

引文格式: 唐小卫, 王晨阳, 闫蓉, 等. 基于调谐质量阻尼器的机器人加工振动抑制[J]. 航空制造技术, 2026, 69(6): 25010099.

TANG Xiaowei, WANG Chenyang, YAN Rong, et al. Vibration suppression of robotic machining based on tuned mass damper[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(6): 25010099.

基于调谐质量阻尼器的机器人加工振动抑制

唐小卫^{1,2}, 王晨阳¹, 闫蓉¹, 刘楚姁¹

(1. 华中科技大学, 武汉 430074;

2. 国家数字化设计与制造创新中心, 武汉 430070)

[摘要] 机器人加工是航天复杂舱段内腔加工的有效手段。针对部分狭窄深腔舱段的加工需求, 需在机器人末端附加延长杆以提升操作可达性。然而, 延长杆在拓展加工覆盖范围的同时, 会增大系统动柔度, 极易引发加工颤振, 进而影响加工质量与效率。为此, 本文提出一种变频可调式调谐质量阻尼器(Tuned mass damper, TMD)的结构设计与参数优化方法, 建立了集成调谐质量阻尼器与机器人加工系统的动力学模型。该方法基于偏心曲柄滑块机构实现频率可调, 根据电涡流阻尼原理完成阻尼参数调控。进一步开展机器人加工系统动柔度控制试验, 结果表明, 本文所提方法可使末端动柔度峰值降低 67.8%, 显著提升加工稳定性边界。

关键词: 机器人加工; 舱段; 调谐质量阻尼器(Tuned mass damper, TMD); 动柔度; 颤振

中图分类号: V26; TH113.1

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25010099



唐小卫

教授, 博士, 研究方向为机器人加工技术与装备。

机器人加工是航天舱段零件内腔加工的核心技术手段之一。当前, 航天飞行器对性能的要求持续提高, 深腔窄口类舱段的设计与应用愈发普遍, 但通用工业机器人的末端执行机构无法满足此类舱段内壁的加工可达性需求。针对这一问题, 可通过在机器人末端附加延长杆的方式扩展加工范围, 从而实现深腔窄口类航天舱段的高效机器人加工。但延长杆在拓展舱段内腔加工范围的同时, 会增大系统动柔度, 进而极易诱发以低频模态为主导的延长杆颤振现象。该结构缺陷不仅严重影响加工质量与效率, 更限制了机器人加工技术在深腔窄口舱段中的应用推广, 因此开展颤振抑制研究具有重要的工程价值。在现有颤振控制方法中, 基于稳

定性叶瓣图的工艺参数优化是应用较广的技术手段^[1], 但该方法在面对延长杆“柔性强、刚性弱”的结构特性时存在明显局限, 即优化后的工艺参数通常以牺牲加工效率为代价, 难以满足实际生产需求。在此背景下, 结合抑振装置的主被动振动控制技术, 逐渐成为应对延长杆柔性弱刚性问题的有效解决方案。

在机器人铣削颤振抑制方面, Yuan 等^[2]提出了一种基于磁流变阻尼(Magnetorheological elastomer, MRE)技术的机器人加工半主动颤振抑制方法, 可有效吸收颤振。Chen 等^[3]设计了一种涡流阻尼器, 利用涡流效应提高机器人铣削过程的阻尼特性并抑制铣削时的振动。Xin 等^[4]研制了安装在机器人关节处的

收稿日期: 2025-06-16; 退修日期: 2025-06-27; 录用日期: 2025-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(52322511); 中国长江电力股份有限公司科研项目(2322020028)

通信作者: 闫蓉, 教授, 博士, 研究方向为数控加工技术。

磁流变阻尼器,在不影响机器人灵活性的情况下实现了颤振的有效抑制。尽管上述方法在机器人加工颤振抑制方面表现出良好效果,却受限于安装空间与结构适配性,无法直接应用于本文所研究的机器人延长杆装置。

调谐质量阻尼器(Tuned mass damper, TMD)是一种由辅助质量、阻尼元件和弹簧元件组成的吸振器,利用自身共振反作用于主结构,能够以小质量比达到较好的振动抑制效果,是针对延长杆抑振的有效途径。国内外学者针对铣削加工振动控制,设计了多种具有特殊功能的调谐质量阻尼器。Yang等^[5]设计了一种用于铣削减振的双自由度调谐质量阻尼器,由两个相同的质量块、金属板、支架和摩擦盘组成,通过调整螺栓间的距离实现金属板的刚度调整,试验结果表明,该调谐质量阻尼器能将加工临界切削深度提升至原有水平的两倍以上。Yang等^[6]针对薄壁件加工中的多模态振动问题,设计了一款两自由度磁控调谐质量阻尼器,该装置通过调节自身固有频率以匹配工件的多阶振动模态,并结合电涡流阻尼效应增强减振性能,试验结果表明,此磁控调谐质量阻尼器可同时抑制工件的两个主要振动模态。Burtscher等^[7]针对机床因阻尼不足引发的颤振问题提出了一款可调质量的调谐质量阻尼器,通过向质量组件腔体中定量注入液体实现质量的改变,进而调节固有频率,切削试验显示,该调谐质量阻尼器可将加工中心主轴的末端振幅降低36%。周谦^[8]设计了一种安装在机器人末端的悬臂式变刚度调谐质量阻尼器,通过滚珠丝杠控制悬臂的有效悬伸长度,进而改变调谐质量阻尼器的固有频率,能够有效抑制机器人铣削过程中的低频颤振。Li等^[9]开发了一种可固定在主轴上的环形磁流变泡沫阻尼器,并成功应用到KUKA KR500型机器人上,将铣削激励下的刀具径向振幅

降低37%~69%。Selvakumar等^[10]提出了一种通过优化调谐质量阻尼器位置来抑制薄壁工件铣削颤振的方法,通过参数化谐波分析优化调谐质量阻尼器位置,建立工件-阻尼器系统的预测模型,将调谐质量阻尼器置于薄壁件的最佳位置后,最小稳定切削深度提高了3倍。

综上,调谐质量阻尼器的结构创新与场景适配是铣削被动抑振研究的重要组成部分。因此,本文面向深腔窄口类舱段,搭建附加延长杆的机器人铣削加工平台,提出一种调谐质量阻尼器结构和参数的设计方法,建立包含调谐质量阻尼器和机器人系统的动力学模型,基于偏心曲柄滑块结构和电涡流阻尼原理分别完成频率和阻尼参数的优化,实现机器人加工系统动柔度抑制,提升稳定切削参数边界。

1 附加延长杆的机器人加工系统搭建

利用新松GCR30-1100型六自由度串联机器人搭建含延长杆的机器人加工平台,如图1所示。延长杆为空心圆柱形,长400 mm、外径90 mm、壁厚10 mm。加工对象为直筒型舱段工件,直径为400 mm,高度为400 mm,壁厚为10 mm,铝合金材料。

2 调谐质量阻尼器结构与参数优化

本文采用的延长杆为空心结构,因此参考镗削减振刀柄的结构设计^[11],将调谐质量阻尼器内置在延长杆腔体中。该阻尼器主要由永磁体、质量块、振动杆、刚度调节杆、舵机及附加连接件组成。图2所示的调谐质量阻尼器结构中,采用了悬臂提供系统所需的等效刚度,其刚度的调节方式基于一种机械传动结构:通过伺服舵机控制曲柄旋转,带动滑块沿直线导轨滑动,从而改变悬臂与3根垂直支撑杆之间的连接范

围。该机制通过调整悬臂的有效悬长,进而改变系统的等效刚度与固有频率,实现对阻尼器调谐频率的动态控制。质量块与永磁体采用嵌合式的安装方式,共同作为振动响应单元。铜板被固定在延长杆的内部,与永磁体形成一个典型的电磁阻尼系统。当系统受到激励发生振动时,悬臂带动质量块在一定范围内运动,使永磁体随铜板产生相对运动。这种运动导致铜板局部的磁通量发生变化,根据法拉第电磁感应定律,在铜板中感生出闭合涡电流。根据楞次定律,该感应电流会产生一个方向与原磁通变化相反的磁场,从而对永磁体的运动产生阻碍作用。由于这种阻尼力与运动速度成正比,构成了一种典型的电涡流阻尼机制。通过调节舵机控制参数和系统结构参数,可以同时实现对调谐质量阻尼器固有频率和电涡流阻尼强度的双重可调,从而实现为目标系统振动响应的有效抑制与能量耗散调控。

2.1 调谐质量阻尼器动力学建模

附加延长杆的机器人具有低频多模态特点,为简化分析,以机器人的某一阶模态为研究对象,将其简化为单自由度小阻尼振动系统,考虑模态的方向性,令调谐质量阻尼器的作用方向与机器人该模态方向夹角为 α 。将机器人加工系统定义为主振动系统,设作用在机器人主振动系统上的激振力(加工时的切削力)为

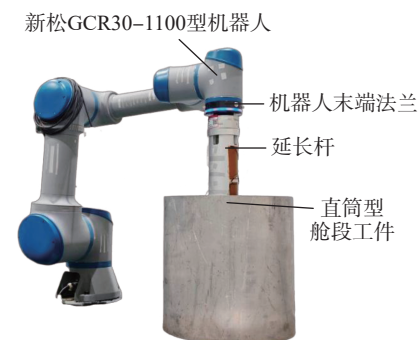


图1 含延长杆的机器人舱段铣削平台
Fig.1 Robotic cabin-section milling platform with extension rod

$f = Fe^{j\omega t}$ (其中 F 为激励力的幅值; ω 为激励力角频率; j 为虚数单位; t 为时间), 则包含调谐质量阻尼器的机器人铣削加工系统可简化为如图 3 所示的模型。

机器人主振动系统与调谐质量阻尼器的位移分别用 x_1 、 x_2 表示, 则系统的动力学方程为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 + c_2 (\dot{x}_1 \cos \alpha - \dot{x}_2) \cos \alpha + k_2 (x_1 \cos \alpha - x_2) \cos \alpha = F \cos \omega t \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1 \cos \alpha) + k_2 (x_2 - x_1 \cos \alpha) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, m_1 、 c_1 、 k_1 为主振动系统模态质量、阻尼和刚度; m_2 、 c_2 、 k_2 为调谐质量阻尼器质量、阻尼和刚度。当调谐质量阻尼器的偏角 $\alpha=0$ 时, 该特殊情况下系统简化为经典模型。机器人主振动系统和调谐质量阻尼器吸振器的位移分别为 $x_1 = \bar{X}_1 e^{j\omega t}$, $x_2 = \bar{X}_2 e^{j\omega t}$,

其中 \bar{X}_1 、 \bar{X}_2 分别为 x_1 、 x_2 的复数振幅, 代入式 (1) 化简可得:

$$\begin{cases} \bar{X}_1 (-m_1 \omega^2 + j\omega c_1 + k_1 + j\omega c_2 \cos^2 \alpha + k_2 \cos^2 \alpha) + \bar{X}_2 (-j\omega c_2 \cos \alpha - k_2 \cos \alpha) = F \\ \bar{X}_1 (-j\omega c_2 \cos \alpha - k_2 \cos \alpha) + \bar{X}_2 (-m_2 \omega^2 + j\omega c_2 + k_2) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

求解式 (2) 可得:

$$\begin{cases} \frac{\bar{X}_1}{F}(\omega) = (-m_2 \omega^2 + k_2 + jc_2 \omega) / [(-m_1 \omega^2 + jc_1 \omega + k_1) (-m_2 \omega^2 + jc_2 \omega + k_2) - m_2 \omega^2 (jc_2 \omega + k_2) \cos^2 \alpha] \\ \frac{\bar{X}_2}{F}(\omega) = (k_2 + jc_2 \omega) \cos \alpha / [(-m_1 \omega^2 + jc_1 \omega + k_1) (-m_2 \omega^2 + jc_2 \omega + k_2) - m_2 \omega^2 (jc_2 \omega + k_2) \cos^2 \alpha] \end{cases} \quad (3)$$

引入下列项。

$\omega_{n1} = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}$, 表示机器人主振动系统的固有角频率, rad/s。

$\omega_{n2} = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}$, 表示调谐质量阻尼器的固有角频率, rad/s。

$\gamma = \frac{\omega_{n1}}{\omega_{n2}}$, 表示固有角频率比。

$\lambda = \frac{\omega}{\omega_{n1}}$, 表示强迫振动频率比。

$\xi_{m2} = \frac{c_2}{2\sqrt{m_2 k_2}}$, 表示调谐质量阻尼器阻尼比。

$\xi_{m1} = \frac{c_1}{2\sqrt{m_1 k_1}}$, 表示机器人主振动系统的阻尼比。

$X_{st} = \frac{F}{k_1}$, 表示机器人主振动系统受到大小为 F 的力作用时的变形。

$\mu = \frac{m_2}{m_1}$, 表示质量比。

基于式 (3) 可仿真得到调谐质量阻尼器在不同设置参数下的机器人加工系统延长杆末端的等效振幅 $\frac{\bar{X}_1}{X_{st}}$, 如图 4 所示。依据文献 [12] 提出的定点理论, 图 4 中 P 、 Q 点为频响函数曲线中与阻尼无关的特征点, 通过锁定可构建调谐质量阻尼器参数最优解的解析推导模型。

由于机器人主振动系统阻尼较小, 当外力频率与其固有频率接近时振幅会迅速增大。图 4 (a) 显示了当调谐质量阻尼器阻尼比一定, 频率比与机器人主振动系统相同时, 不同的质量比对末端等效振幅的影响。可以看出, 质量比越大等效振幅越低, 但过大的质量会影响机器人本身的运动和负载能力, 因此在实际使用时, 通常将质量比 μ 控制在 5% 以内 [12]。从图 4 (b) 中可以看出, 当调谐质量阻尼器质量一定, 频率比和机器人主振动系统相同时, 阻尼比 ξ_m 从 0 增加, 两侧共振峰幅值降低, 但当阻尼比超过一定值后, 抑振能力恶化, 并且不

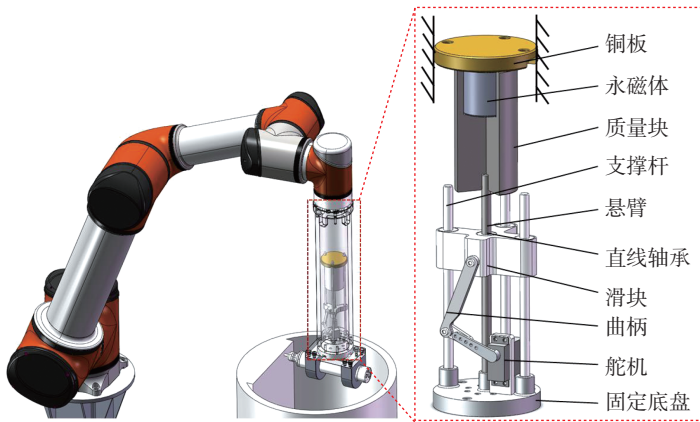


图 2 可调式电涡流调谐质量阻尼器结构剖面示意图

Fig.2 Cross-sectional schematic of adjustable eddy current tuned mass damper structure

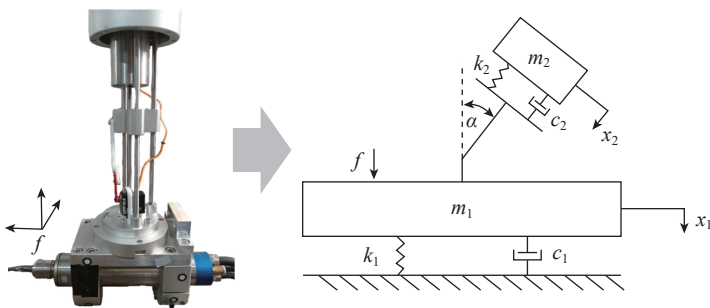


图 3 附加调谐质量阻尼器的机器人简化模型

Fig.3 Simplified robot model with attached tuned mass damper

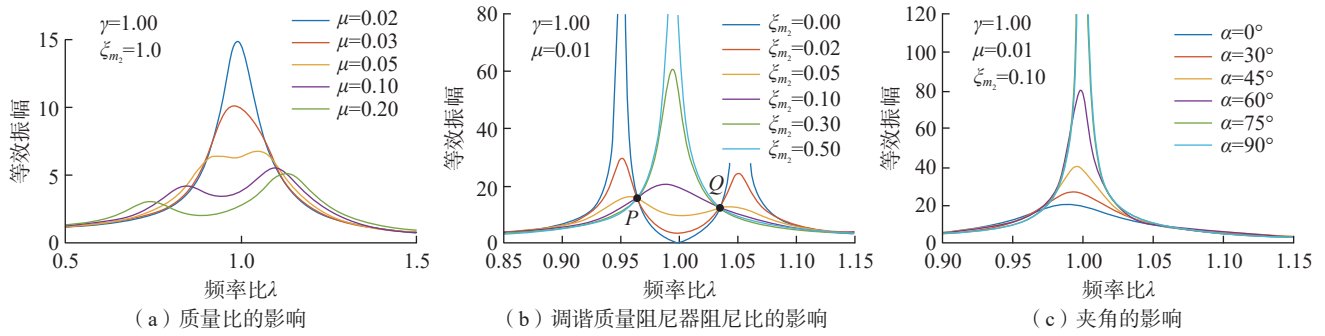


图4 调谐质量阻尼器不同参数下机器人末端等效振幅随强迫振动频率比的变化仿真

Fig.4 Simulation of equivalent amplitude of robot end-effector versus forced vibration frequency ratio under different tuned mass damper parameters

同阻尼比的曲线明显相交于两点,说明一定量的阻尼可以抑制两侧新的共振峰,使调谐质量阻尼器的抑振效果更好。图4(c)显示了调谐质量阻尼器与机器人模态方向的夹角大小对末端等效振幅的影响。可以看出,随着 α 的增大,抑制效果逐渐变差,在 $\alpha=90^\circ$ 时调谐质量阻尼器彻底失去效果,说明 α 的增大意味着调谐质量阻尼器偏离模态方向,进而削弱主系统与调谐质量阻尼器之间振动及作用力的传递效率。但值得注意的是, α 增大至 30° 时,抑制效果没有明显变差(相差不到2%)。这意味着在使用调谐质量阻尼器抑制机器人加工系统末端动柔度时,并不要求其安装方向与机器人模态方向精确一致,夹角小于 30° 时抑振效果显著, $30^\circ\sim 45^\circ$ 时该装置仍能保持良好的抑振效果。

上述分析说明,当调谐质量阻尼器的偏角 α 、固有角频率比 γ 、质量比 μ 、阻尼比 ζ_m 等参数取不同值时,会对机器人主振动系统产生不同的影响。因此,可通过对上述参数进行规律性调控,从而获得更优的抑振效果。综上,结合机器人加工系统当前位姿下末端的频响特性,对调谐质量阻尼器进行参数优化,从而实现最佳的抑振效果。

2.2 调谐质量阻尼器的参数优化

调谐质量阻尼器的参数需要结合待抑振机器人加工系统在当前姿态下的末端频响函数特性来进行优

化,以精准抑制各阶模态的动柔度,最终实现最佳的抑振效果。本文依据文献[12]提出的定点理论开展参数优化,通过锁定频响函数曲线中与阻尼无关的特征点,构建调谐质量阻尼器参数最优解的解析推导模型。

对于含有阻尼 β 的振动系统,其频率传递函数可以表示为

$$G(\omega) = \frac{N_R(\omega) + \beta N_I(\omega)}{D_R(\omega) + \beta D_I(\omega)} \quad (4)$$

式中, N_R 、 D_R 是分子分母中的阻尼无关项; N_I 、 D_I 是阻尼相关项,易得

$$\begin{cases} G(\omega)|_{\alpha=0} = N_R(\omega)/D_R(\omega) \\ G(\omega)|_{\alpha=\infty} = N_I(\omega)/D_I(\omega) \end{cases} \quad (5)$$

当频率传递函数不随 β 变化时,有

$$G(\omega)|_{\alpha \rightarrow \text{free}} = \left(\frac{N_I(\omega)}{D_I(\omega)} \right)$$

$$\left(\frac{N_R(\omega)/N_I(\omega) + \beta}{D_R(\omega)/D_I(\omega) + \beta} \right) = \left(\frac{N_I(\omega)}{D_I(\omega)} \right) \Rightarrow \frac{N_I(\omega)}{D_I(\omega)} = \frac{N_R(\omega)}{D_R(\omega)} \quad (6)$$

独立于 β 的频率传递函数可以由式(6)确定,不同 β 的传递函数均经过两个定点P、Q。最优同调的本质,是将这两个定点所对应的频率传递函数值调整至相等的过程。最优阻尼参数,是指可使这两个相等的函数值恰好是曲线全局最大值的参数。在此基础上,本文使用扩散定点理论推导最优同调下的固有频率比 γ_{opt} 和调谐质量阻尼器最优阻尼比 ζ_{opt} 。

$$\gamma_{\text{opt}} = \frac{1}{1 + \mu \cos^2 \alpha} \quad (7)$$

$$\zeta_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{3\mu'}{8(1+\mu')}} = \sqrt{\frac{3\mu \cos^2 \alpha}{8(1+\mu \cos^2 \alpha)}} \quad (8)$$

基于式(7)和(8),仿真应用最优调谐理论不同参数下的主系统频响函数,如图5所示。

图5(a)为非最优调谐下的一般响应曲线,可以明显看到两定点不等高。图5(b)为满足最优调谐的响应曲线,此时 $\gamma = \gamma_{\text{opt}}$,且P、Q等高。图5(c)为不同质量比的调谐质量阻尼器在同时满足最优调谐与最优阻尼条件下的响应曲线,可以看出,调谐质量阻尼器的抑振潜能随质量比的增大而提升,但当质量比超过临界阈值后,附加质量引入的系统负载将超过其性能所带来的增益。因此,在选定合理质量比的基础上,通过调控调谐质量阻尼器的频率与阻尼参数,可将机器人系统的振动能量降至最低。基于此,结合待抑振机器人加工系统末端的频响函数特性开展调谐质量阻尼器参数优化,能够实现对各阶模态动柔度的精准抑制。对于附加延长杆的机器人加工系统而言,安装经参数优化后的调谐质量阻尼器,可有效抑制加工过程中的振动。

3 附加延长杆的机器人加工系统动柔度抑制验证

如图6所示,对延长杆的机器人

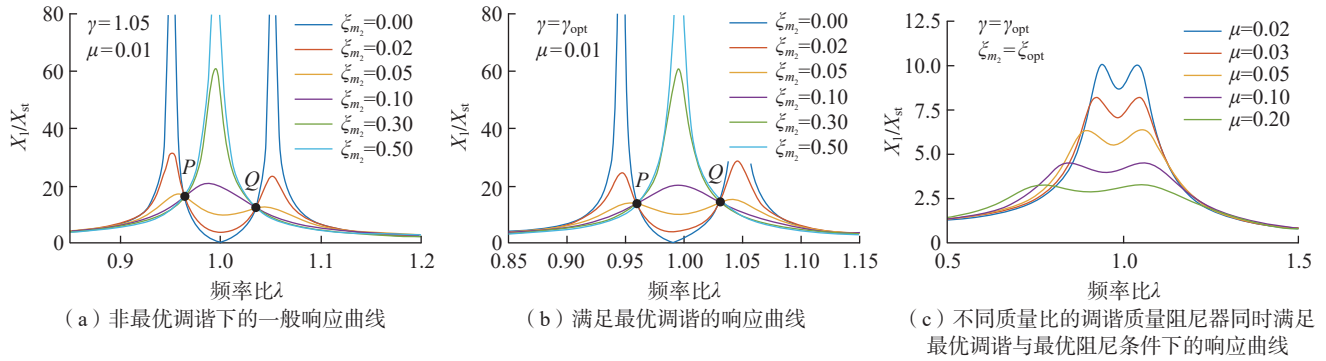


图5 优化理论对主系统频响函数影响仿真

Fig.5 Simulation of effect of optimization theory on frequency response function of host system

加工系统末端进行锤击模态试验,机器人的姿态为 $[27.8^\circ, -4.6^\circ, 49.7^\circ, 34.7^\circ, -55.1^\circ, 158.4^\circ]$ 。图7给出了模态测试试验得到的末端频响函数,以此作为调谐质量阻尼器作用前的动柔度对比。参考坐标系为机器人基坐标系, H_{yy} 表示 Y 方向激励 X 方向响应的频响,其余类似。

选取图7中 H_{yy} 中频率为11 Hz的第一阶模态作为要抑制的模式,利用2.2节中的参数优化方法确定调谐质量阻尼器和机器人主振动系统的固有频率比和阻尼比。表1展示了附加调谐质量阻尼器前后机器人主振动系统一阶模态参数的变化,可以看出,1阶模态的阻尼比从2.588%提升至14.668%,增加了4.7倍。图8展示了调谐质量阻尼器动柔度抑制效果,可以看出,11 Hz模态的最大动柔度从 $143 \mu\text{m/N}$ 下降至 $46 \mu\text{m/N}$,下降比例达67.8%,试验结果表明,

调谐质量阻尼器能够有效抑制机器人末端模态动柔度。

为了分析调谐质量阻尼器抑制机器人末端模态动柔度后对颤振的影响,进一步使用全离散法^[13]计算安装调谐质量阻尼器前后机器人的铣削稳定性边界,切削参数如表2所示。切削工件为图1所示的直筒型舱段,仿真结果如图9所示,可以看出,安装调谐质量阻尼器后,稳定性边界得到显著提升,无颤振参数域扩大。

根据图9所示的稳定性边界图,选取切削参数转速4200 r/min、切深0.4 mm开展切削试验,可以看到,无调谐质量阻尼器抑振时,A点是颤振状态,有调谐质量阻尼器抑振时,为稳定无颤振状态。图10为机器人加工调谐质量阻尼器抑振的试验现场图及加工中采集的振动信号,可以看到无调谐质量阻尼器抑振时,11.75 Hz的振动信号幅值大,是明显的颤振信号,而有调谐质量阻尼器抑振时,11.75 Hz的颤振信号消失。有、无调谐质量阻尼器抑振的加工工件表面如图11所示,可以看到无调谐

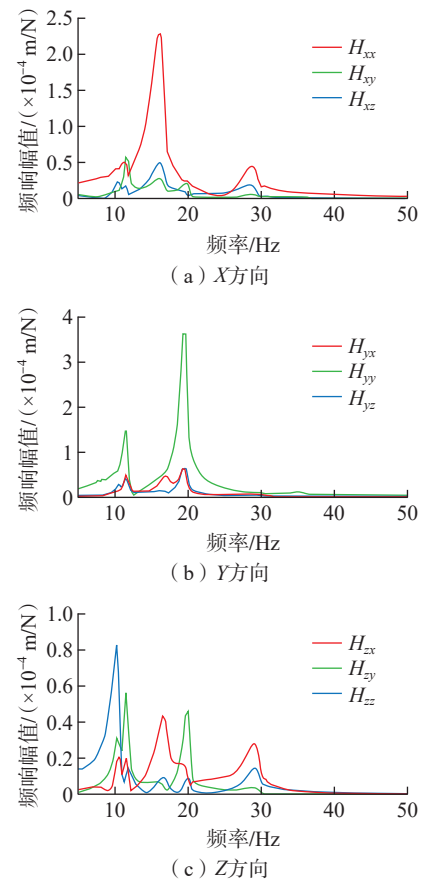


图7 铣削机器人三向交叉频响

Fig.7 Triaxial cross-frequency response of the milling robot

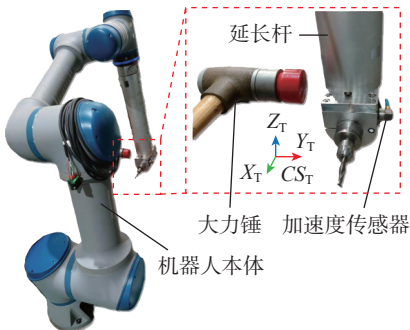


图6 机器人加工系统末端进行锤击模态试验
Fig.6 Hammer impact modal test for end-effector of robot machining system

表1 附加调谐质量阻尼器前后机器人1阶模态参数的变化

Table 1 Changes in the first-order modal parameters of robot before and after tuned mass damper attachment

机器人加工系统	模态频率/Hz	阻尼比/%	留数
无调谐质量阻尼器	11.500	2.558	$-6.314e-5-j2.431e-4$
有调谐质量阻尼器	10.839	14.668	$-5.295e-5-j4.700e-4$

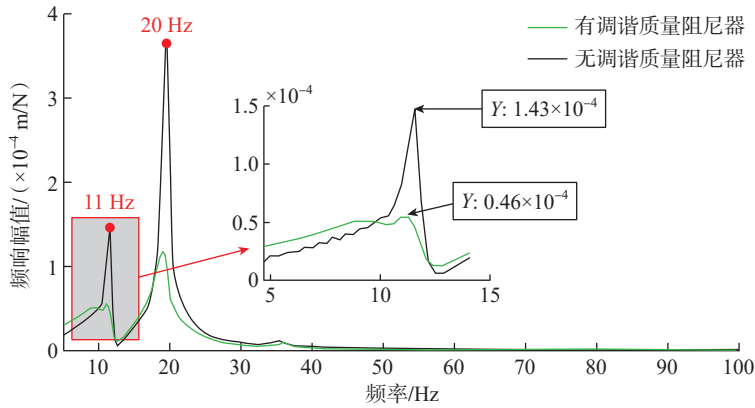


图8 调谐质量阻尼器动柔度抑制效果
Fig.8 Dynamic compliance suppression effect of tuned mass damper

表2 仿真参数设置
Table 2 Simulation parameters settings

刀具参数				切削参数			
直径/mm	齿数	螺旋角/(°)	转速遍历/(r/min)	切宽/mm	切深遍历/mm	每齿进给量/mm	切削方式
8	2	15	3000~9000	4	0.1~2	0.01	顺铣

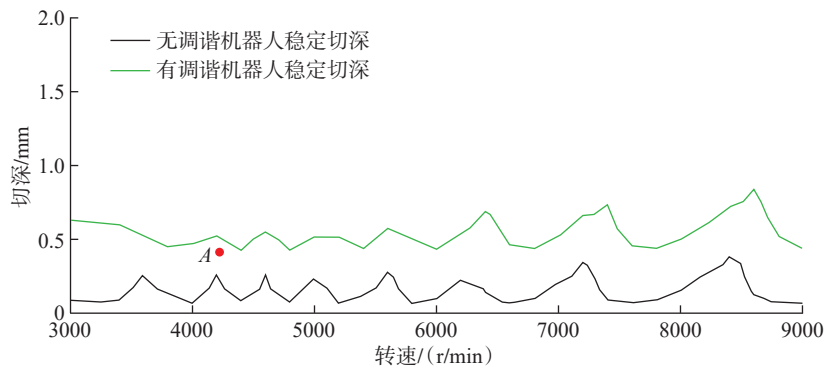
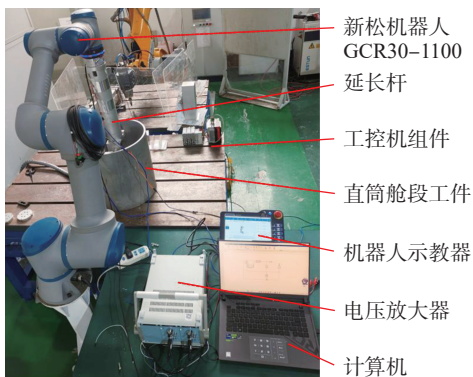
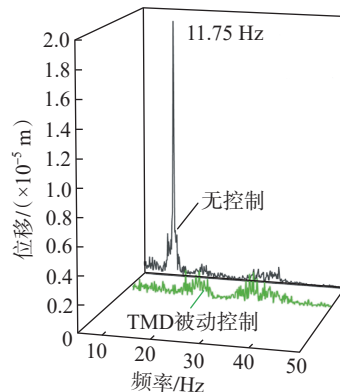


图9 有/无调谐质量阻尼器机器人稳定切深变化
Fig.9 Variation of stable cutting depth of robot with and without tuned mass damper



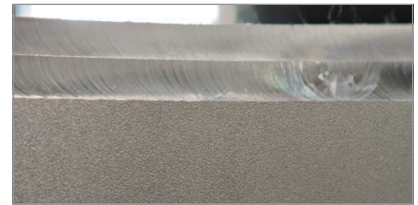
(a) 试验现场



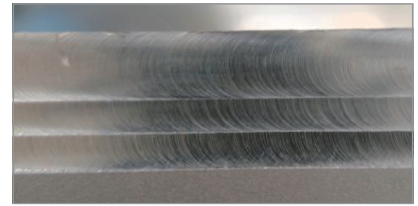
(b) 振动信号

图10 切削试验验证

Fig.10 Verification of cutting experiments



(a) 无调谐质量阻尼器



(b) 有调谐质量阻尼器

图11 舱段工件加工表面

Fig.11 Machined surface of cabin workpiece

质量阻尼器控制时,加工表面振纹明显,有调谐质量阻尼器控制时,加工表面光滑。以上证明了调谐质量阻尼器的颤振抑制效果,可以显著提升附加延长杆的机器人加工稳定性边界,扩展稳定参数域,在保证稳定的前提下提高加工效率。

4 结论

针对深腔窄口类舱段的加工需求,本文提出在机器人末端附加延长杆的方案,以提升系统对复杂型腔的加工可达性。针对附加延长杆带来的动柔度增大、易出现颤振的问题,提出了一种用于机器人加工振动抑制的可调频质量阻尼器结构和参数优化方法。建立了机器人与调谐质量阻尼器耦合的动力学模型,并通过仿真分析揭示了不同参数对系统动态特性的影响规律,结合仿真结果选定最优调谐参数,完成了可调式电涡流调谐质量阻尼器的结构设计与仿真实验验证。锤击模态试验结果表明,调谐质量阻尼器可将特定模态下的动柔度幅值降低 67.8%,显著提升了稳定性边界,有效扩展了稳定参数域。

参考文献

[1] WU J W, TANG X W, PENG F Y, et al. A novel mode coupling mechanism for

predicting low-frequency chatter in robotic milling by providing a vibration feedback perspective[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 216: 111424.

[2] 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.

[3] CHEN F, ZHAO H, LI D W, et al. Contact force control and vibration suppression in robotic polishing with a smart end effector[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, 57: 391–403.

[4] XIN S H, TANG X W, WU J W, et al. Low-frequency chatter suppression in robotic milling using magnetorheological joint damper (MRJD)[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2025, 38(3): 102974.

[5] YANG Y Q, DAI W, LIU Q. Design and implementation of two-degree-of-freedom tuned

mass damper in milling vibration mitigation[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 335: 78–88.

[6] YANG Y Q, DAI W, LIU Q. Design and machining application of a two-DOF magnetic tuned mass damper[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89(5–8): 1635–1643.

[7] BURTSCHER J, FLEISCHER J. Adaptive tuned mass damper with variable mass for chatter avoidance[J]. *CIRP Annals*, 2017, 66(1): 397–400.

[8] 周谦. 机器人铣削半主动振动控制方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.

ZHOU Qian. Research on semi-active vibration control method for robotic milling[D]. Jinan: Shandong University, 2023.

[9] LI B, SU C X, ZHAO W, et al. A novel method of suppressing machining vibration in robotic milling using magneto-rheological foam damper[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 37(12): 522–543.

[10] SELVAKUMAR M, VENUGOPAL P R, VELAYUDHAN G. Optimization of a tuned mass damper location for enhanced chatter suppression in thin-wall milling[J]. *Strojniški Vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 68(5): 339–349.

[11] 曹合荣. 内置双不等减振器减振镗杆的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.

CAO Herong. Study on vibration reduction boring bar with built-in dual unequal dampers [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016.

[12] (日)背户一登. 动力吸振器及其应用[M]. 任明章, 译. 北京: 机械工业出版社, 2013.

SETO K. Dynamic vibration absorbers and their applications[M]. REN Mingzhang, trans. Beijing: China Machine Press, 2013.

[13] DING Y, ZHU L M, ZHANG X J, et al. A full-discretization method for prediction of milling stability[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50(5): 502–509.

Vibration Suppression of Robotic Machining Based on Tuned Mass Damper

TANG Xiaowei^{1,2}, WANG Chenyang¹, YAN Rong¹, LIU Chuheng¹

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. National Innovation Institute of Digital Design and Manufacturing, Wuhan 430070, China)

[ABSTRACT] Robotic machining is an effective method for processing complex inner cavities of spacecraft cabins. For the machining requirements of some narrow and deep cavity sections, an extension rod is attached to the robotic end-effector to enhance operational accessibility. While extending the machining coverage, the rod increases the dynamic compliance of the system and is highly prone to inducing machining chatter, which in turn impairs machining quality and efficiency. To address this problem, a structural design and parameter optimization method for a tunable-frequency tuned mass damper (TMD) is proposed, and a dynamic model integrating the tuned mass damper with the robotic machining system is established. This method achieves frequency tunability based on an eccentric crank-slider mechanism and realizes damping parameter regulation according to the principle of eddy current damping. Further dynamic compliance control experiments on the robotic machining system are carried out. The results show that the proposed method can reduce the peak value of end-effector dynamic compliance by 67.8%, significantly expanding the stable machining boundary.

Keywords: Robotic machining; Spacecraft cabins; Tuned mass damper (TMD); Dynamic flexibility; Machining chatter

(责编 七七)