

引文格式: 李忠群, 沈群利, 吴文镜, 等. 重载机器人动力学研究现状与进展[J]. 航空制造技术, 2026, 69(6): 25010121.

LI Zhongqun, SHEN Qunli, WU Wenjing, et al. State of the art and prospects in dynamics of heavy-duty robots[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(6): 25010121.

重载机器人动力学研究现状与进展

李忠群¹, 沈群利¹, 吴文镜², 范海路¹

(1. 湖南工业大学机械工程学院, 株洲 412007;

2. 美的集团高端重载机器人全国重点实验室, 佛山 528311)

[摘要] 重载工业机器人因其可达空间大、工作位形灵活等特点,在机械加工领域的应用日趋广泛。然而,刚度特性导致加工时极易产生颤振,严重制约了其应用发展。基于高精度动力学建模的颤振预测及各类主被动颤振抑制技术研究,对于实现无颤振加工有重要意义。系统综述了国内外重载机器人加工系统动力学领域的研究进展:介绍了重载机器人动态特性建模与预测方法;深入分析了铣削过程动力学模型及其求解方法,阐明了颤振机理、影响因素及动态行为变化规律;分别介绍了颤振在线监测技术与综合抑制策略,评估了不同方法的特点、适用场合及优劣;最后,基于上述分析进行总结,并展望了未来研究的关键方向。

关键词: 重载机器人; 动力学建模; 频响函数; 稳定性预测; 颤振抑制

中图分类号: V26; TP242

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25010121



李忠群

教授, 博士, 研究方向为高效数控加工, 虚拟与智能制造。

重载机器人作为一类特殊的工业机器人,是指末端有效负载超过100 kg、负载自重比处于1:2至1:8区间,且配备平衡装置的机器人。与普通工业机器人相比,重载工业机器人的承载能力更为卓越。为保障重载工况下的稳定性与可靠性,重载机器人在设计与制造阶段多选用高强度材料,并采用特殊的机构设计制造。重载机器人具备高精度、高速度与高可靠性的特点,能够精准控制复杂运动轨迹,且通过编程可高效、稳定完成繁重、危险及重复性任务^[1-2]。该类机器人广泛应用于航空航天、工程机械、汽车制造等工业领域。以航空航天领域为例,可承担复杂曲面零件铣削、大型航空复杂构件复合材料自动铺设、飞机结构部件焊接、机舱蒙皮钻铆以及航空部装与总装等任

务(图1)^[3]。

大型复杂航空零部件的制造能力是反映一个国家高端制造业核心竞争力的关键指标。目前,此类零部件的主流制造方法是采用大型专用数控加工中心进行铣削加工。与数控加工中心相比,重载机器人具有显著优势:在运动操作方面,其工作空间大、灵活性强,凭借多自由度特性可实现多角度加工^[4-5],有效避免多次装夹产生的误差,还能通过编程实现复杂轨迹运动^[6];在生产准备方面,仅需简单编程和示教即可适配新任务,适合于小批量、多品种的生产模式;在环境适应性方面,重载机器人能够适应高温、粉尘等恶劣环境,且可安装在移动平台上实现移动作业;在集成拓展性方面,其易集成视觉、力传感器等功能模块,还能与自

收稿日期: 2025-07-14; 退修日期: 2025-09-20; 录用日期: 2025-11-11

基金项目: 高端重载机器人全国重点实验室开放课题(HHR2025020106)

动上下料、物流输送等设备协同构建自动化生产线^[7]。图2所示为一个典型的机器人铣削系统^[8]。

尽管重载机器人已得到广泛应用,但是工业机器人的刚度通常仅为普通机床的1/100~1/50^[9-11],重载机器人的刚度虽高于普通工业机器人,但与传统数控机床相比仍显不足。静载荷(尤其是重力)是机器人静止或匀速运动时结构设计和部件选型的关键因素,当前相关研究多集中于静力学分析。随着载荷增大,重载机器人的低刚度特性易引发加工变形与颤振,尤其在加工弱刚性薄壁复杂结构零件时,会严重影响刀具寿命,且制约加工精度和效率^[12]。

重载机器人的动态特性对其使

用功能与性能至关重要,主要体现在运动精度、加工稳定性及加工效率等方面。其中,加工系统动态特性建模、铣削加工稳定性分析以及加工颤振综合抑制的相关动力学研究尤为关键。高精度建模能够精确预测机器人末端动态特性,这对优化切削参数、评估系统性能、识别结构薄弱环节及优化机械结构具有重要意义。但是机器人结构独特,且动力学具有高度非线性特征,导致建模难度较大^[13]。在铣削加工稳定性研究中,颤振是制约加工质量与效率的核心因素,通过稳定性建模与分析可获得稳定性叶瓣图,据此选取切削参数,能够实现无颤振高效切削。颤振综合抑制可通过多维度策略实现,

涵盖结构优化,装置增设,及控制策略调整等主动和被动方法,全面提升铣削加工稳定性。本文建立的重载机器人高效铣削相关的动力学框架,如图3所示。

1 重载机器人动态特性建模与预测

获取重载机器人末端执行器的动态参数,是评估其动态性能和预测铣削过程稳定性的先决条件。重载机器人的机械结构(涵盖结构设计、杆件的质量与惯性、关节间隙和柔性);材料属性(如密度、弹性模量、阻尼等);驱动与控制系统(包括驱动器性能、控制算法和传感器精度);负载情况(如负载质量与重心、负载特性)等,均会对其末端执行器的动态参数产生显著影响。与传统数控机床相比,重载机器人具有更多自由度,其末端执行器的动态特性会受机器人姿态的显著影响,每种姿态都对应着特定的动态特性和稳定条件^[14-17]。目前,表征重载机器人末端执行器动态参数最有效的指标是频响函数(Frequency response function, FRF)或模态参数,二者均为机器人姿态的函数^[18]。经过众多学者的不懈努力,一系列获取机器人末端执行器动态特性(频响函数)的思路和方法相继被提出,主要包括试验模态分析(Experimental modal analysis, EMA)法、多体动力学法、有限元分析(Finite element analysis, FEA)法以及传递函数耦合子结构分析(Receptance coupling substructure analysis, RCSA)法。

1.1 试验模态分析法

试验模态分析方法是针对实际对象施加激励,借助高精度传感器测量其响应,再经数据处理与分析,获取系统频响函数,或获得以固有频率、阻尼比、振型等为表征的模态参数的实测方法。该方法能够全面、直观且基于真实物理系统,反映被测对

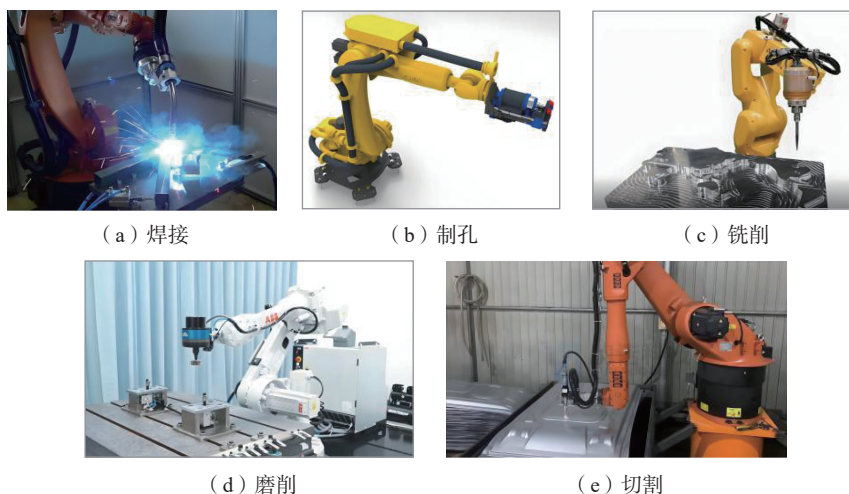


图1 重载机器人加工应用场景

Fig.1 Application scenarios of heavy-duty robots in machining

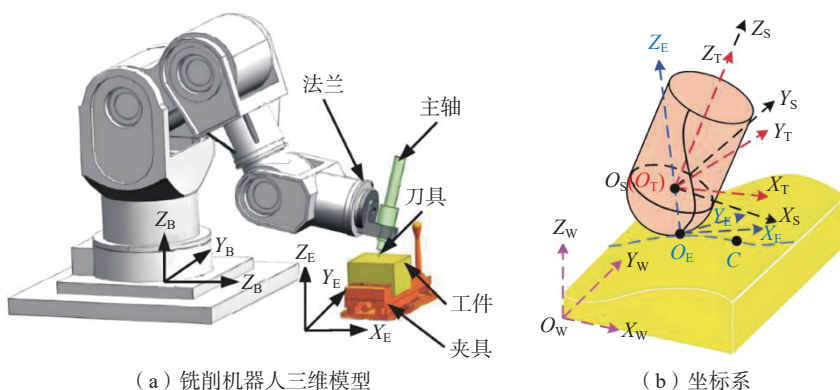


图2 铣削机器人加工系统示意图^[8]

Fig.2 Schematic diagram of milling robot machining system structure^[8]

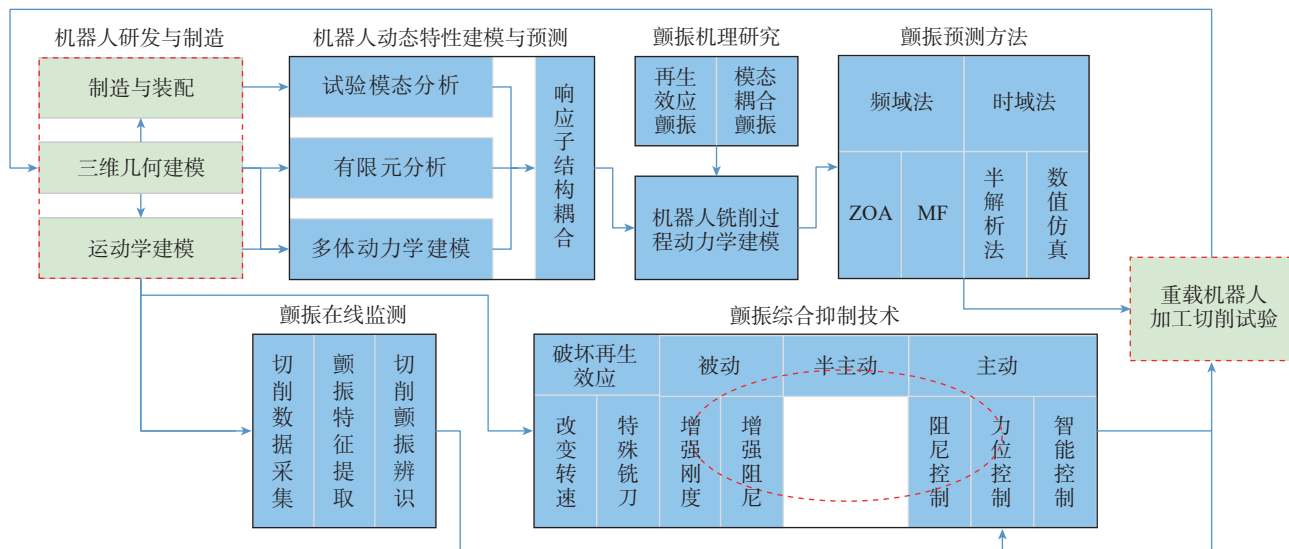


图3 重载机器人高效铣削动力学框架

Fig.3 Heavy-duty robot efficient milling dynamics framework

象的整体动态特性。重载机器人的结构具有复杂性和高度非线性特征,且存在材料特性不均匀、装配误差等难以精确建模的因素。试验模态分析方法直接基于实际物理系统开展测试,无需依赖精确的理论模型,能够反映机器人真实的动态特性,因此具有较高的可信度。

韩启超等^[19]借助仿真软件构建了涵盖机器人刚度特性的刀尖频响函数预测模型,并通过锤击试验验证了该模型的有效性,实现了机器人末端刚度约束条件下刀尖频响函数的精准预测。然而,该模型存在一定局限性,未考虑主轴速度效应以及铣刀悬长、磨损等因素的影响。Mejri等^[20]针对配备高速主轴的重载机器人开展试验模态分析,采用 Altintas 等^[21]提出的零阶频率方法,实现了机器人铣削稳定性叶瓣图的精确预测。余倩倩等^[22]采用 LMS-Test-Lab 对机器人加工系统进行模态试验,在获取加工平面内有限位姿点刀具末端频响函数的基础上,利用随机森林方法实现了对机器人加工系统模态参数的预测,预测精度可达到 80% 以上。

在需要对机器人动态性能进行实际工况评估、预测加工稳定性等场

景下,试验模态分析能够在真实负载、环境等条件下开展测试,所获数据与实际应用关联性强,具有较高的可信度^[23]。然而,该方法的局限性也较为显著:(1)试验模态分析易受多种因素干扰,如测试设备精度不足、测试环境存在干扰、激励方式选择不当、激励位置设置不合理等,这些因素均可能导致测量误差;(2)机器人在加工轨迹上的位姿变化幅度可能较大,且刀具与刀柄存在不同组合形式,使测试工作量大、测试时间冗长且测试成本高昂。因此,该方法并不适用于对设计迭代速度有较高要求的场合。

1.2 多体动力学法

机器人作为典型的多体系统,由多个连杆、关节和末端执行器等部件组成。多体动力学能够综合考虑这些部件的形状、尺寸、质量分布,以及要素之间的连接方式(如转动副、移动副等),进而构建精准的机器人多体动力学模型。通过该模型,可实现对机器人在不同运动状态下末端动态特性的预测。常见的多体动力学建模方法包括牛顿-欧拉(Newton-Euler)法、拉格朗日(Lagrange)法、凯恩(Kane)法和图论方法,这些方

法各具独特优势,适应于不同的应用场景。

Newton-Euler 法将机器人关节视为刚体,首先分析相邻杆件间的运动状态传递情况,再借助坐标系的相对位置及其转换关系,获取连杆的运动和状态信息,随后通过逐个递推,进而得到完整的动力学方程。该方法适用于自由度较低的刚性系统。胡文洪等^[24]采用 Newton-Euler 法,推导并建立了考虑末端负载影响的六轴重载机器人动力学模型,进而计算出机器人各关节的驱动力矩。姚祥等^[25]采用该方法推导得到考虑关节摩擦力的六自由度重载机器人刚体动力学数学模型,完成了动力学模型参数的线性化和参数重组,得到了关于最小可辨识动力学参数集的线性模型。该方法物理意义清晰,但计算量较大。

Lagrange 法基于能量平衡原理,通过系统动能与势能的关系推导动力学方程,尤其适用于复杂多体系统。李飞腾^[26]基于拉格朗日刚体力学,结合串联机械臂刚体动力学与流体传动原理,构建了机械臂刚体动力学方程,并依据相关原理建立了机械臂动力学数学模型、液压传动系统、

液压缸摩擦力及液压机器人完整动力学数学模型。王渴健等^[27]基于拉格朗日法构建了柔性关节机器人动力学模型,为后续轨迹精度提升算法的研究及仿真分析奠定了基础。该方法在求解过程中可避免运动学角速度和角加速度的求解,推导过程相对简单,但建模过程较为繁琐。

Kane法是Kane教授于1978年提出的一种动力学建模新方法。该方法通过使系统的广义惯性力与广义主动力之和为零,得到多个含参数的方程组,尤其适用于多自由度机器人系统的建模。郑铭^[28]运用Kane方法构建了接触网吊柱安装重载机器人的刚柔耦合动力学模型。商德勇等^[29]基于Kane法和增广拉格朗日乘法建立了系统刚柔耦合动力学方程,该方法不仅减少了计算量,还提高了计算效率,为提升机器人动态控制性能提供了理论依据。Kane法的计算过程具有系统性,能够减少不必要的繁杂微分运算,但推导过程较为抽象,物理意义不够明确,不利于计算机程序的编写。

图论在机器人末端动态特性建模领域发挥着关键作用。在拓扑层面,将机器人各部件抽象为由节点与边构成的图,能够直观呈现机器人末端与其他部分之间的连接和运动传递关系,为深入分析机器人末端的运动灵活性和可达范围提供助力。Shi等^[30]把线性图论与虚功原理相结合,成功将图论建模方法拓展至柔性多体系统的动力学分析中。Cheng等^[31]基于图论构建了六自由度工业机器人的无约束动力学方程,并利用拉格朗日乘法建立了约束动力学方程。仿真结果表明,所建动力学模型能够精准描述机器人的运动特性。芮执元等^[32]借助图论对高速重载工况下的多连杆结构铝锭码垛机器人进行了深入分析,明确了各关节运动与力之间的关联。在此基础上,结合虚功原理完成了码垛机器人的柔性

动力学建模。Wang等^[33]提出一种基于向量关联图法的动态建模方法,构建了考虑杆件柔性的Delta型刚柔耦合并联机器人多能量域全局动力学模型,并通过仿真软件验证了该建模方法的有效性与合理性。

图论在机器人末端动态特性建模方面具备显著优势,主要表现为直观性和系统性,能够清晰展现机器人的结构和运动关系,简化建模的复杂程度。然而,其局限性也较为明显,该方法本身过于抽象,对研究者知识储备要求较高,且模型精度在很大程度上依赖于图结构和参数的合理设置;此外,在处理大规模图或复杂约束问题时,计算复杂度会显著增加,可能会对建模效率产生不利影响。

1.3 有限元分析法

基于有限元思想,可将柔性结构离散为有限个单元和节点,通过理论计算得出各结构结合部的动力学参数,进而求解频率响应函数^[34]。随后,利用模态分析方法获取结构的固有频率与振型,为后续开展加工稳定性分析奠定基础。Law^[35]借助有限元方法,提出了一种高效计算方法,能够在设计阶段对机床的动态性能进行评估与优化,有效提高了机器人末端频响函数的预测效率。Mousavi等^[36-37]基于矩阵结构分析(Matrix structural analysis, MSA)理念,先利用ANSYS有限元软件开展模态分析,对MATLAB数值模型的参数进行初步标定;再通过模态试验完成未知参数的最终标定。

有限元分析法在预测机器人末端动态特性方面兼具优势与不足。核心优势为:(1)灵活性强,能够针对不同结构、复杂外形的机器人进行精确建模,且可综合考虑多种影响因素;(2)成本低廉,无需制造大量物理样机,能有效节省时间和资金成本;(3)多工况模拟,可快速模拟多种工况下机器人的频响特性,为设计优化提供丰富数据支持,还能在设计

阶段提前预测机器人性能,及时发现潜在问题。主要不足为:(1)建模复杂,有限元建模过程繁琐,需要依赖专业知识与丰富经验,模型精度在很大程度上受参数选取和假设条件的影响;(2)对于大型复杂模型,有限元分析对计算资源要求较高,且计算过程耗时较长;(3)有限元分析结果的可靠性需要通过试验进行验证,若试验数据不准确,将降低模型的可信度。

1.4 响应耦合子结构分析法

响应耦合子结构分析法是一种将复杂加工系统或大型结构分解成若干子结构的分析方法。该方法依据子系统间的耦合关系,推导结构末端等关键位置的频响函数。与传统方法不同,此方法无需提取子结构的模态参数,而是直接计算子结构的频响函数,进而获得整个系统的频响特性^[38]。响应耦合子结构分析方法可用于求解重载机器人末端的频响函数。基于此,能够实现加工参数的优化、结构动态性能的评估以及优化设计等目标^[39-41]。

陈守欢等^[42]分别针对关节和臂杆进行刚度建模,综合考虑臂杆自重和操作空间的影响,构建了六自由度铣削机器人整体刚度模型,并实现了机器人末端变形的预测。Chen等^[43]考虑刀柄与刀具的耦合效应,运用有限元分析法获取铣刀的动力学参数,再通过二叉树RCSA方法计算与铣削机器人姿态相关的刀尖频响函数。该方法可快速预测任意姿态下刀尖点频响函数,避免重复试验,但预测准确性高度依赖初始测量值的精度。基于上述研究,叶松涛等^[44]提出机器人刀尖频响函数的试验预测方法,利用非线性最小二乘法确定加权系数,通过叠加一定数量不同姿态下的机器人频响函数,得到特定姿态的频响函数预测值,既减少试验数量,又提升了预测精度与稳定性。

然而,上述获取机器人末端频响

函数的研究均未考虑结合面刚度。梁志强等^[45]基于欧拉-拉格朗日法和吉村允孝单位面积法,构建了机器人本体动力学模型与主轴-刀柄结合面接触刚度模型(图4),并依据有限元主副自由度理论将二者耦合,建立了机器人铣削系统刀尖频响预测模型,预测误差控制在9.8%以内。但结合面参数辨识难度较大,该方法距工程应用仍有差距^[46]。赵万华等^[47]提出了考虑刀具-夹套、夹套-刀柄以及刀柄-主轴结合面接触特

性的主轴转子系统动力学解析建模方法,解决了传统方法通用性差的问题,不过该方法需借助有限元仿真与试验模态分析获取刀柄、刀具及主轴端的频响,工作量较大。

RCSA 法具有精确的解析表达式,计算复杂度低,可通过有限元仿真与试验法相结合获取子结构频响函数。但是在对机器人铣削系统进行频响预测时,多数研究^[48-51]将末端主轴系统的结合面假定为刚性连接。Altintas 等^[49]指出,若视主轴-

刀柄结合面为柔性,会对系统频响函数产生显著影响,因此建模时不应简单将加工系统整体简化为刚性连接。

综上,当前预测机器人末端频响的各类方法,普遍难以兼顾效率与准确性。

2 重载机器人铣削加工稳定性分析

自由振动、强迫振动和自激振动(颤振)^[52-54]是切削加工中客观存在的现象。颤振作为刀具与工件间的自激振动,源于系统动力学特性与切削力的相互作用。鉴于重载机器人刚性较弱,若切削参数选取不当,其铣削过程中极易引发颤振^[55]。轻则导致工件表面产生振纹,降低表面质量与尺寸精度;重则损坏刀具、机器人轴承等部件^[56],如图5所示。因此,避免加工颤振是重载机器人工程应用中的关键问题^[57-58],对重载机器人铣削过程进行动力学建模,通过求解模型得到稳定性叶瓣图,进而依据该图选取切削参数,最终实现无颤振高效铣削,是有效的解决方法。

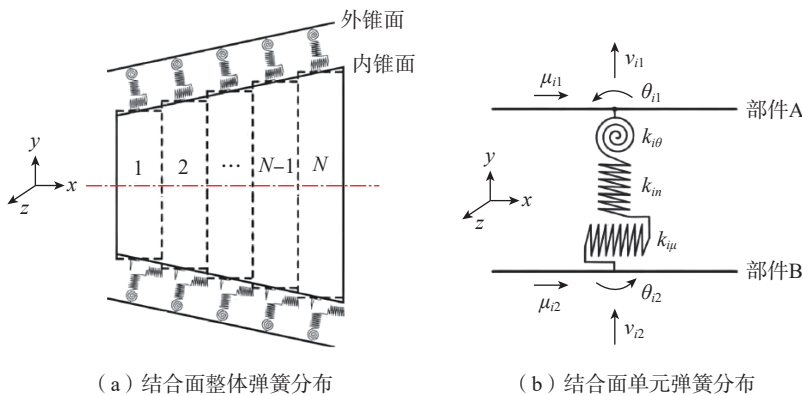


图4 主轴刀柄结合面接触刚度模型^[45]
Fig.4 Contact stiffness model of spindle-toolholder interface^[45]

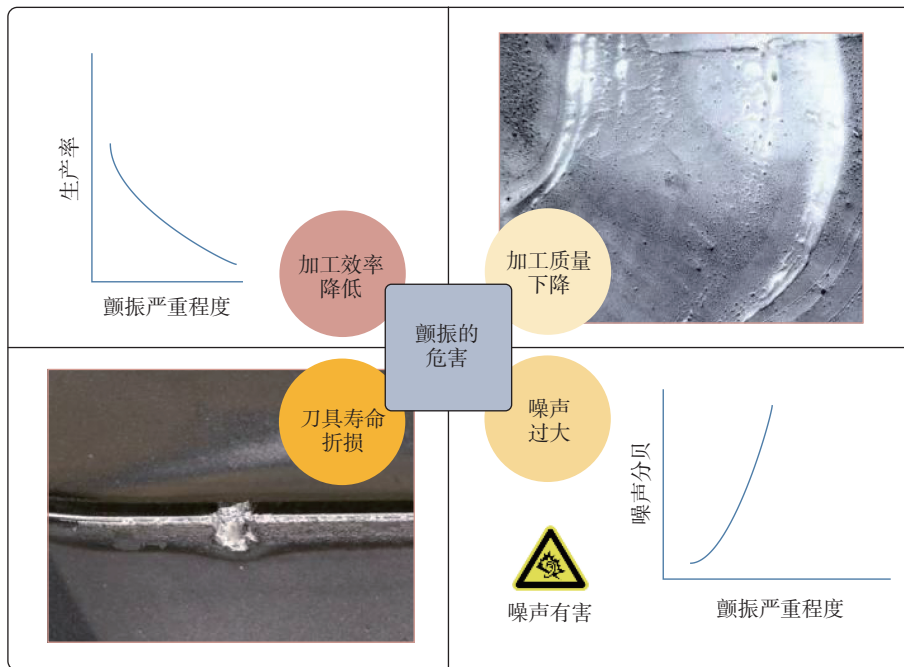


图5 颤振的危害
Fig.5 Hazards of machining chatter

2.1 机器人铣削颤振机理

Thusty^[59] 和 Merritt^[60] 等明确指出, 颤振主要分为再生型颤振和模态耦合型颤振两类, 如图 6 所示。在切削作业中, 当刀具沿前次切削形成的带波纹表面进行后续切削时, 两次连续切削所产生的波纹存在相位差, 这会导致切屑厚度与切削力呈周期性变动^[55]。该变化将引发刀具与工件之间持续且不稳定的振动, 此现象即为再生型颤振。与之不同, 模态耦合型颤振的产生机理为推力方向的振动诱发切削力方向的振动, 或切削力方向的振动引发推力方向的振动。在传统数控加工中, 机床的高刚度使得模态耦合型颤振极少出现, 因此研究人员的关注重点主要集中在再生型颤振上。在机器人加工过程中, 由于

机器人结构刚度较低, 模态耦合型颤振可能在再生型颤振出现之前就发生^[61]。可见, 机器人加工中的颤振问题更为复杂, 因此提升机器人加工稳定性成为近年来的重要研究方向。

在机器人加工过程中, 再生型颤振与模态耦合型颤振均可能发生。部分研究表明, 再生型颤振先于模态耦合型颤振出现^[62-63], 且后者在高刚度数控机床中鲜有发生。Zhang 等^[64] 采用不同刀具对两类颤振的发生规律展开研究, 发现使用长柔性刀具时易出现再生型颤振, 使用短刀具时则出现模态耦合型颤振。具体而言, Tobias^[65] 指出, 加工系统动刚度不足是引发颤振的重要原因, 当局部结构刚度不足以抑制再生反馈机制时, 会发生局部再生型颤振; 而当机器人

整体结构刚度未显著高于加工工艺刚度时, 会发生模态耦合型颤振。因此, 在颤振研究中, 确定机器人刚度和工艺刚度至关重要, 二者直接决定机器人加工过程中颤振的发生与否。现有部分结论存在矛盾之处的是, Celikag 等^[66] 提出, 机器人高速加工中仅存在再生型颤振, 且该颤振是导致高速铣削不稳定的重要因素之一。

综上, 再生型颤振通常仅发生在加工区域、主轴-刀具系统及工件部位, 而模态耦合型颤振会导致整个机器人产生振动。颤振的影响因素总结见表 1。

2.2 再生型颤振稳定性分析

稳定性叶瓣图是分析再生型颤振的最有效工具, 该图以主轴转速为自变量、临界轴向切削深度为因变量, 绘制出区分稳定切削与不稳定切削(颤振)状态的边界曲线。基于此, 可确定特定的参数组合^[74], 进而实现无颤振高效加工^[75]。通过对重载机器人加工系统进行动态特性参数建模与预测, 能够精确获取机器人末端执行器的频响函数; 在此基础上, 选用适宜的稳定性求解方法^[76], 即可推导得到稳定性叶瓣图, 具体分析流程如图 7 所示。颤振稳定性求解方法主要分为频域法和时域法两类。

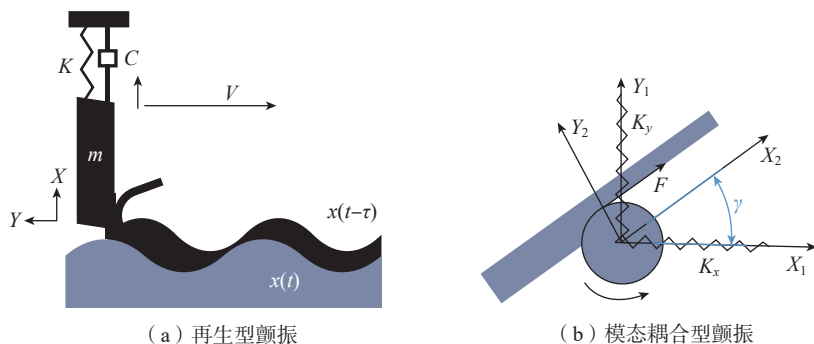


图 6 两种主要类型颤振机理
Fig.6 Mechanisms of two main types of chatter

表 1 机器人铣削颤振机理及影响因素分析

Table 1 Analysis of mechanism and influencing factors of chatter in robotic machining

颤振类型	影响因素	具体影响
再生型颤振	主轴转速	随着主轴转速的增加, 稳定和 unstable 加工区域交替出现, 而颤振的强度与主轴转速呈非线性关系 ^[67-68]
	进给速度	随着进给速度的增大, 切削面积增加, 抗变形能力增强, 从而导致颤振现象加剧 ^[69]
	切削深度	切削深度越大, 切削面积和切削力越高, 振动现象越严重 ^[70]
模态耦合型颤振	刚度	刚度越高, 结构对颤振的抵抗能力越强 ^[71]
	主轴转速	主轴转速越快, 刀具的温度越高, 切削力越小, 颤振现象也越不明显 ^[67, 72]
	进给速度	进给速度越快, 切屑越厚, 切削力越大, 振动也越剧烈 ^[69]
	切削深度	切削深度越大, 切屑厚度也越大, 切削力也越大, 产生的振动(即颤振)也越剧烈 ^[70]
	工具悬垂	工具悬伸长度越长, 其吸收一定量颤振能量的灵活性就越大 ^[67]
	工件材料硬度	工件的硬度越高, 其抗变形能力越强, 加工过程中单位切削力越大, 产生颤振的可能性也越高 ^[73]
切削模式	在上向铣削中, 主要的切削力是向上的, 有抬起工件的倾向, 且更容易产生颤振 ^[71]	



图7 重载机器人铣削加工稳定性分析流程

Fig.7 Flowchart of stability analysis for heavy-duty robot milling

频域法又称解析求解法,核心是将时变周期方向力系数展开为傅里叶级数时,仅考虑有限项谐波。当仅考虑直流分量时,该方法被称为零阶近似法 (Zero-order approximation, ZOA),由 Altintas 等^[77]首次提出。该方法求解速度快,但预测精度相对较低,尤其不适用于径向切深较小的场景;若考虑多项谐波,则称为多频率法 (Multi Frequency, MF),由 Medor 首先提出。由于该方法纳入了傅里叶级数中的多项谐波成分,其预测精度较零阶近似法有所提升^[78]。

时域法通过将连续时间变量离散化,依据初始条件确定时间增量,再通过迭代求解获得近似解。只要合理设定时间增量,该方法便可达到较高的求解精度。根据时间变量离散化方法的不同,时域法可分为半离散法 (Semi-discretization method, SDM)^[79-80]、全离散法 (Full-discretization method, FDM)^[81-83]和数值仿真法 (Numerical simulation method, NSM)^[84],具体内容如图8所示。相较于 ZOA 法,上述3种时域法各有特点:SDM 法显著提升了稳定性预测精度,适用于小径向切深铣削,但计算量明显增加;FDM 法同时对状态项、时滞项和参数项进行离散化处理,既保证了预测精度,又提高了收敛效率。NSM 法考虑了铣削过程中非线性因素的影响,预测精度高,求解效率取决于时域稳定性判据。

Hao 等^[85]考虑再生效应,对铣削机器人开展模态试验,采用 ZOA

法获取稳定性叶瓣图;通过高速槽铣试验对该图进行验证,结果表明预测误差主要源于低频模态。Li 等^[86]运用 ZOA 法预测机器人铣削的稳定性叶瓣图,并设计了12组铣削试验,验证了该图对切削参数选择的指导作用。Zhao 等^[87]提出了一种适用于多机器人协同铣削系统的颤振稳定性预测方法,利用零阶近似法求解模型并获取稳定性叶瓣图,进而实现了该系统的切削参数优化。Xie 等^[88]基于机器人结构参数、铣削刚度及刚度矩阵,构建六轴铣削机器人颤振的时域微分方程,求解得到该机器人在不同加工参数下4种加工姿态的稳定区域。Zhang 等^[89]建立考虑模态耦合效应与再生效应的动力学方程,采用有限差分法构建六自由度机器人的颤振稳定域模型;通过选取合适铣削参数,有效抑制了铣削颤振,提升了工件加工质量。Ji 等^[90]提出

一种改进的 FDM 法用于获取机器人铣削稳定性叶瓣图,推导得到与轴向切削深度、主轴转速、导角和倾角相关的稳定性叶瓣图。

2.3 模态耦合型颤振稳定性分析

模态耦合颤振是一类特殊的颤振现象,由系统内多个模态间的相互耦合引发。对该类颤振进行预测时,需重点关注系统的模态特性,可通过解析法与试验法获取系统各阶模态参数,进而深入分析这些模态间的耦合关系。考虑到机器人的模态耦合颤振主要出现在低阶模态,因此该预测方法,与低速加工时求解单个低阶模态特性所采用的解析方法一致。

金永乔等^[91]构建了机器人铣削模态耦合动力学模型,并运用 Newmark- β 逐步积分法验证了该模型的稳定性预测结果。高建^[92]提出一种用于稳定性预测的模态耦合方法,旨在解决薄壁零件铣削中多模态

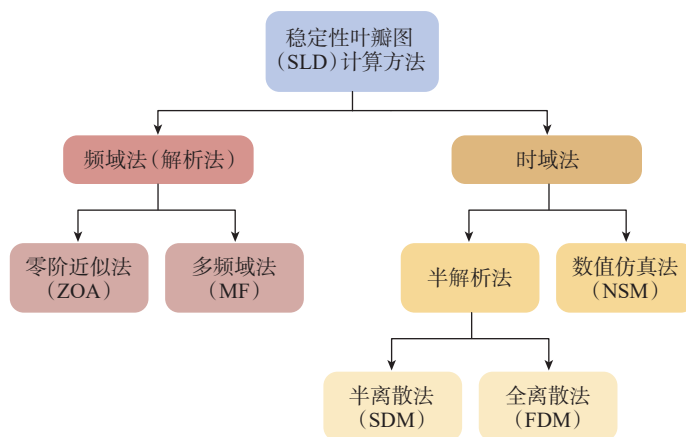


图8 稳定性叶瓣图 (SLD) 计算方法

Fig.8 Stability lobe diagram (SLD) calculation method

耦合效应,最终得到精确的稳定性叶瓣图。Gienke等^[93]开发出适用于机器人加工场景的颤振预测工具,该工具可准确预测模态耦合颤振。为消除输入参数随机性对预测结果的影响,Wang等^[5]将可靠性概率方法引入骨科手术机器人铣削模态耦合颤振预测中,提出采用模态耦合颤振可靠性圆图来区分加工的稳定与不稳定区域。

现有文献中,关于机器人模态耦合颤振的预测研究较为有限,当前主要的预测方法包括动态模态解耦与可靠性分析法。动态模态解耦法能够实现颤振解耦且可降低计算复杂度,但该方法的预测模型较为复杂,涉及大量参数与模态数据,导致模型构建和求解难度较大,同时对参数准确性要求严苛,关键参数的误差会直接影响预测结果的可靠性。Du等^[94]通过试验模态分析发现,重型机器人主轴-刀具结构的动态刚度远高于机器人本体。采用特征值法和零阶近似法构建预测模型,并与试验结果进行对比,结果表明,高速加工区仅出现高频颤振,低速加工区存在围绕本体模态的低频颤振,这一现象无法用经典理论解释,且研究表明重型机器人铣削颤振的主导机制为再生颤振。

3 机器人铣削颤振在线监测

离线预测模式下,一旦检测到颤振迹象,需即刻停止加工操作,由工作人员手动调整加工参数以规避颤振发生。这一模式下,实时应对加工状态的骤然变化不仅颇具挑战,还会导致加工效率显著降低^[95]。针对上述问题,颤振在线监测技术得以蓬勃发展。该技术借助计算机、传感器等设备,实时采集加工过程中的相关数据并传输至计算机监测中心进行处理,进而实现对颤振的在线识别^[96]。具体而言,在线颤振监测过程包含三个关键步骤:加工状态信号采集、颤振特征提取以及颤振识别^[97]。

3.1 机器人加工颤振信号采集

获取与机器人加工颤振相关的信号是颤振监测的首要任务。目前,常用的信号采集方法主要包括外部传感器采集法、基于可编程逻辑控制器的采集法(PLC)和通信接口采集法^[98]。其中,外部传感器法用于获取无法从加工设备直接提取的外部物理信号;PLC采集法适用于不具备通信接口的设备,可实现其内部信号的采集;通信接口采集法能够便捷获取设备系统中的相关数据。在上述3种采集方法中,外部传感器采集法是机器人加工颤振监测信号的主要采集手段。

颤振监测中常用的信号类型主要包括切削力信号、振动信号、加速度信号、声音信号、电流信号、视觉信号和声发射信号等^[99-102],每种信号类型均有其独特优势与局限。由于单一信号存在局限性,为提升颤振监测的准确性与鲁棒性,可依据信号特征采用多传感器融合策略,该策略能有效降低信号的冗余度与相互干扰,进而提高颤振监测结果的准确性^[103]。

然而,在实际运用多传感器融合方法采集并处理颤振信号时,选择适宜的传感器组合颇具挑战。因此,需综合考量加工类型、信号频率及颤振机理,制定科学合理的传感器配置方案,这对于提升信号可靠性和颤振监测精度至关重要。

3.2 机器人加工颤振特征提取

颤振特征提取方法通常可分为时域分析、频域分析和时频分析3类^[104]。时域分析以时间为自变量,分析评估信号随时间变化规律,该类方法直观、简洁。王涛等^[105]构建融合能量熵、质心频率与形状因子的多源特征分类模型,实现了对纵扭机器人超声侧铣颤振的精准监测。籍永建等^[106]借助功率谱熵表征铣削振动信号特征,采用原始信号标准差描述机器人铣削振动信号的时域特征,并基于特征向量建立机器人铣削颤振自适应

识别模型。频域分析通过傅里叶变换进行时频转换,常用方法包括频谱、倒频谱、阶比谱、全息谱和功率谱分析等^[107]。然而,多数加工振动信号具有非线性、非平稳特性^[108],仅依靠时域或频域分析时,由于在颤振形成初期冲击能量较弱,难以对颤振进行准确识别,因此亟需新的分析方法。

时频分析方法丰富多样,当前小波变换、经验模态分解和变分模态分解等方法已被广泛应用于机器人加工过程颤振的在线监测。Cen等^[109]设计了基于离散小波包变换的在线监测算法,该算法可有效识别机器人铣削中的颤振。董辉跃等^[110]运用经验模态分解技术,将压脚位移信号分解为一系列本征模态函数与残差,再通过希尔伯特变换得到原始信号的瞬时频率与幅值,最终采用统计方法实现铣削颤振的识别。孙连军等^[111]提出一种基于自适应变分模态分解和功率谱熵差的机器人铣削过程颤振识别方法,该方法可有效识别并区分模态耦合型颤振与再生型颤振。

应当注意的是,上述特征提取方法大多源于传统机床加工领域,但机器人加工与传统机床加工在颤振主导机理、发生位置及特征频率等方面存在显著差异。若将这些方法直接应用于机器人加工颤振的特征提取,可靠性较低。因此,开展适配机器人加工特点的特征提取方法研究,面临诸多重大挑战。

3.3 机器人铣削颤振辨识

颤振识别是在线颤振监测的核心环节,其主要目的是对加工状态进行分类。当前的颤振识别方法可分为基于阈值的方法和基于模型的方法^[97]。基于阈值的方法将颤振引起的能量频移与能量指标相结合,设定经验阈值作为识别标准;基于模型的方法则利用原始数据训练机器学习模型,通过模型实现数据分类,该方法可进一步细分为人工神经网络

络、隐马尔可夫模型、支持向量机、随机森林、聚类分析等子方法。由于操作简单且响应迅速,基于阈值的方法在机器人加工颤振领域得到广泛应用^[112-113]。正因为这些特点,当前机器人加工颤振的在线识别面临诸多问题:例如预警提前时间过短,可能导致参数调整完成之前工件已受损;此外,加工过程中刀具磨损与工件刚度的变化,会降低固定阈值识别的准确性。因此,如何引入动态加工数据以实时计算动态阈值,进而提高机器人加工颤振识别的准确性,已成为未来亟待解决的关键问题。

4 机器人铣削颤振抑制

考虑到重型机器人的特殊性,尽管多数情况下通过稳定性叶瓣图选择切削参数可有效抑制颤振,但该方法仍存在两方面问题:其一,重载机器人加工位姿具有多样性,导致准确预测不同工况下的稳定性叶瓣图难度较大^[114];其二,重载机器人刚度较低,需采用综合颤振抑制技术才能实现无颤振高效铣削。这类综合技术通常包括:增强机器人加工系统(含机器人本体、主轴-刀具子系统、工件-夹具子系统等)的刚度和阻尼,以及采用适宜的控制策略抑制颤振。如图9所示,机器人铣削颤振抑制技术主要涵盖^[115-116]:(1)颤振主动抑制;(2)颤振被动抑制;(3)颤振半主动抑制。

4.1 机器人铣削颤振主动抑制

颤振主动抑制是机器人加工过程中颤振抑制的关键手段。该技术借助智能结构感知加工系统的动态变化,再通过优化控制调节智能结构的形状、刚度、阻尼等特性,进而改变主体结构的力学性能,最终实现对颤振的主动抑制。具体而言,其典型方法包括阻抗控制、混合力/位置控制、基于智能材料的控制及复合控制策略^[117]。

阻抗控制是调节机器人与外部环境动态交互的策略性方法。通过调整系统等效阻抗,使系统在面对外部干扰时呈现期望的动态特性,进而有效抑制颤振。为解决单一阻抗控制的局限性,Dai等^[118]提出将传统力控制与阻抗控制相结合的阻抗匹配控制策略,将阻抗匹配纳入核心控制策略,以克服单纯依赖阻抗控制的不足。此外,针对传统机器人控制难以同时平衡瞬态接触超调与稳态力跟踪误差的问题,Cao等^[119]设计了动态自适应混合阻抗控制器。该控制器可有效避免机器人加工接触过程中的力超调现象,同时降低动态跟踪阶段的跟踪误差。

由于阻抗控制在响应速度和控制精度上存在局限性,难以直接应用于高精度加工工况。为此,Mason^[120]和Raibert等^[121]提出混合力/位置控制方法。该方法借助雅可比矩阵,将工作空间任意方向的力矩阵与位置矩阵映射至各关节扭矩控制,显著提

升了控制精度。随后,丁毓峰等^[122]研发出基于位置的混合力/位置控制方法,采用比例-积分(PI)控制器获取法向量方向的轨迹校正量,间接实现抛光机器人的混合力/位置控制,有效抑制了机器人抛光过程中的颤振。

智能结构控制作为机器人铣削颤振的主动抑制手段,智能结构兼具传感器与执行器功能,可借助优化控制方法调节自身形状、刚度和阻尼,实现对颤振的主动抑制。王海等^[123]提出一种基于压电陶瓷的柔性机器人主动颤振抑制策略,采用可变控制方案的颤振抑制器,可对不同频率的颤振进行抑制。为实现机器人飞盘抛光过程中接触力控制与颤振抑制,Chen等^[124]研发了一种新型智能末端执行器,集成了重力补偿器、比例-积分控制器和两个涡流阻尼器。

4.2 机器人铣削颤振被动抑制

重载机器人铣削颤振的被动抑制,主要通过外部装置来增强机器人系统鲁棒性,或借助内部结构间的相对运动来控制颤振。其中,优化机器人加工行为,为加工系统安装辅助装置以提升系统刚度,是被动抑制颤振的有效途径。Palpacelli^[125]提出一种利用冗余驱动装置的方法,可显著增强机器人末端执行器的刚度和静态特性。针对飞机起落架相交孔的精加工难题,方强等^[126]提出了一种基于压脚的机器人加工颤振抑制方案。

机器人的刚度与其加工位姿紧密关联,因此可通过优化加工姿态、走刀方向和加工轨迹等措施实现颤振抑制。在加工姿态优化方面,Ye等^[127]提出基于机器人功能冗余角的优化方法,通过调整并优化机器人加工姿态,间接改变切削方向与主刚度方向的夹角,最终达到抑制模态耦合颤振的目标。Gao等^[128]则通过建立铣削力与机器人主刚度的耦合模型,提出一种考虑功能冗余特性的机器人铣削稳定性指标,提升了机器

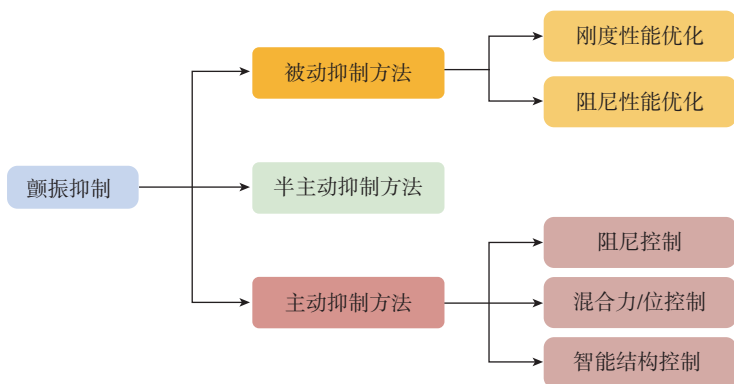


图9 机器人铣削颤振抑制技术与方法

Fig.9 Chatter suppression techniques and methods for robotic milling

人的铣削稳定性。在走刀方向与加工轨迹优化方面, He 等^[129] 开发出基于刚度定向过程的机器人铣削路径优化算法, 经优化后的加工轨迹能有效抑制模态耦合颤振的产生。Liao 等^[130] 提出基于区域划分的刀具路径生成方法, 通过对加工区域进行子区拆分, 优化各子区域的走刀方向, 有效提升了机器人的刚度。此外, 通过合理优化机器人加工布局、工件夹紧位置以及切削参数等, 也可在一定程度上抑制加工颤振的发生^[131-132]。

另一种方式是在机器人上安装阻尼器或减振器, 以增强其减振能力。陆锋等^[133] 为抛光机器人设计了具备阻尼与颤振抑制功能的工具头, 并验证了其对加工颤振的抑制效果。Xu 等^[134] 设计了一种被动减振器, 利用永磁体和移动阻尼块产生的排斥力形成阻尼效应, 抵消机器人抛光过程中的振动能量, 进而提升被抛光工件的表面质量。Chen 等^[135] 在铣削机器人的主轴系统中集成了新型涡流阻尼器, 以减少刀具刀尖处的颤振幅值, 试验结果显示该阻尼器的颤振抑制效果显著。Zhang 等^[136] 提出基于阻抗模型的多目标可变振动特性优化方法, 该方法可显著降低并联机器人铣削过程中的加工振动。

总之, 颤振被动抑制方法虽能有效抑制颤振, 但有明显局限性。通过安装辅助装置及优化加工操作增强机器人刚度特性时, 会限制其工作空

间, 降低加工灵活性。此外, 阻尼器和减振器受阻尼组件限制, 仅能在固定激励频率范围内发挥作用, 当颤振频率超出其工作频率范围时, 减振性能大幅下降。并且, 该方法因缺乏对环境突变的应对能力, 无法主动适应机器人加工中颤振激励的变化。因此, 该方法仅适用于颤振成分简单、颤振源相对稳定的加工条件。

4.3 机器人铣削颤振半主动抑制

机器人加工颤振的半主动抑制是一种介于被动抑制与主动抑制之间的控制方式。仅需消耗少量外部能量, 通过传感器实时监测振动状态, 并依据反馈信息调整系统内可变阻尼器、可变刚度装置等的参数, 随后通过结构自身的振动耗散能量以抑制颤振。

基于磁流变弹性体 (Magnetorheological elastomers, MRE) 的半主动抑制器, 具有结构简单、操作便捷、响应时间短等特点, 且刚度和阻尼可连续调控, 相关研究已广泛而深入^[137]。Yang 等^[138] 研制出基于 MRE 的半主动动态减振器, 可有效控制轴向振动, 其减振性能优于传统被动减振器。Yuan 等^[139] 设计了基于 MRE 的半主动减振器, 并将其应用于机器人加工中, 当输入电流大小适中时, 该减振器可有效缓解机器人铣削过程中的模态耦合颤振。Meng 等^[140] 则将旋转超声加工技术应用于机器人铣削颤振抑制, 通过调节超

声电流精确控制铣刀振幅, 减小动态切削层厚度并改变外部激励方向, 从而实现颤振抑制。

然而, 半主动颤振抑制受特定加工条件的约束, 其在实时响应与自适应调整方面的能力有限。相较于被动颤振抑制技术, 半主动颤振抑制尚未展现出显著优势。不过, 随着旋转超声加工技术在机器人颤振抑制领域逐渐显现成效, 该技术的进一步突破有望成为推动半主动颤振抑制技术在机器人加工领域实现广泛应用的关键。

上述机器人加工颤振抑制策略的优缺点对比见表 2。可知, 3 种颤振抑制策略均具有优势与不足。在更为复杂的实际加工条件下, 单一的抑制策略通常难以达到预期的颤振抑制效果。基于此, 综合上述抑制策略的原理, 可构建一种融合数字孪生 (Digital twin, DT) 技术的虚实融合赛博物理系统, 在物理端通过智能传感器实现实时感知与多传感器信息融合, 为赛博端决策提供数据支撑; 在赛博端基于数据挖掘进行智能决策, 并将决策信息反馈至物理端以调控其运行状态。

在此基础上, 本文提出构建一个具备动态感知、实时分析、自主决策和精准执行功能的虚实融合赛博物理主被动混合颤振抑制系统。各功能模块的具体实现路径为:

- (1) 动态感知聚焦于机器人加

表 2 几种颤振抑制策略的对比

Table 2 Comparison of various chatter suppression strategies

抑制策略	能量消耗	特定措施	优点	缺点
被动	无	(1) 优化机器人结构并添加阻尼材料; (2) 安装减振器或阻尼器; (3) 优化工件夹紧方案	简单直接	(1) 降低机器人的灵活性及生产效率; (2) 工作范围固定; (3) 适应性差
主动	多	(1) 阻抗控制; (2) 力/位置控制; (3) 智能结构控制	(1) 更高的灵活性和鲁棒性; (2) 更高的柔顺性和控制精度; (3) 动态性能良好, 不受连接方式限制	能耗高、设备价格昂贵, 对传感器性能要求高
半主动	少量	安装半主动式吸振器	工作频率可调	缺乏实时响应和自适应调整能力

工系统关键状态信息,通过多传感器采集切削力、加速度、主轴电流、机器人关节转角等核心参数,从而实现加工状态的全面感知;

(2)实时分析基于感知数据进行特征提取与状态识别,重点分析切削力与加速度等信号的时域与频域特征,以定位颤振频域区间与能量分布,完成对颤振的精准诊断;

(3)自主决策以抑制颤振、提高效率为核心目标,通过调整切削参数、主动控制模块输出力矩、被动阻尼器的阻尼状态以及末端执行器的姿态等方式,确保决策指令与加工场景动态匹配;

(4)精准执行通过多执行单元协同执行决策指令,由伺服系统驱动关节完成末端执行器姿态修正,由主轴控制系统执行转速调整指令以实现转速的平滑切换,由液压/电磁执行机构调控被动阻尼器的阻尼状态,同步触发主动振动抑制模块输出反向激励力,形成“参数调整-姿态修正-振动抵消”的闭环执行机制。

该系统通过各模块的精准协同,为提升机器人加工颤振抑制效果提供了有效技术路径,详见图10。

5 结论

本文深入剖析了重载机器人在

机械加工领域的应用现状、潜在问题及解决策略,同时对其动态特性建模、铣削颤振预测与抑制的相关理论和方法开展了系统的文献综述,得出如下结论。

(1)重载机器人在机械加工领域具有显著优势和巨大应用潜力。其负载能力强、灵活性高,能承担大型工件的搬运、装卸及加工等复杂任务,可降低人力成本、提升加工效率;尤其在航空航天等高端行业,可实现高精度操作并减少加工误差。在实际加工场景中,重载机器人与传统设备形成功能互补,传统设备适用于高精度加工,重载机器人则更适合大型工件的搬运与粗加工。然而,其在高精度、高复杂度加工场景中的应用仍受限于动态性能不足,需通过提升动态性能以充分挖掘其在高端加工领域的应用潜力。

(2)构建高精度动态特性模型是精准预测重载机器人末端动态特性参数的核心。目前,主要采用试验模态分析法、多体动力学、有限元法、子结构响应耦合等方法构建动态特性模型,以获取末端频响函数或模态参数。但现有研究对整机的关节柔性、连杆弹性变形以及外部载荷的动态耦合效应考虑尚不充分。未来研究需重点关注上述因素,进一步完善

预测模型以提高预测准确性,进而支撑整机加工性能的提升。

(3)加工颤振严重影响机器人铣削加工精度、表面质量与加工效率。当前针对机器人加工稳定性的分析研究尚处于初级阶段,主要通过获取末端动态特性参数,构建铣削系统动力学模型,再通过时域或频域分析求解以获得稳定性叶瓣图,并据此优化切削参数以实现高效无颤振切削。该方法无需额外硬件投入,操作简便。

(4)单一切削颤振预测方法难以全面且准确地捕捉颤振特征与演化规律。综合运用基于动力学模型、信号处理、机器学习等多源融合的预测方法,可充分发挥各方法优势,提升颤振预测的准确性与可靠性。例如,动力学模型可用于揭示颤振产生机制,信号处理方法可有效提取颤振特征信息,机器学习方法则可学习颤振模式和演化规律。

(5)颤振综合抑制技术需通过多种手段协同作用实现,主要包括切削参数优化、机器人结构和刀具设计改进及主动控制策略应用。其中,切削参数优化可通过改变铣削系统动力学特性以降低颤振风险;刀具设计改进可提升刀具的切削性能与抗振能力;主动控制策略则通过安装振动抑制装置实现振动的实时监测与主

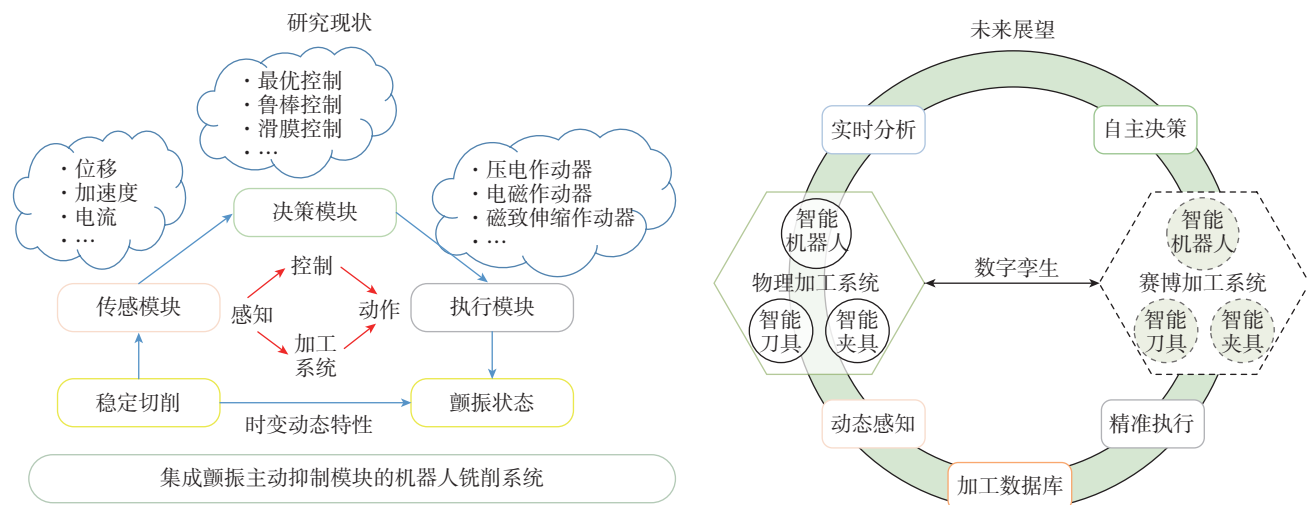


图10 机器人铣削颤振抑制现状与未来展望

Fig.10 Current status and future prospects of chatter suppression in robot milling process

动控制,以抵消颤振对加工过程的影响。实际加工中,可先通过参数优化,结合抗振刀具使用,并配合主动控制装置,以实现铣削颤振的高效抑制。

随着重载机器人在工业领域的应用愈发广泛且深入,通过改进机器人结构设计以提升其末端动态性能,并综合运用颤振抑制技术实现高效无颤振切削,已成为当前研究的重要方向。未来需重点在以下方面开展深入研究。

(1) 构建能准确反映重载机器人末端动态特性参数与位姿变换关系的时变预测模型,并确保模型具备良好的普适性。这对于精准预测和有效控制加工过程稳定性具有重要理论与应用价值。

(2) 鉴于重载机器人加工颤振机理与常规数控机床存在显著差异,需深入开展其加工颤振机理研究,这将为制定针对性抑制方法提供理论依据,进而提升加工精度与效率,完善机器人加工动力学理论体系,并促进机械工程、控制科学与智能制造等学科的交叉融合。

(3) 单一的颤振识别方法存在局限性,需系统开展重载机器人加工颤振的信号处理、特征提取、智能辨识及综合控制方法的研究,从而实现颤振的早期预警与主动抑制,提升加工精度、效率及机器人加工过程的稳定性。

(4) 探索数字孪生技术在重载机器人颤振综合抑制领域的应用,通过构建动态感知、实时分析、智能决策与精准执行为一体的虚实融合机制,实现赛博空间与物理实体的深度交互与融合,以提高生产效率和加工质量,为推动重载机器人加工向智能化、柔性化方向发展提供技术支撑。

参考文献

[1] 张新棋,董传杰,谢冬,等.基于KUKA重载机器人的柔性搅拌摩擦焊接系统开发与试验研究[J].宇航材料工艺,2024,54(1):79-85.
ZHANG Xinqi, DONG Chuanjie, XIE Dong, et al. Development and experimental research

of flexible friction stir welding system based on KUKA heavy duty robot[J]. Aerospace Materials & Technology, 2024, 54(1): 79-85.

[2] JI W, WANG L H. Industrial robotic machining: A review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(1): 1239-1255.

[3] 王战玺,张晓宇,李飞飞,等.机器人加工系统及其切削颤振问题研究进展[J].振动与冲击,2017,36(14):147-155,188.

WANG Zhanxi, ZHANG Xiaoyu, LI Feifei, et al. Review on the research developments of robot machining systems and cutting chatter behaviors[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(14): 147-155, 188.

[4] BOGUE R. The role of robots in the green economy[J]. Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application, 2022, 49(1): 6-10.

[5] WANG L W, LIU Y, YU Y, et al. Research on reliability of mode coupling chatter of orthopedic surgery robot[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 236(15): 8609-8620.

[6] 陈坤.机器人铣削加工动态响应分析与颤振机理研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.

CHEN Kun. Dynamic response analysis and chatter mechanism research in robotic machining processing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.

[7] 龙才荣.基于工业机器人的铣削自动化生产单元设计[J].自动化应用,2025,66(9):235-238.

LONG Cairong. Design of milling automation production unit based on industrial robots[J]. Automation Application, 2025, 66(9): 235-238.

[8] 李慧娟,许利君.面向机器人铣削加工表面形貌预测模型研究[J].机床与液压,2025,53(9):52-59.

LI Huijuan, XU Lijun. Research on surface morphology prediction model for robot milling processing[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2025, 53(9): 52-59.

[9] 潘雪婷,杨飞,耿中泰,等.柔性机器人刚度调制策略研究综述[J/OL].机械工程学报,2025.(2025-06-11)[2025-09-13].<https://link.cnki.net/urlid/11.2187.TH.20250610.2148.018>.

PAN Xueting, YANG Fei, GENG Zhongtai, et al. Review of flexible robot stiffness modulation strategies[J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 2025. (2025-06-11)[2025-09-13]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2187.TH.20250610.2148.018>.

cnki.net/urlid/11.2187.TH.20250610.2148.018.

[10] LI J, LI B, SHEN N Y, et al. Effect of the cutter path and the workpiece clamping position on the stability of the robotic milling system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89: 2919-2933.

[11] 陶波,赵兴炜,李汝鹏,等.机器人测量-操作-加工一体化技术研究及其应用[J].中国机械工程,2020,31(1):49-56.

TAO Bo, ZHAO Xingwei, LI Rupeng, et al. Research on robotic measurement-operation-machining technology and its application[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 49-56.

[12] DANG X B, WAN M. Prediction and suppression of chatter in milling of structures with low-rigidity: A review[J]. The Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology, 2021, 1(3): 2021010.

[13] 倪涛,赵亚辉,赵泽仁,等.6-UPRU并联机器人动力学建模及基本动力学参数确定研究[J].中国机械工程,2025,36(12):2911-2919.

NI Tao, ZHAO Yahui, ZHAO Zeren, et al. Dynamic modeling and base dynamic parameters determination research of a 6-UPRU parallel manipulator[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(12): 2911-2919.

[14] 赵飞.重载履带式爬壁机器人力学建模与仿真[J].机械设计,2025,42(2):148-154.

ZHAO Fei. Mechanical modeling and simulation of heavy-duty crawler wall-climbing robot[J]. Journal of Machine Design, 2025, 42(2): 148-154.

[15] KARIM A, HITZER J, LECHLER A, et al. Analysis of the dynamic behavior of a six-axis industrial robot within the entire workspace in respect of machining tasks[C]. 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Munich, 2017.

[16] TUNC L T, SHAW J. Experimental study on investigation of dynamics of hexapod robot for mobile machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(5): 817-830.

[17] 王进,王向坤,扶建辉,等.重载机器人横梁结构静动态特性分析与优化[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(1):124-134.

WANG Jin, WANG Xiangkun, FU Jianhui, et al. Static and dynamic characteristic analysis and structure optimization for crossbeam structure of heavy-duty truss robot[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(1): 124-134.

[18] SALAHSHOOR M, AHMADIAN

H. Continuous model for analytical prediction of chatter in milling[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(14): 1136–1143.

[19] 韩启超, 籍永建, 徐小康. 机器人-主轴系统耦合作用下的刀尖频响预测[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2024(7): 57–63.

HAN Qichao, JI Yongjian, XU Xiaokang. Prediction of the tool tip frequency response function for robotic milling system by considering the influence of Robot-Spindle coupling effect[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2024(7): 57–63.

[20] MEJRI S, GAGNOL V, LE T P, et al. Dynamic characterization of machining robot and stability analysis[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 82(1): 351–359.

[21] ALTINTAS Y, WECK M. Chatter stability of metal cutting and grinding[J]. *CIRP Annals*, 2004, 53(2): 619–642.

[22] 余倩倩, 张浩, 李宝红. 基于随机森林的磨削机器人加工系统模态特性预测[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2025(5): 44–47, 54.

YU Qianqian, ZHANG Hao, LI Baohong. Modal characteristics prediction of grinding robot processing system based on random forest[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2025(5): 44–47, 54.

[23] 李忠群, 夏磊, 彭岳荣, 等. 基于实验模态分析的铣削加工系统动力学特性参数测试与分析[J]. *湖南工业大学学报*, 2015, 29(4): 6–9, 25.

LI Zhongqun, XIA Lei, PENG Yuerong, et al. Dynamic characteristics test and analysis of milling system based on experimental modal analysis[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2015, 29(4): 6–9, 25.

[24] 胡文洪, 王宪, 彭兆鑫, 等. 面向智能化铸造生产线的重载机器人迭代学习轨迹跟踪控制[J]. *机械科学与技术*, 2025, 44(4): 581–591.

HU Wenhong, WANG Xian, PENG Zhaoxin, et al. Iterative learning trajectory tracking control of heavy-load robot for intelligent casting production line[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2025, 44(4): 581–591.

[25] 姚祥. 重载机器人刚柔耦合动力学建模与补偿控制方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.

YAO Xiang. Rigid flexible coupling dynamic modeling and compensation control for heavy-duty robot[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.

[26] 李飞腾. 多关节重载液压机器人末端高精度位姿控制与联合仿真研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.

LI Feiteng. High precision posture control and co-simulation for the multi-DOFs heavy-duty hydraulic robot system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.

[27] 王渴健. 刚柔耦合串联机器人的振动抑制与轨迹精度提升[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.

WANG Kejian. Vibration suppression and trajectory precision improvement of serial rigid-flexible robots[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024.

[28] 郑铭. 接触网吊柱安装重载机器人动态分析与结构优化[J]. *铁道建筑技术*, 2024(9): 17–19, 25.

ZHENG Ming. Dynamic analysis and structural optimization of heavy-duty robots for installing overhead contact wire suspension columns[J]. *Railway Construction Technology*, 2024(9): 17–19, 25.

[29] 商德勇, 黄欣怡, 黄云山, 等. 基于Kane方程的Delta并联机器人刚柔耦合动力学研究[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(7): 124–133.

SHANG Deyong, HUANG Xinyi, HUANG Yunshan, et al. Research on rigid-flexible coupling dynamics of Delta parallel robot based on Kane equation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(7): 124–133.

[30] SHI P F, MCPHEE J. Dynamics of flexible multibody systems using virtual work and linear graph theory[J]. *Multibody System Dynamics*, 2000, 4(4): 355–381.

[31] CHENG J, BI S S, YUAN C, et al. A graph theory-based method for dynamic modeling and parameter identification of 6-DOF industrial robots[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(22): 10988.

[32] 芮执元, 刘清辉. 高速重载码垛机器人柔性动力学建模[J]. *机械设计与制造*, 2020(12): 236–239.

RUI Zhiyuan, LIU Qinghui. Flexible dynamic modeling of the high-speed and heavy-load palletizing robot[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020(12): 236–239.

[33] WANG L L, XU W, GUO F, et al. Modeling and analysis of dynamics of rigid-flexible coupled parallel robots[J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(10): 5471.

[34] 李宇庭. 机器人多轴铣削刀尖频响快速预测及颤振稳定性分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.

LI Yuting. Rapid dynamics prediction of tool tip and analysis of the chatter stability in

robotic milling system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.

[35] LAW M, ALTINTAS Y, SRIKANTHA PHANI A. Rapid evaluation and optimization of machine tools with position-dependent stability[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 68: 81–90.

[36] 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.

[37] MOUSAVI S, GAGNOL V, BOUZGARROU B C, et al. Dynamic modeling and stability prediction in robotic machining[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(9): 3053–3065.

[38] 徐金波, 库祥臣, 苏春堂, 等. 响应耦合子结构法的轴类工件频响函数预测[J]. *机械设计与制造*, 2024(5): 320–324.

XU Jinbo, KU Xiangchen, SU Chuntang, et al. Prediction of frequency response function of shaft workpiece based on response coupling substructure method[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2024(5): 320–324.

[39] 廖启豪, 王玲, 殷国富. 基于RCSA的刀尖频响函数预测方法[J]. *工具技术*, 2019, 53(12): 105–108.

LIAO Qihao, WANG Ling, YIN Guofu. Frequency response function prediction method of tool tip based on RCSA[J]. *Tool Engineering*, 2019, 53(12): 105–108.

[40] ZHANG J, LI J H, XIE Z N, et al. Rapid dynamics prediction of tool point for bi-rotary head five-axis machine tool[J]. *Precision Engineering*, 2017, 48: 203–215.

[41] JI Y L, BI Q Z, ZHANG S K, et al. A new receptance coupling substructure analysis methodology to predict tool tip dynamics[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 126: 18–26.

[42] 陈守欢, 周婷婷, 胡天亮. 六自由度铣削加工机器人刚度建模及误差补偿[J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(2): 404–418.

CHEN Shouhuan, ZHOU Tingting, HU Tianliang. Stiffness modeling and error compensation method of 6-DOF milling robot[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023, 29(2): 404–418.

[43] CHEN C, PENG F Y, YAN R, et al. Rapid prediction of posture-dependent FRF of the tool tip in robotic milling[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 64(9–12): 101906.

- [44] 叶松涛, 严思杰, 李文韬, 等. 面向机器人铣削加工的刀尖动态特性分析与稳定性预测[J]. 机械工程学报, 2022, 58(17): 261–275.
- YE Songtao, YAN Sijie, LI Wentao, et al. Analysis of tool tip dynamic characteristics and stability prediction for robotic milling tasks[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(17): 261–275.
- [45] 梁志强, 石贵红, 杜宇超, 等. 考虑主轴-刀柄结合面特性的机器人铣削系统刀尖频响预测研究[J]. 中国机械工程, 2023, 34(1): 2–9.
- LIANG Zhiqiang, SHI Guihong, DU Yuchao, et al. Research on tool tip frequency response prediction of robot milling systems considering characteristics of spindle-toolholder interface[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(1): 2–9.
- [46] 张云飞, 郝小忠, 陈耿祥, 等. 基于KNN的机床刀尖点频响函数预测[J]. 航空制造技术, 2020, 63(10): 80–88, 96.
- ZHANG Yunfei, HAO Xiaozhong, CHEN Gengxiang, et al. KNN-based tool tip frequency response function prediction method[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(10): 80–88, 96.
- [47] 赵万华, 杜超, 张俊, 等. 主轴转子系统动力学解析建模方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 44–51.
- ZHAO Wanhua, DU Chao, ZHANG Jun, et al. Analytical modeling method of dynamics for the spindle rotor system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 44–51.
- [48] 王贤钧, 王玲, 李洋洋, 等. 旋转刀尖点频响函数的迁移学习预测技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2025, 57(8): 1–13.
- WANG Xianjun, WANG Ling, LI Yangyang, et al. Transfer learning prediction technology for frequency response function prediction of rotary tool tip[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2025, 57(8): 1–13.
- [49] ALTINTAS Y, CAO Y. Virtual design and optimization of machine tool spindles[J]. CIRP Annals, 2005, 54(1): 379–382.
- [50] MOHAMMADI Y, AHMADI K. Effect of axial vibrations on regenerative chatter in robotic milling[J]. Procedia CIRP, 2019, 82: 503–508.
- [51] PAN Z X, ZHANG H, ZHU Z Q, et al. Chatter analysis of robotic machining process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 173(3): 301–309.
- [52] MORADI H, BAKHTIARI-NEJAD F, MOVAHHEDI M R. Tuneable vibration absorber design to suppress vibrations: An application in boring manufacturing process[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 318(1–2): 93–108.
- [53] TOTIS G, SORTINO M. Polynomial Chaos-Kriging approaches for an efficient probabilistic chatter prediction in milling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 157: 103610.
- [54] SKOCZYPIEC S. Research on ultrasonically assisted electrochemical machining process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52(5): 565–574.
- [55] QUINTANA G, CIURANA J. Chatter in machining processes: A review[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(5): 363–376.
- [56] CEN L J, MELKOTE S N. CCT-based mode coupling chatter avoidance in robotic milling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 29: 50–61.
- [57] 郭万金, 李儒, 王利斌, 等. 一种考虑弱刚性关节传动链结构和柔性杆结构的机器人刚度辨识方法[J]. 中国机械工程, 2025, 36(5): 974–985.
- GUO Wanjin, LI Ru, WANG Libin, et al. A robot stiffness identification method considering weakly rigid joint transmission chain structures and flexible rod structures[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(5): 974–985.
- [58] YUAN L, PAN Z X, DING D H, et al. A review on chatter in robotic machining process regarding both regenerative and mode coupling mechanism[J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(5): 2240–2251.
- [59] TLUSTY J, POLACEK M. The stability of machine tools against self-excited vibrations in machining[C]. The ASME International Research in Production Engineering. Pittsburgh, 1963.
- [60] MERRITT H E. Theory of self-excited machine-tool chatter: Contribution to machine-tool chatter research—1[J]. Journal of Engineering for Industry, 1965, 87(4): 447–454.
- [61] WANG G F, DONG H Y, GUO Y J, et al. Chatter mechanism and stability analysis of robotic boring[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1): 411–421.
- [62] JI Y, HAN Q, XU X. Robotic milling chatter stability analysis considering the coupling effects between the robot and spindle system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(6): 13–27.
- [63] CORDES M, HINTZE W, ALTINTAS Y. Chatter stability in robotic milling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 55: 11–18.
- [64] ZHANG X J, XIONG C H, DING Y, et al. Milling stability analysis with simultaneously considering the structural mode coupling effect and regenerative effect[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 53(1): 127–140.
- [65] TOBIAS S A. Machine tool vibration research[J]. International Journal of Machine Tool Design and Research, 1961, 1: 1–14.
- [66] CELIKAG H, OZTURK E, SIMS N D. Can mode coupling chatter happen in milling?[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 165: 103738.
- [67] LIU Z W, DENG Z H, YI L X, et al. A review of research on robot machining chatter[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 135(1): 49–79.
- [68] NAM S, HAYASAKA T, JUNG H, et al. Proposal of novel chatter stability indices of spindle speed variation based on its chatter growth characteristics[J]. Precision Engineering, 2020, 62: 121–133.
- [69] 韩琛潼, 郭森现, 江小辉, 等. 考虑进给速度影响的高速铣削稳定性分析方法[J]. 机械强度, 2025, 47(3): 11–22.
- HAN Chentong, GUO Miaoxian, JIANG Xiaohui, et al. Stability analysis method of high-speed milling considering feed rate influence[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(3): 11–22.
- [70] 田和强, 安金昌, 马洪强, 等. 骨铣削参数对机器人颤振稳定性影响与优化[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(5): 988–996.
- TIAN Heqiang, AN Jinchang, MA Hongqiang, et al. Influence and optimization of bone milling parameters on robot chatter stability[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(5): 988–996.
- [71] 宜亚丽, 程阳洋, 陈晓卫, 等. 基于最大刚度原则的铣削机器人位姿确定方法[J]. 中国机械工程, 2025, 36(7): 1544–1552.
- YI Yali, CHENG Yangyang, CHEN Xiaowei, et al. A determining method for milling robot poses based on principles of maximum stiffness[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(7): 1544–1552.
- [72] TANG Y Y, ZHANG J, TIAN H, et al. Optimization method of spindle speed with the consideration of chatter and forced vibration for five-axis flank milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(7): 3159–3169.
- [73] GÖK F, ORAK S, SOFUOĞLU M A. The effect of cutting tool material on chatter vibrations and statistical optimization in turning

- operations[J]. *Soft Computing*, 2020, 24(22): 17319–17331.
- [74] 秦国华, 娄维达, 林锋, 等. 基于Cotes求积法和神经网络的稳定域判断及铣削参数优化新方法[J]. *兵工学报*, 2024, 45(2): 516–526.
- QIN Guohua, LOU Weida, LIN Feng, et al. A novel method of stability judgment and milling parameter optimization based on Cotes integration method and neural network[J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(2): 516–526.
- [75] BUDAK E, ALTINTAS, Y. Analytical prediction of chatter stability in milling: Part I: General formulation[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1998, 120(1): 22–30.
- [76] HUANG J X, HUANG H, HUANG S G, et al. Modeling of chatter stability for the robot milling of natural marble[J]. *Machines*, 2024, 12(12): 942.
- [77] ALTINTAS Y, BUDAK E. Analytical prediction of stability lobes in milling[J]. *CIRP Annals*, 1995, 44(1): 357–362.
- [78] MERDOL S D, ALTINTAS Y. Multi frequency solution of chatter stability for low immersion milling[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, 126(3): 459–466.
- [79] INSPERGER T, STÉPÁN G. Semi-discretization method for delayed systems[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2002, 55(5): 503–518.
- [80] INSPERGER T, STÉPÁN G. Updated semi-discretization method for periodic delay-differential equations with discrete delay[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 61(1): 117–141.
- [81] 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.
- [82] DING Y, ZHU L M, ZHANG X J, et al. Second-order full-discretization method for milling stability prediction[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50(10): 926–932.
- [83] LI Z Q, YANG Z K, PENG Y R, et al. Prediction of chatter stability for milling process using Runge-Kutta-based complete discretization method[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(1): 943–952.
- [84] LI Z Q, LIU Q. Solution and analysis of chatter stability for end milling in the time-domain[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2008, 21(2): 169–178.
- [85] HAO D X, WANG W, LIU Z H, et al. Experimental study of stability prediction for high-speed robotic milling of aluminum[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2020, 26(7–8): 387–398.
- [86] LI M J, HUANG D X, YANG X J. Chatter stability prediction and detection during high-speed robotic milling process based on acoustic emission technique[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 117(5): 1589–1599.
- [87] ZHAO X, ZHENG L Y, LIU X Y, et al. Chatter stability prediction for multi-robots collaborative milling system[J]. *Procedia CIRP*, 2020, 93: 856–861.
- [88] XIE G S, XU Y, XU P H, et al. Chatter stability analysis of a six-axis milling robot[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 125(7): 3551–3561.
- [89] ZHANG Y, ZHOU T T, HU T L, et al. Stability analysis of milling chatter in six-degree-of-freedom industrial robots[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 127(5): 2861–2880.
- [90] JI Y J, WANG L Y, SONG Y, et al. Investigation of robotic milling chatter stability prediction under different cutter orientations by an updated full-discretization method[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, 536: 117150.
- [91] 金永乔, 辛世豪, 杨长祺, 等. 机器人铣削模态耦合颤振建模与仿真研究[J]. *装备制造技术*, 2021(1): 19–21, 25.
- JIN Yongqiao, XIN Shihao, YANG Changqi, et al. Modeling and simulation of modal coupled chatter in robotic milling[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2021(1): 19–21, 25.
- [92] 高建. 薄壁件铣削多模态耦合稳定性预测与时频变换颤振监测研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- GAO Jian. Multi-modal coupling stability prediction and time-frequency transform chatter detection for thin-walled workpiece milling[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [93] GIENKE O, PAN Z X, YUAN L, et al. Mode coupling chatter prediction and avoidance in robotic machining process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(5): 2103–2116.
- [94] DU Y C, LIANG Z Q, GAO Z R, et al. Investigation on the dominant mechanism of chatter in high-load robot milling process based on theoretical and experimental analysis[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2025, 600: 118886.
- [95] 王志学, 刘献礼, 李茂月, 等. 切削加工颤振智能监控技术[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(24): 1–23.
- WANG Zhixue, LIU Xianli, LI Maoyue, et al. Intelligent monitoring and control technology of cutting chatter[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(24): 1–23.
- [96] 王燕山, 胡飞, 张梅菊, 等. 智能制造中的状态在线监测技术[J]. *测控技术*, 2018, 37(5): 3–8, 19.
- WANG Yanshan, HU Fei, ZHANG Meiju, et al. Status online monitoring technology for intelligent manufacturing[J]. *Measurement & Control Technology*, 2018, 37(5): 3–8, 19.
- [97] ZHU L D, LIU C F. Recent progress of chatter prediction, detection and suppression in milling[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 143: 106840.
- [98] 余俊. 基于MTConnect的数控机床网络监测及能耗建模研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- YU Jun. Research on network monitoring and energy consumption modeling of NC machine tool based on MTConnect[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [99] LAMRAOUI M, THOMAS M, EL BADAoui M, et al. Indicators for monitoring chatter in milling based on instantaneous angular speeds[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, 44(1–2): 72–85.
- [100] 汪晓娜, 彭志科, 陈是扞. 基于瞬时频率估计与Vold-Kalman滤波的铣削颤振识别[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(16): 70–76.
- WANG Xiaoshan, PENG Zhike, CHEN Shiqian. Chatter detection in milling process based on instantaneous frequency estimation and the Vold-Kalman filter[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(16): 70–76.
- [101] LIU Y, WANG X F, LIN J, et al. Early chatter detection in gear grinding process using servo feed motor current[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83(9): 1801–1810.
- [102] JI Y J, WANG X B, LIU Z B, et al. EEMD-based online milling chatter detection by fractal dimension and power spectral entropy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(1): 1185–1200.
- [103] TRAN M Q, LIU M K, ELSISI M. Effective multi-sensor data fusion for chatter detection in milling process[J]. *ISA Transactions*, 2022, 125: 514–527.
- [104] LI D D, ZHANG W M, LI Y S, et al. Chatter identification of thin-walled parts for

intelligent manufacturing based on multi-signal processing[J]. *Advances in Manufacturing*, 2021, 9(1): 22–33.

[105] 王涛, 高雪峰, 祝景萍, 等. 机器人纵扭超声铣边颤振在线监测方法[J]. *航空学报*, 2023, 44(13): 427919.

WANG Tao, GAO Xuefeng, ZHU Jingping, et al. Chatter online monitoring of robotic longitudinal-torsional ultrasonic edge trimming[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(13): 427919.

[106] 籍永建, 姚利诚. 机器人铣削加工颤振自适应识别方法研究[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(18): 2165–2176.

Ji Yongjian, YAO Licheng. Research on self-adaptive chatter recognition method for robotic milling[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(18): 2165–2176.

[107] 吴杨宝. 工业机器人精镗飞机交点孔的颤振分析与识别[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.

WU Yangbao. Chatter analysis and identification in industrial robotic fine boring of aircraft intersection holes[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

[108] 陈喆, 王荣, 周文颖, 等. 非平稳信号度量方法综述[J]. *数据采集与处理*, 2017, 32(4): 667–683.

CHEN Zhe, WANG Rong, ZHOU Wenying, et al. Review on measurement parametrics and methods for nonstationary signal[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2017, 32(4): 667–683.

[109] CEN L J, MELKOTE S N, CASTLE J, et al. A method for mode coupling chatter detection and suppression in robotic milling[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2018, 140(8): 081015.

[110] 董辉跃, 吴杨宝, 郭英杰, 等. 机器人精镗飞机交点孔的颤振分析与识别[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(8): 1517–1525.

DONG Huiyue, WU Yangbao, GUO Yingjie, et al. Chatter analysis and identification in robotic fine boring of aircraft intersection holes[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2018, 52(8): 1517–1525.

[111] 孙连军. 大型弱刚性构件机器人旋转超声铣削颤振主动抑制及应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2023.

SUN Lianjun. Study on active flutter suppression and application of large-scale weak rigid component robot in rotary ultrasonic milling[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2023.

[112] YANG B, GUO K, ZHOU Q, et al. Early chatter detection in robotic milling under variable robot postures and cutting parameters[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 186: 109860.

[113] TAO J F, QIN C J, XIAO D Y, et al. Timely chatter identification for robotic drilling using a local maximum synchroqueezing-based method[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2020, 31(5): 1243–1255.

[114] 章启阳, 刘赣华. 基于数值积分方法的铣削稳定性预测研究[J]. *航空制造技术*, 2024, 67(11): 118–125.

ZHANG Qiyang, LIU Ganhua. Research on milling stability prediction based on numerical integration method[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2024, 67(11): 118–125.

[115] 王加春, 李旦, 董申. 机械振动主动控制技术的研究现状和发展综述[J]. *机械强度*, 2001, 23(2): 156–160.

WANG Jiachun, LI Dan, DONG Shen. Review of mechanical active vibration control technique[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2001, 23(2): 156–160.

[116] LI Z M, SONG Q H, JIN P J, et al. Chatter suppression techniques in milling processes: A state of the art review[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 37(7): 1–23.

[117] 郑炜, 杜坤鹏, 陈航, 等. 航空制造领域移动机器人加工系统研究综述[J]. *航空制造技术*, 2020, 63(9): 36–41, 49.

ZHENG Wei, DU Kunpeng, CHEN Hang, et al. Review of robot mobile machining system in aviation manufacturing[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(9): 36–41, 49.

[118] DAI J J, CHEN C Y, ZHU R F, et al. Suppress vibration on robotic polishing with impedance matching[J]. *Actuators*, 2021, 10(3): 59.

[119] CAO H L, CHEN X A, HE Y, et al. Dynamic adaptive hybrid impedance control for dynamic contact force tracking in uncertain environments[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 83162–83174.

[120] MASON M T. Compliance and force control for computer-controlled manipulators[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1981, 11(6): 418–432.

[121] RAIBERT M H, CRAIG J J. Hybrid position/force control of manipulators[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1981, 103(2): 126–133.

[122] 丁毓峰, 闵新普. 曲面零件抛光机器人的力/位混合控制方法[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(5): 817–825.

DING Yufeng, MIN Xinpu. Force/position hybrid control method for surface parts polishing robot[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(5): 817–825.

[123] 王海, 薛彬, 杨春来, 等. 基于压电陶瓷的柔性机器人主动抑振控制策略研究[J]. *传感技术学报*, 2016, 29(7): 1016–1020.

WANG Hai, XUE Bin, YANG Chunlai, et al. Active vibration control of a flexible manipulator using piezoelectric patches[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2016, 29(7): 1016–1020.

[124] 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.

[125] PALPACELLI M. Static performance improvement of an industrial robot by means of a cable-driven redundantly actuated system[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016, 38: 1–8.

[126] 方强, 李超, 费少华, 等. 机器人镗孔加工系统稳定性分析[J]. *航空学报*, 2016, 37(2): 727–737.

FANG Qiang, LI Chao, FEI Shaohua, et al. Stability analysis of robot boring system[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(2): 727–737.

[127] YE S T, ZHANG H Y, YAN S J, et al. Active suppression of mode coupling chatter in robotic milling process of large complex components[C]. 2022 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Jinghong, 2022.

[128] GAO K, ZHOU X Q, WANG R Q, et al. Robotic milling stability optimization based on robot functional redundancy[J]. *Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application*, 2023, 50(6): 1036–1047.

[129] 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.

[130] LIAO Z Y, LI J R, XIE H L, et al. Region-based toolpath generation for robotic milling of freeform surfaces with stiffness optimization[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 64: 101953.

[131] TUNC L T, STODDART D. Tool path pattern and feed direction selection in robotic milling for increased chatter-free material removal rate[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89(9): 2907–2918.

[132] SUN L J, ZHENG K, LIAO W H, et al. Investigation on chatter stability of robotic rotary ultrasonic milling[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 63: 101911.

[133] 陆锋, 王振忠, 黄雪鹏, 等. 六自由度气囊抛光机器人模态分析与中频误差抑制[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(11): 119001.

LU Feng, WANG Zhenzhong, HUANG Xuepeng, et al. Modal analysis and mid-spatial-frequency errors suppression of 6-DOF bonnet polishing robot[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34(11): 119001.

[134] XU D, LU X J, XU B W. Design and modeling of a passive magnetic vibration absorber for robotic polishing process[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 95: 204–216.

[135] CHEN F, ZHAO H. Design of eddy current dampers for vibration suppression in robotic milling[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(11): 1–15.

[136] ZHANG J J, XIE F G, MA Z J, et al. Design of parallel multiple tuned mass dampers for the vibration suppression of a parallel machining robot[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 200: 110506.

[137] 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.

[138] YANG Z R, QIN C Y, RAO Z S, et al. Design and analyses of axial semi-

active dynamic vibration absorbers based on magnetorheological elastomers[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2014, 25(17): 2199–2207.

[139] 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.

[140] MENG D, SUN H W, XIONG W W, et al. Investigation on stability of robotic rotary ultrasonic edge milling component with poor rigidity[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 124(5): 1579–1590.

State of the Art and Prospects in Dynamics of Heavy-Duty Robots

LI Zhongqun¹, SHEN Qunli¹, WU Wenjing², FAN Hailu¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;

2. State Key Laboratory of High-End Heavy-Loads Robots, Midea Group, Foshan 528311, China)

[ABSTRACT] Heavy-duty industrial robots are increasingly utilized in machining applications due to their advantages such as large workspace and flexible posture. However, their inherent stiffness characteristics render them highly susceptible to chatter during machining operations, significantly constraining their application and development. Research on chatter prediction based on high-precision dynamic modeling, along with various active and passive chatter suppression techniques, is crucial for achieving chatter-free machining. This paper systematically reviews the research progress in the dynamics of heavy-duty robotic machining systems globally. Firstly, the methods for modeling and predicting the dynamic characteristics of heavy-duty robots are introduced. Subsequently, an in-depth analysis of the dynamics model of the milling process and its solution methods is provided, elucidating the mechanisms of chatter, influencing factors, and variations in dynamic behavior. Furthermore, online chatter monitoring techniques and comprehensive suppression strategies are presented, evaluating the characteristics, applicable scenarios, advantages, and limitations of different approaches. Finally, based on the above analysis, a summary is provided along with key directions for future research. Through a comprehensive review and in-depth discussion of the dynamics research in heavy-duty robotic machining, this work aims to serve as a valuable reference and provide directional guidance for scholars in related fields.

Keywords: Heavy-duty robot; Dynamic modeling; Frequency response function (FRF); Stability prediction; Chatter suppression

(责编 大漠)