,将MRE安装在刀架上时,可抑制86.6%的振动。为了提高工件抛光质量,XU等^[31]提出了一种基于磁流变弹性体抛光复合材料(MREPCs)的新型智能材料研磨工具及其柔性抛光方法。通过抛光试验验证了MREPCs的抛光性能,结果表明,所开发的MREPCs可以有效减小加工振幅,显著降低工件表面粗糙度。目前MRE在机床上已经实现了较好的减振效果,但是在机器人铣削加工振动抑制方面的研究较少。文献[32]针对ABB IRB6660机器人设计并研制了一种用于抑制颤振的MRE吸收器,在机器人铣削中具有良好的颤振抑制效果。但是,文献[32]并未考虑MRE吸收器内部的磁路设计分析,无法保证MRE充分发挥磁流变效应,致使吸振器的移频带宽仅有13 Hz,难以适应机器人铣削加工过程中振动频率复杂多变的工况。另外,文献[32]所设计的MRE吸振器是一种非对称结构,其偏置质量可能会对机器人加工稳定性产生一定影响。

受文献[32]的启发,本文设计了一种用于抑制KUKA KR500机器人铣削加工颤振的MRE吸振器,并开展了相关试验研究。本文研究的创新点在于:(1)所设计的吸振器结构为圆环型,其对称特点可以确保吸振器自身对机器人主轴无偏置影响;(2)对吸振器内部进行磁路分析和设计,保证吸振器内部MRE最先达到磁饱和,比文献[32]中MRE吸振器所实现的13 Hz的工作带宽更高,达到了27.86 Hz。

1 MRE 的制备与测试

1.1 MRE 制备

MRE 作为一种新兴的智能材料,目前还没有统一的制备方法,而使用不同工艺制成的 MRE 在磁流变效应上的差距很大,按其固化方式可简单分为有场制备与无场制备,与无场制备下的 MRE 相比,有场制备下得到的各向异性 MRE 一般具有更高的磁致模量变化和磁流变效应^[33]。本文采用各向异性硅橡胶基 MRE,制备流程如图 1 所示。具体流程如下:首先将羰基铁粉与二甲基硅油充分混合,按比例加入硅橡胶后再次搅拌均匀,将盛有混合物的容器放入真空干燥箱中抽除内部气泡,然后将混合物倒入模具后放在强磁场环境下预结构化处理,待内部铁磁性颗粒完成链状排列再放置于无磁场环境下固化一段时间即可得到各向异性 MRE。

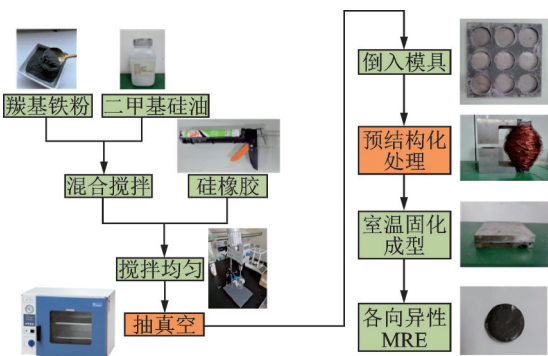


图 1 各向异性 MRE 制备流程图

Fig. 1 Flow chart of preparation for anisotropic MRE

在 MRE 制备过程中原料组成及比例、工艺模式以及其参数的选取对其性能均起着决定性作用。本文主要研究制备原料的不同质量对比对 MRE 的力学性能影响。本文选用内部铁颗粒含量 $\geq 96.8\%$ 、平均粒径为 $3.016 \mu\text{m}$ 的德国巴斯夫公司 EW 型羰基铁粉,该型号具有磁导率大、饱和磁感应强度高和剩磁小的优点^[34]。另外选用 704 室温固化硅橡胶作为基体,道康宁 500 CS 二甲基硅油作为添加剂^[35]。在预结构化处理过程中,始终保证 MRE 处于磁感应强度大小为 1 T、方向垂直于 MRE 圆形截面的磁场环境中^[34, 36]。固定 MRE 样品的厚度为 3 mm,分别制备不同质量配比(羰基铁粉、硅油、硅橡胶比重分别为 5:2.5:2.5, 6:2:2, 7:1.5:1.5)的三组 MRE,制备完成的样品如图 2 所示。

通过电子扫描显微镜观察制备完成的各向异性 MRE 的微观结构,如图 3 所示,可以看到其内部铁磁颗粒呈链状排列于橡胶基体中。随着外界磁场的

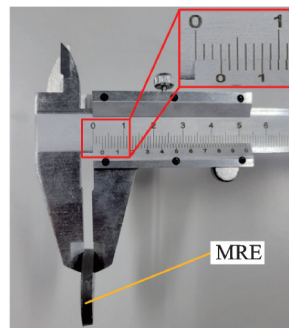


图 2 MRE 样品

Fig. 2 Sample of MRE

增加,颗粒之间的相互作用力不断增强,被包覆的基体被周边的颗粒包裹得更加紧密,受到更大力度的作用,导致模量会随颗粒相互作用力增强而增大,从而宏观表现为随着外界磁场的增加,MRE 储能模量不断增大。

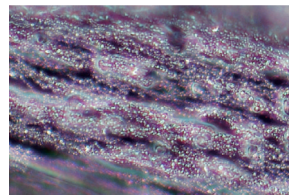


图 3 各向异性 MRE 微观结构图

Fig. 3 Microstructure diagram of anisotropic MRE

1.2 MRE 动态力学性能测试

评价 MRE 性能的重要指标是其磁控性能,因此针对 MRE 的磁控力学性能研究是一个不可忽略的问题。本文通过 MRE 储能模量随磁场的变化来表征 MRE 的磁流变效应。利用安东帕旋转流变仪 MCR 302e 对制备完成的 MRE 进行动态力学性能测试,设置外部磁感应强度变化步长为 100 mT,检测 0~1000 mT 共 11 组磁场环境下的 MRE 储能和耗能模量。图 4 为测试结果,可以看出三种配比的 MRE 储能模量和耗能模量均随磁场发生连续性变化,在 0~200 mT 弱磁场环境下模量增加幅度较小,在 200~800 mT 区间 MRE 模量增加幅度明显,而在

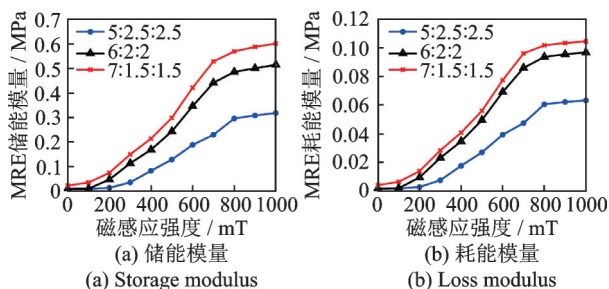


图 4 不同原料配比的 MRE 力学性能随磁场变化曲线

Fig. 4 Curves of mechanical properties of MRE with magnetic field under different raw material ratios

800 mT 之后随着磁感应强度的增加 MRE 模量增幅很小,基本趋近于饱和的状态。另外可以发现,相同磁场环境下,原料中羰基铁粉的占比越多,MRE 的储能和耗能模量则越大,当外界磁感应强度达到 1000 mT 时 MRE 的储能和耗能模量最高分别可以达到 0.6 MPa 和 0.1 MPa 左右。

由图 4(a)可以看出,MRE 磁流变效应与原料的质量配比有关,当羰基铁粉、硅油、硅橡胶的质量配比为 7:1.5:1.5 时磁流变效应最高,储能模量相对变化量可达到 2576%。如果继续增大羰基铁粉的质量占比会导致 MRE 制备过程中原料混合物过于黏稠,容易产生混合不均匀等情况。因此本文选择羰基铁粉、硅油、硅橡胶质量配比为 7:1.5:1.5 的 MRE 用于吸振器结构中。

损耗因子也是表征 MRE 流变特性的一个重要参数,它体现了 MRE 在测试过程中的阻尼特性。根据上述试验结果可以计算得到不同质量配比的 MRE 损耗因子随磁感应强度的变化情况,结果如图 5 所示。

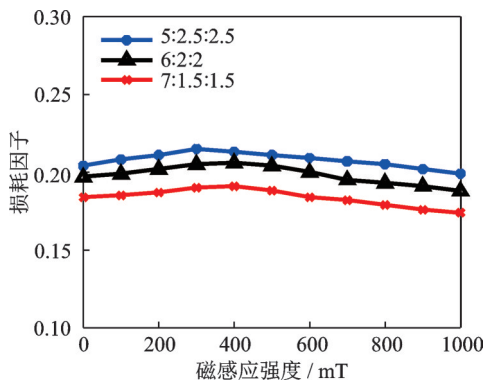


图 5 不同原料配比的 MRE 损耗因子随磁场变化曲线

Fig. 5 Curves of MRE loss factor with magnetic field under different raw material ratios

由图 5 可以看出,三种不同原料配比的 MRE 损耗因子在测试磁场范围内都呈现了先上升后下降的趋势。CHEN 等^[37]通过试验表明磁流变弹性体的阻尼特性主要来自基体与颗粒之间的相对滑移。在 0~400 mT 过程中,随着磁感应强度不断增加,颗粒受到的磁场力作用不断增强,造成颗粒与基体之间的相对滑移增大,界面摩擦增强,阻尼上升。在磁场继续增强的过程中,颗粒之间由于较强的相互作用力逐渐形成比较稳定的结构形式,阻碍了滑移与界面摩擦,从而导致损耗因子出现下降的趋势。但不同质量配比的 MRE 损耗因子在磁场作用下的最大变化量分别为 0.016、0.018、0.017,表明磁场对 MRE 损耗因子的影响有限。所以,本文将不同磁场作用下的 MRE 当作单一的变刚度元件加以控制。

2 吸振器的设计

2.1 吸振器结构设计

动力吸振器通常是一个“质量-弹簧-阻尼”系统,由振子、弹性元件和阻尼元件组成^[38]。如图 6 所示, m_1 为主系统质量, k_1 和 c_1 分别为主系统的刚度和阻尼, F 为主系统受到的激振力, x_1 为主系统的振动位移。 m_2 为吸振器振子的质量, k_2 和 c_2 分别为吸振器弹簧元件的刚度和阻尼, x_2 为吸振器振子的振动位移。

由图 6 可以看出,动力吸振器安装在主系统上,MRE 作为吸振器的弹簧元件发挥其变刚度特性,进而改变吸振器的固有频率,当吸振器固有频率与外界激振力的频率相等时,主系统的振动能量很大一部分将被吸振器所吸收,从而实现了对主系统的振动抑制,这就是 MRE 吸振器的工作原理。

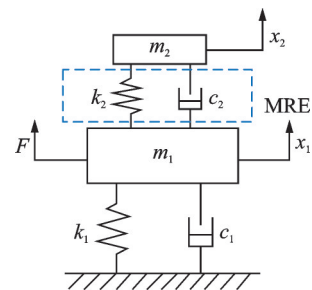


图 6 MRE 吸振器工作原理图

Fig. 6 Working principle diagram of MRE absorber

本文研究的减振对象为 KUKA KR500 机器人,由于实际加工过程中机器人振源为刀具末端的切削力,因此在机器人末端主轴处安装圆环状 MRE 吸振器,吸振器通过底座中心处预留的螺栓孔与机器人的主轴相连接,示意图如图 7 所示。

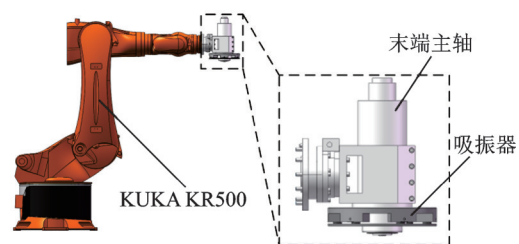


图 7 MRE 吸振器安装位置

Fig. 7 Installation position of MRE absorber

机器人铣削加工中主轴径向振动远大于轴向振动^[5],因此本文所设计的是 MRE 工作在剪切模式下的吸振器。图 8 为吸振器结构爆炸图,吸振器主要由振子、底座、线圈骨架、励磁线圈、MRE 以及圆形钢垫片组成。漆包线缠绕在骨架上,作为磁场

发生装置插入振子中的骨架安装槽,6个线圈绕好指定匝数的漆包线后均通过振子上的引线孔与外部可调电流源相连,通过调节线圈中所通的电流大小实时改变装置中 MRE 的剪切模量,进而改变整个吸振器的固有频率,使其与外界振动频率相匹配达到同频吸振的效果,以减少机器人主轴的振动能量,提升机器人铣削的加工精度和工件表面的加工质量。

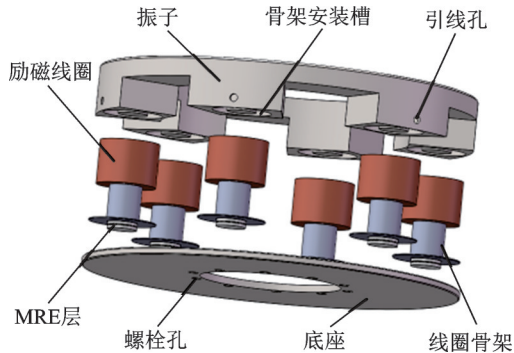


图 8 MRE 吸振器结构爆炸图

Fig. 8 Structural exploded view of MRE absorber

吸振器内部包含 6 组用于剪切工作模式的 MRE, 每组 MRE 层均由直径为 30 mm 的上层 MRE、钢垫片和下层 MRE 交替排列粘合形成。这种叠层结构的使用一方面可以提高垂直方向上的承载能力;另一方面,较小的横向刚度增加了振子的冲程,这意味着叠层 MRE 吸振器可以吸收更多的能量,尤其适用于颤振等振幅较大的抑振领域。

振子在整个吸振器中起到核心作用,负责吸收机器人铣削加工时的振动能量,一般情况下振子的质量越大,越有利于提高振动吸收效率,但考虑到吸振器的简便性,将其质量控制在 20 kg 以内。缠绕有励磁线圈的环形线圈骨架与安装槽内部空间相匹配,使骨架、线圈与振子三者形成封闭结构,相邻两个励磁线圈之间磁感应线依次通过振子、上层 MRE、圆形钢垫片、下层 MRE、底座。两两相邻的铁芯之间设有深度为 30 mm 且与振子弧度相同的凹槽,一方面可以降低吸振器质量,另一方面可以优化磁路,引导磁感应线沿着现有结构方向形成闭合,有效减少磁损耗,充分利用 MRE 的可控特性,有利于进一步提高吸振器的减振频率带宽。本装置中底座、振子和钢垫片均采用具有高磁导率、高磁饱和强度及低矫顽力的 Q235 钢,环形线圈骨架采用不导磁材料聚四氟乙烯。

2.2 磁路设计

吸振器内部相邻两个线圈骨架之间的闭合磁路示意图如图 9 所示,相邻励磁线圈通入相反方向的

电流,在两个铁芯内部磁感应线从 S 极指向 N 极,在外部磁感应线通过骨架连接梁和底座从 N 极指向 S 极。通电后线圈产生的磁场在吸振器内部经由 MRE 形成闭合导磁回路,使 MRE 的刚度能够随外加电流 I 的大小变化得到有效控制。

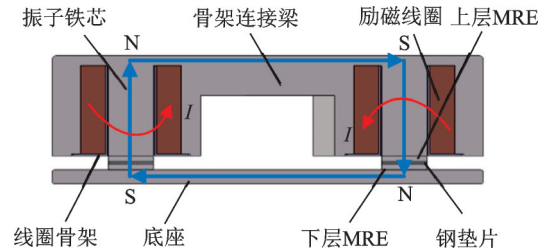


图 9 MRE 吸振器内部磁路示意图

Fig. 9 Schematic diagram of magnetic circuit inside MRE absorber

相邻两个励磁线圈之间形成的闭合磁路基本组成如表 1 所示,各部件于图 9 中已标出,本设计中忽略吸振器内部的漏磁效应。

表 1 吸振器内部磁路组成

Tab. 1 Internal magnetic circuit composition of absorber

结构部件	磁阻
振子铁芯	R_{m1}
骨架连接梁	R_{m2}
上层 MRE	R_{m3}
钢垫片	R_{m4}
下层 MRE	R_{m5}
底座	R_{m6}

在本次设计的 MRE 吸振器内部闭合磁路中磁通量 Φ 处处相等,计算磁路各部件的磁通面积和饱和磁感应强度的乘积,乘积最小者将最先达到磁饱和状态。MRE 作为一种新型智能材料,其剩磁与矫顽力非常小,可当作软磁材料;其磁化特性与原料中铁颗粒的质量占比有关,其中羰基铁粉占比 70% 的各向异性 MRE 的饱和磁感应强度在 1 T 左右^[39-40]。整个闭合磁路各区域磁饱和分析结果如表 2 所示。可以看出上下两层 MRE 的饱和磁通量最小,即 MRE 区域最先达到磁饱和状态,保证了 MRE 的剪切模量的变化范围最大。

在确保 MRE 区域最先达到磁饱和状态后,结合吸振器内部磁路走向计算满足 MRE 磁场要求的励磁线圈参数。

在一条完整的闭合磁路中磁通量 Φ 处处相等,此处用 MRE 处的磁感应强度 B_s 和有效面积 S_s 代入计算。由磁动势的计算公式可得:

$$F = NI = \Phi R_m = B_s S_s R_m \quad (1)$$

式中, N 为线圈匝数; I 为线圈所通电流大小。

由表 1 可知, 闭合磁路的总磁阻 R_m 满足:

$$R_m = \sum_{i=1}^6 R_{mi} \quad (2)$$

而各部分的磁阻计算公式为:

$$R_{mi} = \frac{l_i}{\mu_0 \mu_r S_i} \quad (3)$$

式中, l_i 为磁路的长度; S_i 为磁路穿过的横截面积; μ_0 为真空状态下的磁导率; μ_r 为材料的相对磁导率。

相关试验研究表明, 磁性颗粒是决定 MRE 相对磁导率大小的关键因素, 随磁性颗粒含量的增多, MRE 相对磁导率具有明显增大的趋势。羰基铁粉占比 70% 的各向异性 MRE 相对磁导率近似为 2.3^[34, 40-42]。而振子、底座和钢垫片采用的 Q235 钢相对磁导率 μ_r 在 3000 以上^[43], 与 MRE 材料相比, Q235 钢的磁阻可以忽略不计, 因此整条闭合磁路的总磁阻近似等于 4 片 MRE 处的磁阻, 即

$$R_m \approx R_{m3} + R_{m5} = \frac{l_3 + l_5}{\mu_0 \mu_r S_3} \quad (4)$$

由式(1)和(4)联立可以得到 MRE 处的磁感应强度 B_3 的计算公式为:

$$B_3 = \frac{\mu_0 \mu_r NI}{l_3 + l_5} \quad (5)$$

表 2 闭合磁路各区域磁饱和和分析结果

Tab. 2 Magnetic saturation analysis results for each region of closed magnetic circuit

结构部件	饱和磁感 应强度 B_s/T	磁通面积 $S/$ (10^{-6} m^2)	饱和磁 通量/ (10^{-6} Wb)	磁饱和 顺序
振子铁芯	2	707	1414	4
骨架连接梁	2	1300	2600	6
上层 MRE	1	707	707	1
钢垫片	2	707	1414	4
下层 MRE	1	707	707	1
底座	2	455	910	3

根据图 4 的测试结果, MRE 在 1000 mT 时基本达到磁饱和, 所以 MRE 处的目标磁感应强度 $B_3 = 1000 \text{ mT}$, 其中磁路长度 $l_3 = l_5 = 6 \text{ mm}$, 真空绝对磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$, MRE 的相对磁导率为 2.3, 代入式(4)中可得出 $NI \approx 4152$, 由于每条闭合磁路中包含两组励磁线圈, 所以结合骨架安装槽的实际安装空间, 设置每组励磁线圈漆包线匝数为 700, 相邻线圈通入方向相反、大小均为 3 A 的电流即可满足 MRE 处的磁感应强度需求。

应用 ANSYS Workbench 中的静磁场分析模块对上文理论计算确定的线圈参数进行吸振器电磁仿真验证。参照上文已确定的线圈参数设置仿真模型, 得到的吸振器内部线圈电流走向情况如图 10 所示, 从图 10 中可以看出相邻的励磁线圈电流方向相反, 使得吸振器内部形成完整闭合磁路。图 11 为吸振器内部的磁场分布结果图。从图 11(a)中可以看出, 线圈通入 3 A 电流时, 在吸振器内部产生了均匀分布的磁感应强度, 最大值为 988 mT 左右, 磁感应线基本分布在振子的铁芯处。图 11(b)为 MRE 处的磁场分布结果图, 可以看出上层 MRE 处可以达到 988 mT 左右的磁感应强度, 下层 MRE 最高可达 870 mT。整个吸振器结构中 MRE 处磁场最强, 且整个磁路最高磁感应强度小于 Q235 钢的饱和磁感应强度, 证实了磁路设计方法与结构尺寸的合理性。



图 10 励磁线圈电流走向

Fig. 10 Current direction of excitation coil

3 吸振器移频特性分析

3.1 吸振器模态仿真

由上文可知, 调节吸振器中线圈电流大小可以实现 MRE 处的磁感应强度 0~1000 mT 的变化范围, 磁场变化过程中 MRE 刚度的改变会使整个吸振器的固有频率发生偏移。应用 ANSYS Workbench 平台对吸振器进行模态仿真分析。仿真中, 设置边界条件为吸振器的底座螺栓孔固定约束。对比分析 MRE 剪切模量分别为零磁场状态和磁饱和状态两种工况下吸振器的前 6 阶固有频率。图 12 为 MRE 吸振器的模态仿真结果。从图 12 中可以看出, 当 MRE 剪切模量设置为零磁场模量 (0.02249 MPa) 时, 吸振器 1 阶固有频率为 16.77 Hz, 最大变形量为 9.0565 mm; 将剪切模量改为 1000 mT 磁场环境下的测试值 (0.60189 MPa) 时, 吸振器 1 阶固有频率提升至 45.78 Hz, 最大变形量为 8.6163 mm。可以看出 MRE 吸振器的移

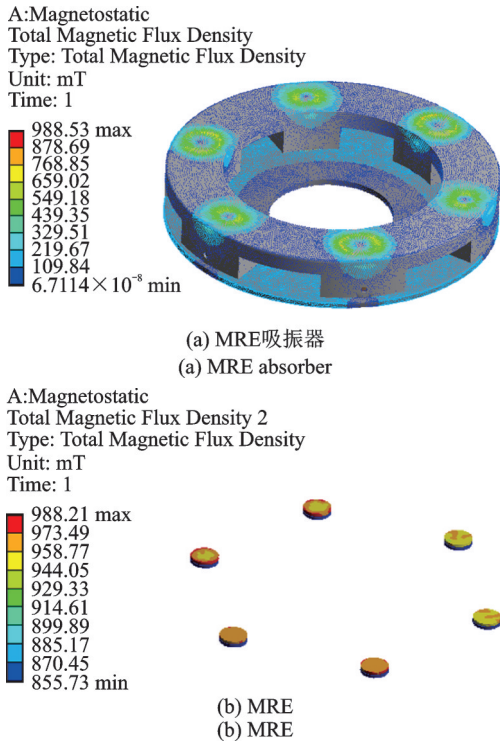


图 11 MRE 吸振器磁场分布图

Fig. 11 Distribution diagram of magnetic field for MRE absorber

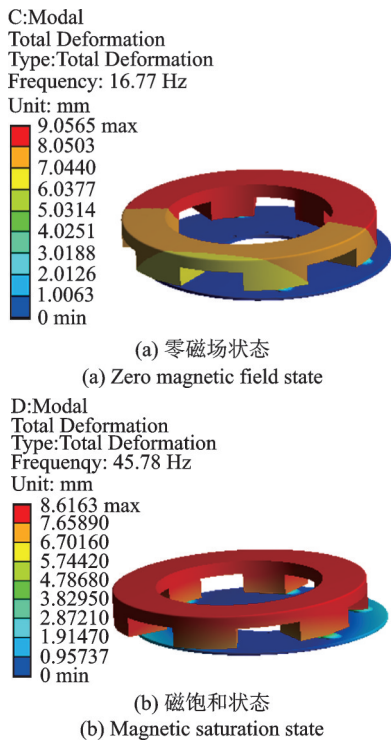


图 12 MRE 吸振器模态仿真结果

Fig. 12 Modal simulation results of MRE absorber

频带宽达到 29.01 Hz, 相对移频达到 173%。此外, 通过仿真结果可以看出吸振器的变形基本集中在振子上, 可以判断吸振器实际工作过程中由于底座通过螺栓固定, 减振系统的主要振动能量将被吸振器振子吸收, 验证了吸振器的工作

原理。

3.2 振动台试验验证

对吸振器结构和磁路完成相关设计并对其进行仿真验证后, 按照设计模型进行加工制造, 加工完成的吸振器样件如图 13 所示。

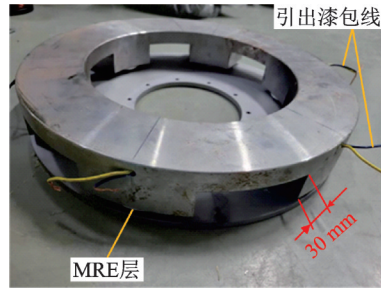


图 13 研制的吸振器样件

Fig. 13 Sample of developed vibration absorber

按照吸振器的实际工作模式将其通过压板固定在振动台水平台面上, 图 14 为振动台试验场景。采用的是苏试电动振动台 DC-3200-36/SV-0606, 振动台完成一次 5~100 Hz 的线性扫频循环耗时 10 min, 通过两个 PCB 加速度传感器 122A50 和 122A100 检测控制振动台的振动加速度保持在 0.1g 左右, 通过 222A200 传感器检测吸振器振子上的加速度信号。通过独立的可调电流源为吸振器内部线圈供电, 相邻线圈通入大小相等、方向相反的电流, 电流大小从 0 逐渐增大至 3.0 A, 变化步长为 0.2 A, 分别测量对应的激励和响应加速度信号, 根据峰值检测法可知曲线峰值即为吸振器固有频率。表 3 为 MRE 吸振器固有频率-电流实测结果, 并对其对应关系进行 5 阶多项式拟合, 结果如图 15 所示。可以看出, 不通电流时 MRE 吸振器的基频为 17.35 Hz, 随着吸振器内部励磁线圈所通电流的增加, 吸振器固有频率持续增大, 通 3.0 A 电流时固有频率最高可达到 45.21 Hz。吸振器移频带宽为 27.86 Hz, 相对移频达到 160.58%, 与模态仿真结果相符。拟合出的吸振器固有频率-电流公式对应关

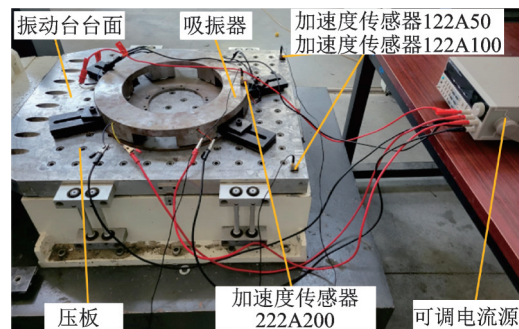


图 14 振动台试验场景

Fig. 14 Scene of shaking table test

系为：

$$y = 0.1422x^5 - 0.1522x^4 - 3.4125x^3 + 8.0191x^2 + 8.5236x + 17.4420 \quad (6)$$

式中, y 表示吸振器的固有频率; x 表示吸振器内部每个励磁线圈所通的电流大小。

表3 MRE吸振器移频结果

Tab.3 Frequency shift results of MRE absorber

电流/A	频率/Hz	电流/A	频率/Hz
0	17.35	1.6	38.16
0.2	19.56	1.8	40.02
0.4	22.14	2.0	41.14
0.6	24.37	2.2	42.25
0.8	27.73	2.4	43.37
1.0	30.33	2.6	43.75
1.2	33.31	2.8	44.49
1.4	36.29	3.0	45.21

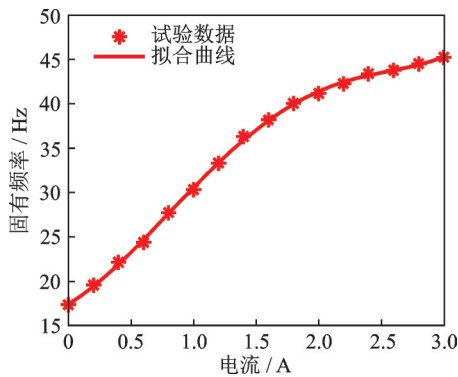


图15 吸振器固有频率-电流关系曲线

Fig. 15 Relation curve of absorber natural frequency-current

4 试验验证

4.1 激振器试验

通过搭建图16所示的激振器试验平台验证式(6)的准确性,将MRE吸振器安装在KUKA KR500机器人的末端,并与独立的可调电流源连接。东华动态信号控制系统经功率放大器连接DH40100激振器,可以实时控制激振器向机器人主轴输出指定频率的激励。在吸振器振子和机器人铣削主轴处分别布置加速度传感器095[#]和171[#],并经信号采集仪在信号分析软件中实时获取加速度信号。

通过东华软件控制激振器输出指定频率的正弦信号激励力,并采集吸振器振子和机器人主轴上的加速度实时信号,先后调节电流源输出电流为0和激励频率所对应的电流,通过对比加速度信号变化情况判断吸振器的移频效果。在MRE吸振器的工

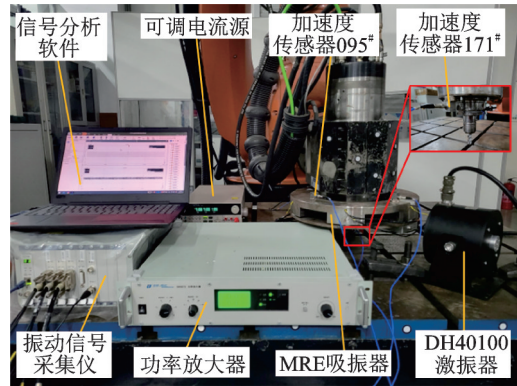


图16 激振器试验平台

Fig. 16 Experimental platform of vibration exciter

作带宽内选择20、25和40 Hz三个频率值,令吸振器固有频率分别为 $y = 20, 25, 40$ Hz,并代入式(6)计算得出对应的吸振器输入电流为0.25、0.62和1.81 A。激振器试验一共分三组进行,每组试验过程中保证激振器输出力的大小和频率不变。振子和主轴上的加速度信号测量结果如图17~19所示。可以看出,吸振器振子和机器人主轴的加速度变化趋势在三种不同激励频率下基本相同。根据式(6)计算结果向吸振器通入与外界振动频率相对应的电流后,振子和主轴的振动加速度信号幅值同时变化,振子处加速度明显增加,机器人主轴处显著降低,主轴上的振动被振子有效吸收,符合吸振器的工作原理。由此可以确定拟合出的吸振器固有频率-电流对应公式准确。

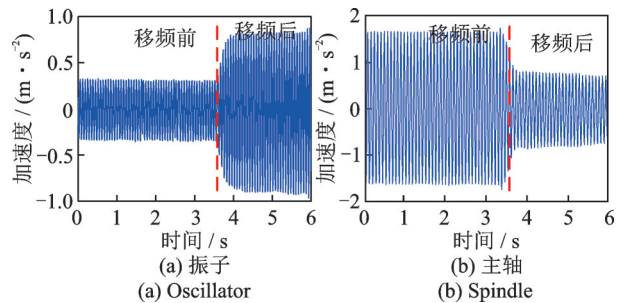


图17 20 Hz振动输出下振子和主轴的加速度时间历程

Fig. 17 Acceleration time-history of oscillator and spindle under 20 Hz vibration output

4.2 机器人铣削试验

采用KUKA KR500机器人在7075-T6铝合金上进行铣削试验,搭建如图20所示的试验平台。吸振器通过螺栓连接在机器人主轴下方,加速度传感器分别安装在吸振器的振子和机器人末端主轴,根据主轴的振动加速度信号频率实时调节吸振器线圈所通电流大小,使吸振器固有频率与机器人铣削振动频率相同,实现同频吸振的效果。为了评估本文所设计的MRE吸振器对抑制机器人铣削加工振动

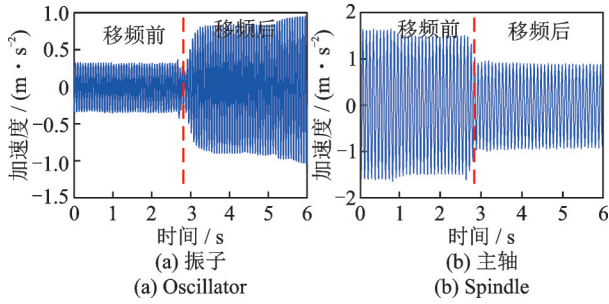


图 18 25 Hz 振动输出下振子和主轴的加速度时间历程
Fig. 18 Acceleration time-history of oscillator and spindle under 25 Hz vibration output

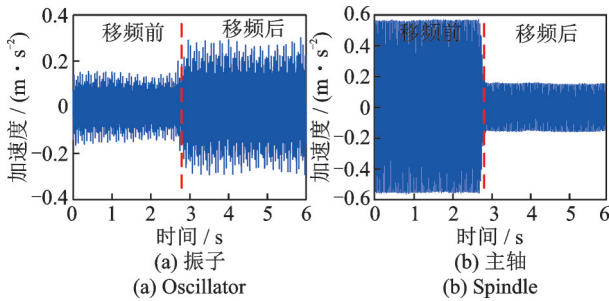


图 19 40 Hz 振动输出下振子和主轴的加速度时间历程
Fig. 19 Acceleration time-history of oscillator and spindle under 40 Hz vibration output

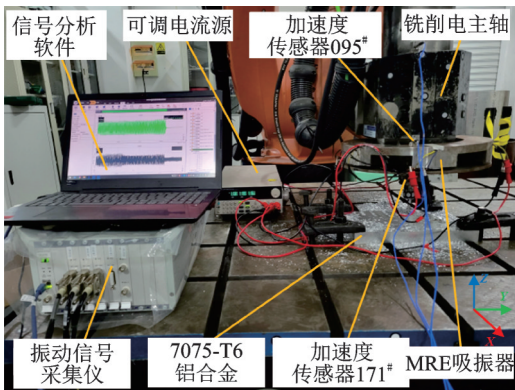


图 20 机器人铣削试验平台
Fig. 20 Experimental platform for robotic milling

的效果,分别进行了不加吸振器、加吸振器不通电、加吸振器通电三组工况试验。值得一提的是,不通电时吸振器相当于一个被动减振装置,通电调频后作为半主动减振器。三组工况下的铣削试验采用相同的加工参数:顺铣加工方式、切深 1 mm、径向切宽 10 mm、主轴转速 1200 r/min、进给 90 mm/min。

由于吸振器中 MRE 工作在剪切模式,所以此研究中仅关注机器人铣削时的 X 和 Y 方向减振。不加吸振器和加吸振器不通电的工况下对应机器人主轴加速度时域和频域测量结果,如图 21 所示。可以看出,在不加吸振器和加吸振器不通电两种工况下,机器人在 18.9 Hz 左右处出现最大峰值,根据以前的研究,18.9 Hz 为 KUKA KR500 机器人的 2 阶固有

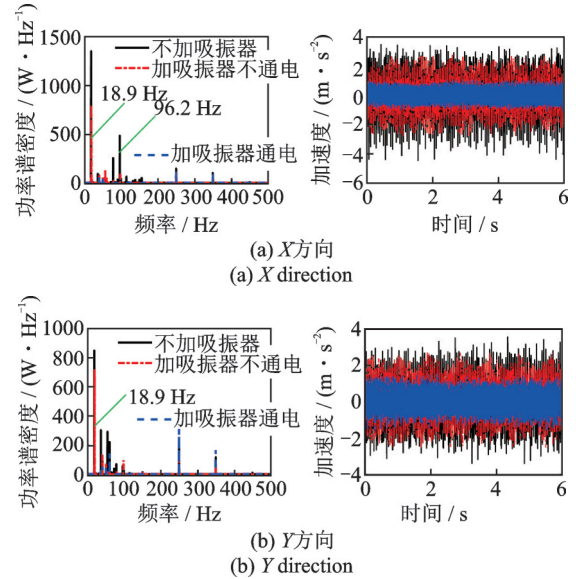


图 21 铣削试验加速度测量结果
Fig. 21 Acceleration measurement results of milling experiment

频率^[4],因此判断机器人在此发生低频颤振。时域上吸振器作为被动减振装置时可以小幅度地减小机器人主轴的振动加速度,但不够明显。将颤振频率 18.9 Hz 代入吸振器固有频率-电流关系式(6)得出对应励磁线圈电流为 0.15 A。然后,将此大小电流通过外部电流源输入 MRE 吸振器,在加吸振器通电的工况下进一步开展机器人铣削试验,对应加速度传感器的测量结果也在图 21 中给出。通过分析功率谱密度结果可以看出,对吸振器通电调频后机器人主轴的颤振频率 18.9 Hz 左右的主频峰值完全消失,实现了机器人铣削加工的低频颤振抑制。时域上吸振器作为半主动减振器大幅度降低了机器人主轴 X 和 Y 方向上的振动,表 4 为三种工况时域上的加速度数值分析结果。可以看出,在不加吸振器、加吸振器不通电和加吸振器通电工况下,X 方向的主轴振动加速度峰峰值分别为 7.93180、6.50149 和 2.32365 m/s²,均方根值分别为 1.327007、1.109293 和 0.468333 m/s²。Y 方向的主轴振动加速度峰峰值分别为 6.92609、5.25334 和 3.13262 m/s²,均方根值分别为 1.169242、0.963899 和 0.585667 m/s²。加吸振器通电后 X 方向的振动加速度峰峰值相对于不加吸振器和加吸振器不通电工况分别降低了 70.7% 和 64.3%,均方根值相对于不加吸振器和加吸振器不通电工况分别降低了 64.7% 和 57.8%。Y 方向峰峰值相对于不加吸振器和加吸振器不通电工况分别降低了 54.7% 和 40.4%,均方根值相对于不加吸振器和加吸振器不通电工况分别降低了 49.9% 和 39.2%。以上结果表明,吸振器作为被动减振装置时有一定减振效果但并不明显;对吸振器通电后,其

表 4 加速度数值分析结果

工况	X方向	X方向	Y方向	Y方向
	峰峰值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	均方根值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	峰峰值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	均方根值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
不加吸振器	7.93180	1.327007	6.92609	1.169242
加吸振器 不通电	6.50149	1.109293	5.25334	0.963899
加吸振器 通电	2.32365	0.468333	3.13262	0.585667

作为半主动减振装置可以大幅度减小振动。

此外,使用 Mitutoyo SJ-210 粗糙度计测量了工件铣削表面的粗糙度值,如图 22 所示。不加吸振器、加吸振器不通电和加吸振器通电三种工况下铣削工件的加工表面粗糙度值分别为 Ra 8.469、Ra 6.773 和 Ra 2.967,其中 Ra 为轮廓算数平均偏差,用于量化物体表面的微观不平整程度。可以看出,在吸振器通电后表面粗糙度值相对于不加吸振器和加吸振器不通电工况分别降低了 65.0% 和 56.2%,显著提升了工件的表面加工质量。

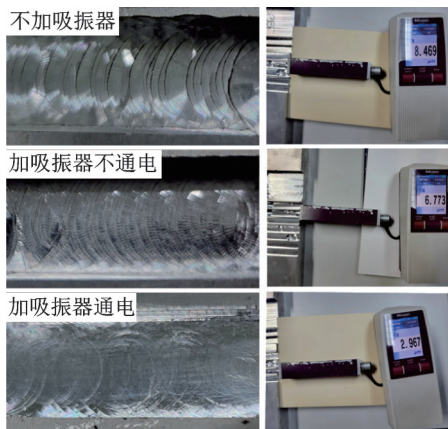


图 22 工件铣削加工表面及粗糙度测量

Fig. 22 Machining surface and roughness measurement of workpieces after milling

5 结 论

本文针对机器人铣削的低频颤振问题,利用磁流变弹性体(MRE)特有的流变特性,研究了不同质量配比的MRE磁流变效应,并基于此设计了一款MRE吸振器,通过振动台扫频试验、激振器试验和机器人铣削试验对MRE吸振器的移频特性和吸振性能进行了相关研究,主要结论如下:

(1) MRE的磁流变效应与原料的质量配比有关,当羰基铁粉、硅油、硅橡胶的配比为7:1.5:1.5时磁流变效应最高,可以达到2576%。

(2) 通过设计加工完成的各向异性MRE吸振器可以实现17.35~45.21 Hz的移频范围,带宽达到27.86 Hz,相对移频160.58%。

(3) 在低转速加工条件下KUKA KR500机器人容易在其2阶固有频率18.9 Hz左右发生颤振,对吸振器通电调频后可以将主轴的颤振频率完全抑制。相对于不加吸振器的工况,加吸振器通电调频后主轴上X方向的振动加速度峰峰值降低了70.7%,均方根值降低了64.7%;Y方向峰峰值降低了54.7%,均方根值降低了49.9%。此外工件的表面加工质量也有明显改善。

值得注意的是,未来仍有许多工作需要考虑。机器人主轴X方向在18.9 Hz处发生颤振的同时,在78和96 Hz处也有较大的加速度峰值,目前吸振器移频范围尚未达到要求,因此后续需要进一步研究MRE的磁流变效应影响因素、优化吸振器结构,继续扩大吸振器的工作带宽。

参考文献:

- [1] HUYNH H N, ASSADI H, RIVIÈRE-LORPHEVRE E, et al. Modelling the dynamics of industrial robots for milling operations[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 61: 101852.
- [2] ZHU Z R, TANG X W, CHEN C, et al. High precision and efficiency robotic milling of complex parts: challenges, approaches and trends[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(2): 22-46.
- [3] KUMAR M, SHENBAGARAMAN V M, SHAW R N, et al. Digital transformation in smart manufacturing with industrial robot through predictive data analysis [M]// *Machine Learning for Robotics Applications*. Singapore: Springer Singapore, 2021: 85-105.
- [4] CUI G Y, LI B, TIAN W, et al. Dynamic modeling and vibration prediction of an industrial robot in manufacturing [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2022, 105: 114-136.
- [5] XIN S H, TANG X W, WU J W, et al. Investigation of the low-frequency chatter in robotic milling[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2023, 190: 104048.
- [6] HE F X, LIU Y, LIU K. A chatter-free path optimization algorithm based on stiffness orientation method for robotic milling[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 101(9): 2739-2750.
- [7] JIAO J C, TIAN W, LIAO W H, et al. Processing configuration off-line optimization for functionally redundant robotic drilling tasks[J]. *Robotics and Autono-*

- mous Systems, 2018, 110: 112-123.
- [8] LIAO Z Y, WANG Q H, XIE H L, et al. Optimization of robot posture and workpiece setup in robotic milling with stiffness threshold[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(1): 582-593.
- [9] XIONG G, DING Y, ZHU L M. Stiffness-based pose optimization of an industrial robot for five-axis milling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 55: 19-28.
- [10] LI B, CUI G Y, TIAN W, et al. Vibration suppression of an industrial robot with AGV in drilling applications by configuration optimization[J]. Applied Mathematical Modelling, 2022, 112: 614-631.
- [11] MOUSAVI S, GAGNOL V, BOUZGARROU B C, et al. Stability optimization in robotic milling through the control of functional redundancies[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 50: 181-192.
- [12] VENKATA RAO R, PAWAR P J. Parameter optimization of a multi-pass milling process using non-traditional optimization algorithms[J]. Applied Soft Computing, 2010, 10(2): 445-456.
- [13] GUO M X, YE Y, JIANG X H, et al. Comprehensive effect of multi-parameters on vibration in high-speed precision milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(7): 2187-2195.
- [14] SIVASAKTHIVEL P S, VELMURUGAN V, SUDHAKARAN R. Prediction of vibration amplitude from machining parameters by response surface methodology in end milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 53(5): 453-461.
- [15] SRIDHAR R, PERUMAL SUBRAMANIYAN S, RAMESH S. Optimization of machining and geometrical parameters to reduce vibration while milling metal matrix composite[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2019, 72(12): 3179-3189.
- [16] GUO Y J, DONG H Y, WANG G F, et al. Vibration analysis and suppression in robotic boring process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 101: 102-110.
- [17] BU Y, LIAO W H, TIAN W, et al. Stiffness analysis and optimization in robotic drilling application[J]. Precision Engineering, 2017, 49: 388-400.
- [18] ZHANG J L, LIAO W H, BU Y, et al. Stiffness properties analysis and enhancement in robotic drilling application[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(11): 5539-5558.
- [19] DADFARNIA M, JALILI N, XIAN B, Et al. A Lyapunov-based piezoelectric controller for flexible Cartesian robot manipulators[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2004, 126(2): 347-358.
- [20] 曹青松,周继惠,黎林,等.基于模糊自整定PID算法的压电柔性机械臂振动控制研究[J].振动与冲击, 2010, 29(12): 181-186.
CAO Qingsong, ZHOU Jihui, LI Lin, et al. Vibration control of piezoelectric flexible manipulator based on fuzzy self-tuning PID algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(12): 181-186.
- [21] NGUYEN V, JOHNSON J, MELKOTE S. Active vibration suppression in robotic milling using optimal control[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 152: 103541.
- [22] 娄军强,魏燕定,杨依领,等.空间柔性机械臂弯扭耦合振动的主动控制研究[J].振动工程学报, 2014, 27(3): 400-407.
LOU Junqiang, WEI Yanding, YANG Yiling, et al. Active control of bending-torsion-coupled vibration of a space flexible manipulator[J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(3): 400-407.
- [23] 樊丽丽.基于天然橡胶的磁流变减振材料的性能及应用研究[D].南京:南京理工大学, 2021.
FAN Lili. Research on performance and application of magnetorheological damping material based on natural rubber[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [24] ONODA J, MAKIHARA K, MINESUGI K. Energy-recycling semi-active method for vibration suppression with piezoelectric transducers[J]. AIAA Journal, 2003, 41(4): 711-719.
- [25] 杜光磊.复合型磁流变弹性体隔振器设计及其控制系统研究[D].南京:南京理工大学, 2018.
DU Guanglei. Design and control system research of composite magnetorheological elastomer isolator[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [26] JAAFAR M F, MUSTAPHA F, MUSTAPHA M. Review of current research progress related to magnetorheological elastomer material[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 5010-5045.
- [27] CHEN L, GONG X L, JIANG W Q, et al. Investigation on magnetorheological elastomers based on natural rubber[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(14): 5483-5489.
- [28] 周陈程.磁流变弹性体及其在结构半主动控制中的应用研究[D].南京:南京理工大学, 2014.
ZHOU Chencheng. Research on magnetorheological elastomers and their applications in semi-active structural control[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [29] 龙浩天,路家斌,胡达,等.磁流变弹性体制备及其在精密加工应用研究进展[J].金刚石与磨料磨具工程, 2023, 43(2): 218-232.

- LONG Haotian, LU Jiabin, HU Da, et al. Preparation of magnetorheological elastomers and their applications in precision machining: a review[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2023, 43(2): 218-232.
- [30] LAWRENCE G, PAUL P S, VASANTH X A, et al. Influence of magnetorheological elastomer on tool vibration and cutting performance during boring of hardened AISI4340 steel[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, 33(4): 1555-1561.
- [31] XU Z Q, WANG J, WANG Q L, et al. Investigation of the polishing mechanism of magnetorheological elastic polishing composites[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 118(1): 377-389.
- [32] YUAN L, SUN S S, PAN Z X, et al. Mode coupling chatter suppression for robotic machining using semi-active magnetorheological elastomers absorber[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 117: 221-237.
- [33] 李光辉, 黄学功, 王灵. 磁流变弹性体的制备及力学性能研究[J]. *材料导报*, 2013, 27(20): 36-39.
- LI Guanghui, HUANG Xuegong, WANG Jiong. Fabrication and mechanical properties of magnetorheological elastomer [J]. *Materials Reports*, 2013, 27(20): 36-39.
- [34] 杜伟军. 惯组磁流变减振器设计及性能分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- DU Weijun. Design of magnetorheological elastomer vibration absorber for IMU and its performance analysis [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [35] 李剑锋, 龚兴龙, 张先舟, 等. 硅橡胶基磁流变弹性体的研制[J]. *功能材料*, 2006, 37(6): 1003-1005.
- LI Jianfeng, GONG Xinglong, ZHANG Xianzhou, et al. Research on magnetorheological elastomer based on silicone rubber[J]. *Journal of Functional Materials*, 2006, 37(6): 1003-1005.
- [36] 侯召旭. 磁流变弹性体制备及其分数阶导数模型[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- HOU Zhaoxu. Preparation of magnetorheological elastomer and fractional derivative model[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [37] CHEN L, GONG X L, LI W H. Damping of magnetorheological elastomers[J]. *Chinese Journal of Chemical Physics*, 2008, 21(6): 581-585.
- [38] 王田. 变频变阻尼半主动式动力吸振器的研究与优化设计[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
- WANG Tian. Research and optimization of a semi-active dynamic absorber with variable frequency and variable damping[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020.
- [39] 苏日勒格. 磁流变材料导磁性能的测试与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- SU Rilege. Test and research on magnetic property of magnetorheological material[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [40] TAO Y, RUI X T, YANG F F. Investigation of the impacts on magnetic permeability of MREs[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, 477: 269-274.
- [41] 朱应顺, 龚兴龙, 张培强. 磁流变弹性体若干物理量的数值分析[J]. *计算力学学报*, 2007, 24(5): 565-570.
- ZHU Yingshun, GONG Xinglong, ZHANG Peiqiang. Simulation on physical parameters of magneto-rheological elastomers[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2007, 24(5): 565-570.
- [42] 黄学功, 刘春, 王灵. 硅橡胶基磁流变弹性体相对磁导率研究[J]. *功能材料*, 2016, 47(2): 2143-2147.
- HUANG Xuegong, LIU Chun, WANG Jiong. Research on the relative permeability of magnetorheological elastomer based on silicone rubber[J]. *Journal of Functional Materials*, 2016, 47(2): 2143-2147.
- [43] 王威, 王炳雷, 王社良, 等. 应力对Q235钢磁滞回线影响的试验研究[J]. *工业建筑*, 2005, 35(增刊1): 314-317.
- WANG Wei, WANG Binglei, WANG Sheliang, et al. Experimental investigation on the effect of tension & compression stress on magnetic hysteresis loops for Q235 steel rod[J]. *Industrial Construction*, 2005, 35(Sup1): 314-317.

第一作者: 刘 鹏(2000—),男,硕士研究生。

E-mail: liu-peng@nuaa.edu.cn

通信作者: 李 波(1988—),男,博士,副教授。

E-mail: libo_nj@nuaa.edu.cn