DOI: 10.3901/JME.2021.17.021

面向薄壁零件加工变形与振动控制的智能装夹技术研究进展*

吴宝海^{1,2} 郑志阳^{1,2} 张阳^{1,2} 张莹^{1,2} 郑天飞^{1,2}

(1. 西北工业大学航空发动机高性能制造工信部重点实验室 西安 710072;
2. 西北工业大学航空发动机先进制造技术教育部工程研究中心 西安 710072)

摘要: 薄壁零件由于其弱刚性导致的切削加工变形与振动极大地影响着产品的最终质量。合理的装夹能够控制加工变形与振动,有效提升薄壁零件的加工稳定性。随着新型传感与控制算法的发展,现代夹具逐渐向智能化方向发展,集成夹紧力控制、变形补偿、实时监测、动态反馈调整等功能于一体的智能夹具应运而生,并成为学术界和工业界的研究热点。本文梳理了薄壁零件装夹方案优化方法及其加工辅助支撑技术、综述了当前关于智能夹具架构、具体应用及其控制策略的国内外研究现状,最后总结了当前装夹方案优化及智能夹具研究方面所存在的问题并提出下一步的研究方向。

关键词: 薄壁零件; 装夹优化; 辅助支撑; 智能夹具

中图分类号: V261; TH161

Intelligent Clamping Technology for Machining Deformation and Vibration Control of Thin-wall Parts: A Review of Recent Progress

WU Baohai^{1,2} ZHENG Zhiyang^{1,2} ZHANG Yang^{1,2} ZHANG Ying^{1,2} ZHENG Tianfei^{1,2}

(1. Key Laboratory of High Performance Manufacturing for Aero Engine, Northwestern Polytechnical University, Ministry of Industry and Information Technology, Xi'an 710072;
2. Engineering Research Center of Advanced Manufacturing Technology for Aero Engine, Northwestern Polytechnical University, Ministry of Education, Xi'an 710072)

Abstract: The machining deformation and vibration of thin-walled parts due to inherent weak rigidity greatly affect the final quality of products. Reasonable clamping can control the machining deformation and vibration, improve the machining stability of thin-walled parts effectively. With the development of new sensing and control algorithms, modern fixtures are gradually developing towards the direction of intelligence. Intelligent fixtures integrated clamping force control, deformation compensation, real-time monitoring, dynamic feedback adjustment and other functions have emerged and became new research hotspot in academia and industry. Therefore, the clamping scheme optimization method and machining auxiliary support technology of thin-walled parts is combed in this paper. The current research status at home and abroad about system architecture, specific application and control strategy of intelligent fixture are also reviewed systematically. Ultimately, the extant problems in clamping scheme optimization and intelligent fixture are concluded and the potential development trends are proposed.

Key words: thin-wall parts; clamping optimization; auxiliary support; intelligent fixture

0 前言

航空航天产业中广泛采用轻质高强的复杂薄壁

零件,这类零件一般采用铣削加工工艺制造而成,并要求很高的加工精度和表面质量以保证其服役性能和可靠性。然而薄壁零件固有的弱刚度属性使其在切削力和装夹力的作用下极易出现“让刀”与装夹变形,进而导致工件最终加工精度不达标^[1-2]。同时,薄壁零件常采用钛合金、高温合金这类切削抗力大的难切削材料,这会进一步加剧薄壁零件的“让

* 国家重点研发计划(2020YFB1710400)和陕西省自然科学基金研究计划面上(No.2021JM-054)资助项目。20201228 收到初稿,20210326 收到修改稿

刀”变形。此外，薄壁零件的加工是一个强时变的过程，切削过程中材料的连续去除与工艺参数的改变，使得薄壁件质量、结构变化对工艺系统模态的影响会愈发显著^[3]，此时工艺系统极易失稳，出现自激振动或颤振现象，加剧刀具磨损，导致工件表面质量变差^[4]。

作为机械加工必不可少的一部分，夹具与工件直接接触，为工件提供准确的定位并保证工件在切削过程中的稳定性。合理的夹具设计与装夹方案可以增强工件的加工刚度，降低工件在加工过程中的变形与振动，甚至缩短生产准备周期。而装夹方案设计不合理会使得工件夹紧过度发生较大装夹变形导致工件加工尺寸超差，抑或是欠夹紧导致工件从夹具上脱离，出现工件报废、人员受伤等事故^[5]。因此夹具在很大程度上决定了工件的最终加工质量及加工效率。为了控制薄壁件的加工变形与振动，国内外的学者一直致力于薄壁件装夹力、装夹布局的优化，以及夹具体和辅助支撑的模块化与柔性化^[6-7]研究。但这类研究多是在传统夹具的基础上进行改进与优化。随着我国新型战机、新型装备的不断涌现，航空航天、特种装备等行业对薄壁件的加工精度、表面质量等技术指标要求越来越高。传统夹具由于其被动的天然属性，难以对薄壁件的加工变形与颤振进行实时控制，愈发无法满足行业对薄壁件高性能制造的需求。近些年来，随着现代传感、数据处理技术的发展，传统夹具开始向高精、高效、智能化的方向发展，逐渐集监测、反馈、控制等功能于一体，形成新型的智能夹具，并进一步融入工件-机床-夹具系统中，成为智能化工艺装备系统的重要组成部分。智能夹具的出现使得对复杂工况条件下弱刚性薄壁零件加工工艺系统的实时调控成为可能。

本文通过分析夹具对薄壁件铣削加工的重要性，针对性阐述了国内外关于薄壁件装夹力、装夹布局优化方法的研究成果，介绍了不同类型的薄壁件加工辅助支撑技术，探讨了智能夹具的总体架构及其在薄壁零件加工变形与颤振抑制方面的应用和主动控制策略。最后总结了现有装夹技术研究工作中存在的问题，并提出了智能夹具未来的发展趋势及研究方向。

1 装夹方案优化设计

传统机械加工中夹具的主要功能一般由定位元件与夹紧元件完成。定位元件用来保证工件在夹具

中处于正确的方位。一般采用“3-2-1”定位准则来限制其三个平动与三个转动自由度^[8]。而夹紧元件的作用是将工件压紧，使工件在外力的作用下始终保持正确的方位，一般夹紧元件的数量不少于两个。合理的装夹方案可以保证工件的定位准确度，并增强工件的加工刚度及加工稳定性。因此，在考虑工件的结构形状之外，如何确定各定位点的位置以及夹紧点的数量与布局成为工艺和夹具设计人员的主要工作。但传统夹具设计过程中，装夹布局方案主要依赖于设计人员的主观经验或试错，不确定性大，难以满足高精尖零部件对于加工精度的要求。因此，研究面向工件加工变形与振动控制的装夹方案优化技术，对于从理论层面指导工艺与夹具设计具有重要意义。目前，国内外学者关于工件装夹方案优化方法研究主要分为以下三个方面。

1.1 基于解析法的刚性工件装夹方案优化

基于“3-2-1”定位准则，许多学者采用各种优化算法来降低刚体工件的定位误差。CAI^[9]基于变分法建立了一般工件的解析装夹模型，并采用序列二次规划法完成了“3-2-1”装夹布局的稳健优化设计。LI^[10]建立了工件-夹具刚性接触模型，借助非线性规划法对装夹位置进行了优化，提高了工件定位精度。秦国华^[11]基于最小范数原理将夹紧力的优化设计松弛为线性规划问题的求解，方法更加简单易行。WANG^[12]将具有连续变量的夹具设计问题转换为离散的工件稳定性分析问题，进而基于线性规划提出了一种多点装夹力的迭代规划方法。但线性规划与序列二次规划方法需要梯度信息辅助^[13]，最终解会随初始输入装夹方案而改变，因此，该方法不能保证得到最优解或近似最优解。进一步地，秦国华^[14-15]构造了工件在确定装夹布局下的位置偏离的 2-范数及稳定量度模型，基于此采用无需梯度信息辅助的遗传算法来优化装夹布局，更易获得全局最优解。

由于刚性工件在切削加工过程中自身不会发生加工变形，相对容易通过以上几种解析的方法建立起工件定位误差或位姿偏差与定位布局之间的数学模型，进而依据该数学模型进行装夹方案优化中的计算。然而，薄壁零件的局部加工变形较为显著，而且导致变形的因素众多，难以通过解析法确定其局部加工变形值，因此这种解析法很难适用于薄壁件的装夹方案优化。

1.2 基于有限元法的薄壁件装夹方案优化

在薄壁件的装夹方案优化过程中，往往以工件的受载变形作为优化目标函数。但由于薄壁件形状结构复杂、切削过程多态耦合、工件刚度时变，极

难建立起装夹参数与工件加工变形之间的解析模型。因此,可行的方法是:首先采用有限元法建立起静态或准静态的薄壁件切削仿真模型,然后通过该模型计算薄壁件在不同装夹方案下的加工变形,以此作为目标函数,最后采用一般的线性规划或进化类优化算法对装夹方案进行优化。具体优化流程如图 1 所示。常用的优化算法主要分为以下两类。

图 1 基于有限元法的装夹布局优化流程

1.2.1 一般优化算法

薄壁件由于其弱刚性,在切削过程中极易出现加工变形,针对刚性工件的“3-2-1”装夹定位准则并不能保证其加工精度。因此,CAI^[16]提出了“N-2-1”装夹定位准则($N>3$),通过在薄壁件主定位面上增加定位点数目,来保证其在加工过程中的位置准确度,并以工件整体变形最小为目标,基于有限元法和序列二次规划算法优化了薄板的 $N=4$ 个定位布局。基于“N-2-1”多点支撑/定位的思想,文献[6, 17]通过有限差分法表征薄壁件最大加工变形对支撑点位置变动方向的敏感度,进而沿着最敏感方向优化调整支撑位置。WANG^[18]通过枚举法获取装夹力最小且满足涡轮叶片磨削装夹稳定性约束模型的最优装夹布局。针对涡轮叶片的榫根精加工的定位问题,文献[19]在基于经验预设的初始叶身定位点的圆形邻域内进行局部随机搜索,避免了更加耗时的全局搜索优化。此外,ANSYS 软件中集成的零阶方法^[20]和一阶方法也被用于薄壁件装夹布局的迭代优化计算。值得注意的是,先后采用零阶方法与一阶方法对装夹布局进行粗略优化和进一步优化是一种效率更高的优化方式^[21]。

1.2.2 进化类优化算法

传统的枚举法、随机搜索法等带有一定盲目性,

而进化类算法通常只需要提供目标函数值便可以对函数变量进行定向寻优。因此,采用进化算法耦合有限元仿真已经成为面向工件变形控制的装夹方案优化的基本方法^[22]。常用的进化算法有遗传算法(GA)、文化基因算法(MA)、粒子群算法(PSO)、花授粉算法(FPA)、带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)等。杨阳^[23]采用 ANSYS 参数化设计语言 APDL 建立了工件加工有限元仿真模型,继而通过遗传算法对工件装夹布局进行优化来控制工件的加工变形。KULANKARA^[24]基于有限元仿真模型,采用遗传算法对装夹位置和夹紧力进行交替优化。路冬^[25]建立了航空框类结构件装夹布局递推优化模型,并采用遗传算法对装夹数目、装夹位置进行了异步优化。此外,也有学者^[26-29]采用遗传算法对框型件的装夹力、装夹布局、装夹顺序等装夹参数进行了同步优化。相比于控制变量的异步优化,同步优化考虑了各装夹参数之间的耦合关系,优化效果更好。更进一步地,许稚委^[30]同时以所有节点变形的均方差和最大加工变形与为目标函数,对装夹布局与装夹力进行了多目标同步优化,不仅降低了装夹力与最大加工变形,而且提高了加工变形的均匀度。BAI^[31]采用熵权法将定位稳定性与定位精度两个优化目标合并为一个评价函数,进而基于 Memetic 算法优化了夹具布局,该方法相较于多目标优化算法复杂度更低。为了在考虑动态响应的基础上最大限度地减小工件的弹性变形,DOU^[32]提出了基于 APDL 有限元模型和改进粒子群算法的装夹布局优化方法,并且发现改进的粒子群算法的全局优化能力和收敛速度均优于遗传算法。王仲奇^[33]以大型薄壁件自重导致的应变能为约束,采用花授粉算法和有限元分析对薄壁件的定位布局进行迭代寻优。为了综合控制大型薄壁件自重变形和装配公差,XING^[34-35]采用了一种效率更高的分步优化法,首先将基于工程经验筛选后的所有可行装夹节点按区域分组,采用社会辐射算法(SRA)初步优化获得最佳装夹区域,然后分别采用 NSSRA 与 NSGA-II 算法在最佳装夹区域内寻优获得最佳“5-2-1”定位布局,结果表明其提出的 NSSRA 求解精度高于 NSGA-II 算法。

以上文献均表明夹具的装夹方案优化可以显著降低薄壁件的定位误差、加工变形以及振动。但值得注意的是,采用进化类优化算法优化装夹方案往往需要上千次地调用有限元计算工件加工变形,计算比较耗时,尤其是当涉及的问题十分复杂需要考虑非线性因素时,该方法的计算时间将会激增。

1.3 基于代理模型的薄壁件装夹方案优化

近年来,为了减少在甚至避免优化过程中上千次的有限元分析,提高装夹方案优化效率,缩短夹具设计周期,代理模型成为新的研究趋势。其原理是,在满足预测精度要求的基础上,根据尽量少的有限元计算结果构建装夹方案与加工变形的近似映射关系,以此作为代理模型取代有限元法进行优化过程中的变形计算,其优化流程如图 2 所示。

图 2 基于代理模型的装夹布局优化流程

代理模型也称近似模型、元模型等^[36],常用的代理模型有响应面分析法^[37],多元非线性回归法^[38-39]等。此外,文献[40-41]也将 BP 神经网络用于装夹变形的回归预测,首先通过有限元法获取的薄壁框型件在适量不同装夹布局下的装夹变形数据,再以此作为训练样本构建了装夹变形的 BP 神经网络预测模型,如图 3 所示,最后依据预测结果利用遗传算法优化装夹布局,优化速度大幅提升。刘玉梅^[42]建立了夹紧力、支撑点位置与薄板件加工变形和内部残余应力均值两个优化目标之间的 BP 神经网络预测模型,并基于多目标遗传算法优化了支撑点位置。SELVAKUMAR^[43]则采用实验设计法获取设计变量的可行域,基于 ANN(人工神经网络)模型预测可行域内不同装夹布局下薄壁框型件的最大弹性变形,最终选取变形最小的装夹布局作为最佳布局。WANG^[44]通过均匀采样法获取航空薄壁件法向变形数据集,构建了 RBF(径向基函数)神经网络模型,其研究结果表明 RBF 神经网络比 BP 神经网络的预测结果精度更高,稳定性更强。杨元^[45]通过拉丁超立方采样法采集少量有限元计算生成的训练样本,构建了基于 SVR(支持向量回归机)的整体

变形与最大变形的预测模型,并采用 NSGA-II 算法获得了定位布局的 Pareto 最优解集,实验结果表明该方法的预测精度远高于 RBF 神经网络。YANG^[46]基于 Kriging 代理模型采用序列最优化设计算法对定位布局进行了优化。值得注意的是,相比于 RBF、SVR、ANN 等代理模型,Kriging 模型不仅能够预测未知点处的函数值,还可以输出未知点的均方误差,从而对预测值的可信程度进行概率估计。但与 SVR 模型类似,Kriging 代理模型在建立时,也需先通过进化类算法优化获得合适的回归超参数,才能取得收敛速度快、小样本条件下预测性能好、泛化能力强的优势。

图 3 BP 神经网络结构

可以看出,在基于有限元法的薄壁件装夹方案优化过程中,不可避免地需要频繁调用有限元参与迭代计算,计算时间成本高昂。相比之下,新兴的基于代理模型的装夹方案优化方法能够显著降低有限元分析次数,大大节约时间成本。尽管代理模型由于其拟合的固有属性,相比于有限元仿真依然存在偏差,而且往往需要反复多次试采样才能拟合出满足精度要求的代理模型。但代理模型在计算效率上相比于有限元仿真优势显著。因此,在并不要求很高精度的条件下,显然,基于代理模型的装夹方案优化方法是更好的选择。

2 薄壁件加工辅助支撑技术

由于复杂曲面类薄壁零件刚性差,工件局部在外力作用下极易发生弹性变形,而且由于结构复杂导致其装夹定位区域小,可优化空间比较受限。因此,在传统夹具的“3-2-1”定位准则之外,对薄壁件施以辅助支撑成为一种行之有效的方案。

辅助支撑可以改变工件-夹具系统固有频率,增强薄壁件的加工刚度,进而提高其加工精度。通过机构对薄壁件进行加工辅助支撑的概念最早可以追

溯到日本的 IWABE 等人提出的镜像铣削^[47]，通过机床两个平行的主轴产生的对称铣削力来抵消工件让刀变形，但是该方法对机床双主轴间距要求严格，只能加工结构较简单的缘条类薄壁件。基于镜像铣的概念，弹簧阻尼器^[48]与气射流^[49]也被用于薄壁件的切削加工辅助支撑，通过与刀具做镜像运动，在切削过程中为工件提供阻尼，进而有效降低了工件加工振动与变形，提高表面加工质量。但镜像类辅助支撑一般只能用于薄板类零件的加工，难以复制到复杂薄壁件的加工中。针对航空发动机叶片的铣削，有学者采用样板这类线接触式辅助支撑^[50]，但受限于样板与叶片截面轮廓的配合，通用性较差。为了提高辅助支撑的通用性，研究者逐渐转向对点阵式辅助支撑^[51]。WU^[52]采用 Peek-GF30 材料替代 45 钢作为支撑头设计了一种自适应四点辅助支撑夹具，如图 4 所示，有效降低了精锻叶片榫根精铣过程中支撑部位的应力集中与装夹变形。WANG^[53]制作了一种可与机床协同控制的四点装夹支撑工作台，可以在涡轮叶片榫根的精加工过程中对处于悬臂状态的榫根进行支撑以及自动刀具避让。针对大型风扇叶片的加工，如图 5 所示，Starrag 集团的 LX451 机床集成了自适应四点辅助支撑机构与机床联动，可实现自动支撑与刀具避让^[54]。进一步地，为了最大程度降低工件的加工变形与振动，也可采用遗传算法^[55-56]或动力学拓扑优化理论^[57]对薄壁件的加工辅助支撑位置进行布局优化。而崔惠婷^[58]则通过在模态空间中将结构模态线性叠加获取工件振动位移，在最大振幅处施加辅助支撑件，然后重建模型再次计算各节点振幅，这样循环迭代直至获得满足加工精度的辅助支撑数目。在此基础上，ZENG^[59]通过依次在最大振动位移处增加辅助支撑获取最大支撑数目后，逐次减少支撑数目并优化辅助支撑布局，直至获得满足加工精度要求下的最佳支撑数目与支撑布局。针对大型航空薄壁件的加工

图 4 精锻叶片机加夹具

及装配中的定位与支撑问题，文献[6-7]设计的柔性多点定位支撑系统，如图 6 所示，实现了飞机襟翼部件的数字化柔性定位装配。此外一种点阵式真空吸盘柔性工装也被用于大型航空薄壁件的批量化装配，避免薄壁件在自重或其他外力下发生变形^[60-61]。但在蒙皮类柔性薄壁件的加工和装配过程中，尤其需要注意真空吸盘对工件局部产生的微量应力变形。

图 5 Starrag LX451 机床辅助支撑工装

图 6 柔性多点定位支撑系统

相比传统地采用低熔点合金^[62]、石蜡^[63]等相变材料进行填充辅助支撑，以上文献中通过设计机械结构对薄壁件进行加工辅助支撑有如下优势：① 可自动完成定位和装夹，提高产品生产效率，明显缩短产品的制造周期；② 便于机械化、自动化生产，减轻工人劳动强度，提高劳动生产率，改善工作环境；③ 减少人为参与，显著降低人为因素误差的引入，有效保证产品的一致性。

3 智能夹具系统及应用

传统装夹研究中，大多假设静态装夹，而且对装夹布局的优化都是先验的。在加工过程中，各个装夹单元也只能对工件做被动装夹，无法针对不同的工件以及切削过程中可能出现的不稳定工况自适应地调整装夹布局、装夹力等参数。然而随着新型传感技术、信号识别处理算法等的不断发展，智能夹具系统的概念、架构、控制模型和方法论逐渐浮

现^[64]。内部集成传感器和执行机构形成闭环控制体系,使得智能夹具的自主执行或与机床交互成为可能^[65]。因此,目前具备自适应调控能力的智能夹具逐渐成为学术界的研究热点。

3.1 智能夹具总体架构

智能夹具是集成传感器与执行器的机电一体化系统,具备感知监测功能,能够对外部激励做出及时响应,并通过主动调整定位元件、夹紧元件和支撑元件对加工过程中出现的不稳定瞬时工况如变形、振动等进行主动控制^[66],进而达到比传统夹具更高的加工精度和加工质量,以及更高的加工效率。一般认为智能夹具至少要具有感知、决策、执行三大特征。如图 7 所示,智能夹具主要由三个模块组成。

图 7 智能夹具系统架构

(1) 自主感知模块: 自主感知模块主要通过夹具上集成的多种传感器采集时变加工场景下不同维度的数据,比如加速度、切削变形、切削热、装夹力、刀具磨损、工件表面质量等信息。

(2) 自主决策模块: 自主决策模块通过分析处理来自感知模块采集的数据,判断工件是否处于不稳定的切削状态,比如颤振、加工变形、装夹变形、刀具磨损等。决策的核心一般通过 PI/PID 控制算法,鲁棒控制法、模糊控制法、人工神经网络等算法实现。

(3) 驱动执行模块: 驱动执行模块在自主决策模块的控制下驱动(液压、气动、伺服电机等)夹紧元件、定位元件、辅助支撑元件等,对不稳定的切削状态进行位移/加速度补偿、夹紧力/夹紧布局调整等。近年来,压电陶瓷作动器和电磁作动器以其鲁棒性成为了智能夹具驱动执行模块的首选。

3.2 智能夹具的应用

现有的智能夹具主要从两个角度来提高工件的加工精度与表面质量: 动态调整装夹反力、干扰切削过程抑制切削颤振。

对于传统夹具而言,初始装夹力按照防止工件在加工过程中出现滑移的最大值施加在工件上。但在时变切削力的作用下,并不是每个瞬时工况下工件都需要最大的装夹力,过大的装夹力反而导致弱刚性的薄壁件出现装夹变形。因此, WANG^[64]和 NEE^[67]等最早提出了可实现动态夹紧功能的智能夹具系统,如图 8 所示,该夹具系统具有传感反馈系统,通过在线监测切削力的大小来动态改变装夹力,实现了对工件加工变形的实时控制。但是,二者仅介绍了该夹具系统的组成和功能,并未阐述具体的理论方法。GONZALO^[68]开发的自动装夹单元,如图 9 所示,可以根据力传感器测量的装夹反力信号,驱动液压装置对装夹反力进行动态闭环控制,避免过大的装夹变形。LUO^[69]通过对压气机叶片施加轴向拉力来增强工件-夹具系统的刚度和固有频率,并提出了一种通过在线监测系统振动状态进而实时调整叶尖处的轴向拉力以增强系统刚度的方法。此外,针对装夹系统的控制方面,欧盟第六框架计划资助的 AFFIX 项目^[70-71]研究了装夹系统建模,原型系统中运动机构与控制算法响应特性。国内的王斌利^[72]基于 CAN(控制器局域网)总线浮动装夹通信,零件受力与变形监测,机床与夹具协同控制等技术开发了浮动装夹自适应控制系统,如图 10 所示,实现了复杂航空结构件的在线浮动装夹。

图 8 智能装夹控制系统

图 9 智能浮动装夹单元

图 10 浮动装夹自适应控制系统

此外, 薄壁件在周期性的动态切削力的激励下很容易发生颤振, 进而导致工件表面出现不可接受的波纹和振痕^[73]。而且由于颤振导致的不稳定的切削条件也会加剧刀具的磨损^[74]。为了预测并预防切削颤振的发生, 现有文献提出了很多方法, 如通过铣削动力学建模获取稳定域瓣图内的切削参数^[75]或通过专门的实验测试^[76]。尽管目前通过稳定域瓣图预测颤振的方法在研究领域被广泛采用, 但由于切削过程中材料的连续去除, 复杂曲面薄壁件频率响应函数 FRF 难以实时获取^[77], 而且该方法在工业上的应用也会受到模态分析专业性的局限^[78]。这促进了根据实时监控结果扰动切削过程中的再生效应以减轻或抑制颤振的替代性工艺策略的研究, 比如铣削振动的被动控制和主动控制。被动控制法主要通过提高机床刚度、增加切削系统阻尼、或使用附加系统吸收系统的振动能量, 从而实现铣削振动的被动控制^[79]。这里主要介绍通过智能夹具来抑制切削颤振的主动控制法。

首先, 毋庸置疑的是主动抑振需要对切削过程中的工件进行驱动控制, 近年来出现了一些新的驱动技术, 如磁致伸缩、流体相变等, 但压电陶瓷作动器由于其功率密度高、带宽大依然是最佳选择^[80]。江浩^[81]设计并制造了一种双自由度主动抑振装夹平台, 可以根据监测到的切削振动位移信号, 利用压电陶瓷作动器对工件作反向位移补偿。欧盟第七框架计划资助的协同研究项目 INTEFIX 开发的一种双自由度柔性铰链工作台上则集成了三个加速度传感器^[82], 如图 11 所示, 分别监测工件在 X 和 Y 两个自由度以及刀具的切削振动信号。根据监测到的信号, 控制器驱动压电陶瓷作动器以特定频率干扰工件再生颤振的周期性, 从而实现抑振效果。但接触式的位移、加速度传感器以及非接触式的激光三角测量仪在叶轮的加工颤振监测过程中使用比较受限。因此, MOHRING^[83]将压电贴片式传感器嵌入于 CFRP 结构中, 如图 12 所示, 通过监测工件

与工作台之间的压力变化来识别工件的切削颤振, 再由压电陶瓷作动器激励工作台带动叶轮做高频周向振动, 干扰叶轮本身的切削颤振状态, 从而减小其振动幅度。BRECHER 等^[84]开发了一种由压电驱动器控制的高动态性两轴夹具, 该夹具能够依据闭环控制算法补偿切削过程中主轴振动对切削系统的影响。ABELE^[85]基于压电作动器设计了主动夹具, 采用有限元法研究该夹具的动力学特性, 分析其有效带宽及最大作动位移。YANG^[86]利用加工振动导致阻尼器内磁通变化引起的阻力, 对薄壁件的加工过程进行振动抑制。Innoclamp 公司的智能夹具^[87], 如图 13 所示, 通过在叶片刚度最弱的区域给予夹持来提高叶片的加工刚性, 同时夹持部位上可集成多种传感器采集装夹信息并控制装夹参数。HAO^[88]设计了一种在工序中监测、工序间释放并消除工件变形的自适应浮动装夹机构, 将大型航空结构件的平均变形量降低了 60% 以上。但目前智能夹具在复杂薄壁零件加工中的应用很少, 究其原因在于目前针对强时变条件下复杂薄壁件的工件-夹具系统动力学特性的研究不够深入, 难以获取复杂工况下工

图 11 双自由度柔性铰链智能抑振夹具

图 12 旋转式叶轮智能抑振夹具

艺系统的动态响应。而且复杂薄壁件的切削振动随着切削位置不断改变, 仅在夹具中嵌入一到两个作动器难以实时抑制整个加工过程中的切削颤振。

图 13 Innoclamp 公司整体叶盘智能夹具

3.3 智能夹具控制策略

智能夹具便于直接改装到各种机床上, 相比其他诸多铣削抑振方法更具工业价值。而其核心便在于控制器的控制策略。稳定性差的控制策略可能会在切削系统中额外引入未知力, 造成刀具磨损甚至工件表面损伤, 因此通过智能夹具抑制切削颤振的实际效果相当程度上取决于所采用的控制逻辑。

WANG^[89]针对薄壁件的铣削时变特性, 基于压电纤维贴片建立了时空依变 PD 振动控制系统, 该系统的比例系数与微分系数可对工件加工位置的变化做出自适应的调整。CHEN^[90]采用 PID 控制器控制音圈电机来抑制薄板件的切削颤振。BRECHER^[84]以双积分器, 三阶高通与一阶低通组成的滤波器作为其设计的主动夹具的闭环控制传递函数, 并利用补偿滤波器调整有关振幅和相移, 实验结果显示工件的动柔度降低到了静态水平。一般情况下自适应闭环控制需要的驱动带宽更大, 但受限于惯性力和驱动装置的电气可操作性, 压电作动器的带宽难以拓宽。而 SALLESE^[91-93]发现当驱动频率接近齿通频率的一半时再生颤振可以被有效打断, 并基于此现象开发了一种允许低频驱动的开环策略来代替普通的闭环控制, 实验表明低频控制信号能够干扰切削过程, 从而减轻超过控制带宽的颤振频率并增大极限轴向切深, 提高加工效率。

随着现代控制理论的逐步发展和完善, 更多学者致力于主动控制算法的研究。许多先进的控制算法已在振动主动控制研究领域广泛应用。PARUS^[94]采用 Kalman 滤波计算系统的状态参数, 基于 LQG 算法和单自由度压电作动器实现了铣削颤振控制。TAVAKOLPOUR^[95]针对柔性板结构提出了一种基于有源压电驱动器和自主迭代学习反馈的主动振动控制方法。RASHID^[96]基于最小均方滤波算法和压电作动器, 设计并制造了托盘夹具主动控制系统,

实验结果显示该控制系统可以有效地提高加工表面质量。FORD^[97]基于自适应的 FxLMS 滤波算法搭建了动态切削力与加速度反馈系统, 有效降低了工件的表面粗糙度和波纹度。LONG^[98-99]以采集到的工具与工件的相对振动作为反馈信号, 通过基于 H_∞ 鲁棒混合灵敏度方法设计的二自由度主动减振控制器控制作动器产生主动力, 抵消刀具与工件的相对振动。该方法能够扩大铣削的稳定性区域, 并具有一定的闭环鲁棒稳定性。但受限于作动器的输出力, 该方法只能控制刀齿通过频率小于 200 Hz 的铣削振动。SALLESE^[82]根据大量采集的智能夹具振动响应信号训练人工神经网络模型, 识别需要抑制的振动主频, 然后通过遗传算法寻优得到最佳的抑振信号相位和振幅。PAUL^[100]采用二型模糊控制逻辑实现了对 PD/PID 控制器的非线性补偿, 显著提高了 PD/PID 控制器抑制切削振动的稳定性。但由于二型模糊控制增加了模态降阶环节, 导致该方法的计算量十分繁琐。张兴武^[101]基于神经网络算法, 构造频域主动控制架构, 对薄壳结构进行了多目标振动优化控制。相较于时域法, 该方法一个控制循环只需一次 FFT 变换, 时效性更容易保障。

工件-夹具系统动力学建模、控制策略以及试验研究是通过智能夹具主动控制切削颤振的关键。而建模是控制的前提, 但目前的智能夹具系统所装夹的工件结构都比较简单, 原因在于复杂曲面薄壁结构在切削过程呈现出的弱刚性、强时变、非线性特征, 使得复杂薄壁件的切削动力学建模难度极大。而且, 目前的颤振控制大多为事后控制, 即控制作用于颤振发生之后, 存在较为明显的时滞性。此外, 目前研究中的智能夹具原型多为分布式离散系统, 其传感器、作动器以及控制器都未充分集成到夹具中, 在工业现场的应用比较受限。所以, 面向航空用的复杂薄壁结构件的智能夹具还需要开展进一步的研究与应用验证。

4 结论与展望

控制薄壁零件加工变形与振动的装夹技术一直是近二十年来的研究热点。尽管目前国内外学者在传统夹具的装夹力、装夹布局的优化, 以及机构式辅助支撑的设计制造方面已经取得若干重要成果。但随着现代传感、数据处理技术的发展, 传统的夹具逐渐向自动化、柔性化、智能化方向发展, 逐步融入工件-机床-夹具系统中, 成为智能化工艺装备系统的重要组成部分。未来控制薄壁零件加工变形

与振动的装夹技术应重点从动力学建模、工况感知决策、机床-夹具协同三个方面开展研究工作。

(1) 建立适用于强时变条件下的复杂薄壁工件-夹具系统动力学模型。现有的装夹布局优化研究大多将工件-夹具系统视为静态或准静态的。然而, 加工过程中材料的连续去除、工件几何形状的改变以及结构刚度减弱等动态时变因素均会导致切削加工的不稳定性。因此, 在工件-夹具系统动力学建模时需要考虑时变工况因素。

(2) 智能夹具的关键在于对工艺系统加工状态的实时感知、决策以及控制。切削加工变形与颤振具有突发性, 易对工件加工质量、加工精度造成不可逆的影响。因此, 智能夹具对加工工况感知与决策的实时性至关重要。需综合考虑离线的变形与颤振预测模型以及在线监测信号的快速特征提取与识别, 构建在线工况监测系统, 研究具有自适应和自学习能力的控制策略, 以便于驱动执行机构迅速消除切削过程中已经出现或将要出现的不稳定工况, 最终实现对加工变形及颤振的闭环控制。

(3) 智能夹具未来可以将工况的离线预测、在线监测以及变形颤振控制, 集成于机床控制系统, 与机床组成智能化工艺装备, 从而真正实现在复杂工况条件下对弱刚性薄壁件的工艺系统进行实时调控。

参 考 文 献

- [1] RAI J K, XIROUCHAKIS P. Finite element method based machining simulation environment for analyzing part errors induced during milling of thin-walled components[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48(6): 629-643.
- [2] CHEN W, XUE J, TANG D, et al. Deformation prediction and error compensation in multilayer milling processes for thin-walled parts[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(11): 859-864.
- [3] 陈冰, 杨宝通, 牛智炀, 等. 面向航空发动机薄壁零件加工的自适应夹具设计现状与进展[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(7): 14-24.
CHEN Bing, YANG Baotong, NIU Zhiyang, et al. Adaptive fixture designing of thin-walled aero-engine workpiece: A survey of the state of art[J]. *Aeronautical manufacturing technology*, 2019, 62(7): 14-24.
- [4] ARNAUD L, GONZALO O, SEGUY S, et al. Simulation of low rigidity part machining applied to thin-walled structures[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 54(5-8): 479-488.
- [5] BAKKER O J, PAPASTATHIS T, POPOV A A, et al. Active fixturing: Literature review and future research directions[J]. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(11): 3171-3190.
- [6] 王少锋, 洪军, 王建国, 等. 大型薄壁件的多点支承/定位方法研究[J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(6): 122-129.
WANG Shaofeng, HONG Jun, WANG Jianguo, et al. Multi-point location method of large-scale thin-wall component[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(6): 122-129.
- [7] 张远远, 王仲奇, 康永刚. 基于多点技术的柔性支撑定位方法研究[J]. *机械设计与制造工程*, 2013, 42(5): 7-11.
ZHANG Yuanyuan, WANG Zhongqi, KANG Yonggang. Flexible supporting and positioning method based on multi-point technology[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2013, 42(5): 7-11.
- [8] KANG Y, RONG J C, YANG J, et al. Computer-aided fixture design verification, assembly[J]. *Automation*, 2002, 22(4): 350-359.
- [9] CAI W, HU S J, YUAN J X. A variational method of robust fixture configuration design for 3-D workpieces[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME*, 1997, 119(4A): 593-602.
- [10] LI B, MELKOTE S N. Improved workpiece location accuracy through fixture layout optimization[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1999, 39(6): 871-883.
- [11] 秦国华, 张卫红. 基于最小范数原理的夹紧力优化设计算法[J]. *中北大学学报*, 2011, 32(4): 442-447.
QIN Guohua, ZHANG Weihong. An optimal method to clamping force determination based on the minimum norm principle[J]. *Journal of North University of China*, 2011, 32(4): 442-447.
- [12] WANG H M, QIN G H, WU Z X, et al. A workpiece stability-based iterative planning of clamping forces for fixturing layout specification of a complex workpiece[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103(5-8): 2017-2035.
- [13] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
CHEN Baolin. Optimization theory and algorithm[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

- [14] 秦国华, 何志芬, 王华敏, 等. 基于动力学与遗传算法的工件位置偏离预测与控制方法[J]. 机械工程学报, 2017, 53(1): 110-120.
QIN Guohua, HE Zhifen, WANG Huamin, et al. Prediction and control of workpiece position deviation based on dynamics and genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(1): 110-120.
- [15] 秦国华, 王子琨, 吴竹溪, 等. 基于表面网格离散化与遗传算法的复杂工件装夹布局规划方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(13): 195-203.
QIN Guohua, WANG Zikun, WU Zhuxi, et al. A planning method of fixturing layout for complex workpieces based on surface discretization and genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(13): 195-203.
- [16] CAI W, HU S J, YUAN L J X. Deformable sheet metal fixturing: Principles, algorithms, and simulations[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 1996, 118(3): 318-324.
- [17] 陈禹至, 陈蔚芳, 施圣杰. 一种薄壁件柔性多点加工工装布局优化技术[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(5): 61-63.
CHEN Yuzhi, CHEN Weifang, SHI Shengjie. multi-point flexible tooling layout optimization technique for thin-walled workpieces[J]. Mechanical manufacture and Automation, 2018, 47(5): 61-63.
- [18] WANG Y, CHEN X, LIU Q, et al. Optimization of machining fixture layout under multi-constraints[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(12-13): 1291-1300.
- [19] WANG H, HUANG L J, YAO C, et al. Integrated analysis method of thin-walled turbine blade precise machining[J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2015, 16(5): 1011-1019.
- [20] 王运巧, 梅中义, 范玉青. 薄壁弧形件装夹布局有限元优化[J]. 机械工程学报, 2005(6): 214-217, 223.
WANG Yunqiao, MEI Zhongyi, FAN Yuqing. Finite element optimization of the clamping layout of thin-walled arc-shaped part[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005(6): 214-217, 223.
- [21] 何志芬. 夹具装夹布局动力学分析与优化[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.
HE Zhifen. The prediction of clamping deformation and the optimization method of fixture layout for the thin-wall workpiece[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2016.
- [22] VASUNDARA M, PADMANABAN K P. Recent developments on machining fixture layout design, analysis, and optimization using finite element method and evolutionary techniques[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(1-4): 79-96.
- [23] 杨阳. 基于遗传算法和有限单元法的夹具布局优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
YANG Yang. Fixture layout optimization based on genetic algorithm and finite element method[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [24] KULANKARA K, SATYANARAYANA S, MELKOTE S N. Iterative fixture layout and clamping force optimization using the genetic algorithm[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2002, 124(1): 119-125.
- [25] 路冬. 航空整体结构件加工变形预测及装夹布局优化[D]. 济南: 山东大学, 2007.
LU Dong. Deformation prediction and fixture layout optimization of aerospace monolithic components[D]. Jinan: Shandong University, 2007.
- [26] 周孝伦, 张卫红, 秦国华, 等. 基于遗传算法的夹具布局和夹紧力同步优化[J]. 机械科学与技术, 2005(3): 339-342.
ZHOU Xiaolun, ZHANG Weihong, QIN Guohua, et al. On optimizing fixture layout and clamping force simultaneously using genetic algorithm[J]. Mechanical Science and Technology, 2005(3): 339-342.
- [27] 陈蔚芳, 倪丽君, 王宁生. 夹具布局和夹紧力的优化方法研究[J]. 中国机械工程, 2007(12): 1413-1417.
CHEN Weifang, NI Lijun, WANG Ningsheng. Investigation on optimization method for fixture layout and clamping forces[J]. China Mechanical Engineering, 2007(12): 1413-1417.
- [28] 许晓宇, 赵晓慈. 夹紧顺序、夹具布局和夹紧力对装夹变形影响与同步优化分析研究[J]. 图学学报, 2016, 37(1): 20-24.
XU Xiaoyu, ZHAO Xiaoci. Clamping sequence, fixture layout and clamping force on machining deformation and synchronous optimization analysis[J]. Journal of Graphics, 2016, 37(1): 20-24.
- [29] HOSSEIN H, VAHID A, MOHSEN S, et al. Simultaneous fixturing layout and sequence optimization based on genetic algorithm and finite element method[J]. International Journal of Advanced Manufacturing

- Technology, 2018, 97: 3191-3204.
- [30] 许稚委. 基于自适应夹紧力的飞机结构件加工变形研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.
- XU Zhiwei. Research on deformation of aircraft structural parts based on adaptive clamping force[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017.
- [31] BAI X, HU F, HE G Y, et al. A memetic algorithm for multi-objective fixture layout optimization[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 229(16): 3047-3058.
- [32] DOU J, WANG X, WANG L. Machining fixture layout optimization under dynamic conditions based on evolutionary techniques[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(14-16): 4294-4315.
- [33] 王仲奇, 李诚, 杨勃, 等. 基于花授粉算法的曲面薄壁件定位布局优化[J]. 中国机械工程, 2017, 28(18): 2231-2236.
- WANG Zhongqi, LI Cheng, YANG Bo, et al. Fixture locating layout optimization of curved thin-walled parts based on FDA[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(18): 2231-2236.
- [34] XING Y F, HU M, ZENG H, et al. Fixture layout optimization based on a non-domination sorting social radiation algorithm for auto-body parts[J]. International Journal of Production Research, 2015, 53(11): 3475-3490.
- [35] XING Y F. Fixture layout design of sheet metal parts based on global optimization algorithms[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2017, 139(10): 1-10.
- [36] 韩忠华. Kriging 模型及代理优化算法研究进展[J]. 航空学报, 2016, 37(11): 3197-3225.
- HAN Zhonghua. Kriging surrogate model and its application to design optimization: A review of recent progress[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 37(11): 3197-3225.
- [37] SUNDARARAMAN KA, PADMANABAN KP, SABAREESWARAN M. Optimization of machining fixture layout using integrated response surface methodology and evolutionary techniques[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 230(13): 2245-2259.
- [38] 于金, 王胤棋. 多元非线性回归的非对称薄壁件装夹位置优化[J]. 机床与液压, 2017, 45(23): 142-145.
- YU Jin, WANG Yinqi. Clamping position optimization of asymmetric thin-walled part by multi-variate nonlinear regression[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(23): 142-145.
- [39] 于金, 王胤棋. 大型曲面薄壁件多点柔性工装装夹布局优化[J]. 工具技术, 2017, 51(10): 83-87.
- YU Jin, WANG Yinqi. Optimization of multi-point flexible fixture clamping layout for large size curved thin-walled part[J]. Tool Technology, 2017, 51(10): 83-87.
- [40] 秦国华, 赵旭亮, 吴竹溪. 基于神经网络与遗传算法的薄壁件多重装夹布局优化[J]. 机械工程学报, 2015, 51(1): 203-212.
- QIN Guohua ZHAO Xuliang, WU Zhuxi. Optimization of multi-fixturing layout for thin-walled workpiece based on neural network and genetic algorithm[J]. Journal of mechanical engineering, 2015, 51(1): 203-212.
- [41] 吴竹溪, 秦国华. 基于进化神经网络的薄壁件加工变形预测与抑制方法[J]. 南昌航空大学学报, 2020, 34(3): 80-87.
- WU Zhuxi, QIN Guohua. Optimized neural network based prediction and control of machining deformation for thin-walled workpieces[J]. Journal of Nanchang Hangkong University, 2020, 34(3): 80-87.
- [42] 刘玉梅. 薄板件切削回弹变形机理及装夹优化方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- LIU Yumei. Research on deformation mechanism of spring back induced by cutting thin part and optimization of fixture[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [43] SELVAKUMAR S, ARULSHRI K P, PADMANABAN K P, et al. Design and optimization of machining fixture layout using ANN and DOE[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(9-12): 1573-1586.
- [44] WANG Z Q, YANG B, KANG Y G, et al. Development of a prediction model based on RBF neural network for sheet metal fixture locating layout design and optimization[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2016, 2016: 1-6.
- [45] 杨元, 王仲奇, 杨勃, 等. 基于 SVR 的航空薄壁件夹具布局优化预测模型[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(6): 1302-1309.
- YANG Yuan, WANG Zhongqi, YANG Bo, et al. Prediction model for aeronautical thin-walled part fixture layout optimization based on SVR[J]. Computer

- Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(6): 1302-1309.
- [46] YANG B, WANG Z Q, YANG Y, et al. Optimum fixture locating layout for sheet metal part by integrating kriging with cuckoo search algorithm[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1-4): 327-340.
- [47] IWABE H, MIZUOCHI M, YOKOYAMA K. High accurate machining of thin wall shape workpiece by end mill: proposal of twin spindle type machining and some experiments[J]. Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers, 1999, 65(632): 1719-1724.
- [48] FEI J X, LIN B, YAN S, et al. Chatter mitigation using moving damper[J]. Journal of Sound & Vibration, 2017, 410: 49-63.
- [49] LIU C, SUN J, LI Y, et al. Investigation on the milling performance of titanium alloy thin-walled part with air jet assistance[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95: 2865-2874.
- [50] 刘随建, 刘健伟, 吴志新, 等. 一种薄壁空间曲面零件防止切削变形的辅助加工装置: 中国, CN201110396785.5[P]. 2013-06-05.
- LIU Suijian, LIU Jianwei, WU Zhixin, et al. An auxiliary machining device for preventing cutting deformation of thin-wall space curved parts: China, CN201110396785.5[P]. 2013-06-05.
- [51] 张定华, 张笑凡, 罗明, 等. 航空发动机叶片加工在线测量用组合式夹具: 中国, CN201410129372.4[P], 2014-07-09.
- ZHANG Dinghua, ZHANG Xiaofan, LUO Ming, et al. Modular fixture for online measurement of aero engine blade machining: China, CN201410129372.4[P], 2014-07-09.
- [52] WU D, WANG H, PENG J, et al. Machining fixture for adaptive CNC machining process of near-net-shaped jet engine blade[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(04): 1311-1328.
- [53] WANG H, HUANG L, YAO C, et al. Integrated analysis method of thin-walled turbine blade precise machining[J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2015, 16: 1011-1019.
- [54] LX451, STARRAG[EB/OL]. [2020-10-20]. <https://www.starrag.com/zh-cn/machine/lx-451/33>.
- [55] 王娇. 面向加工变形控制的叶片辅助支撑技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
- WANG Jiao. Research on auxiliary support technology for blade machining deformation control[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019.
- [56] 王胤棋. 基于辅助支撑的机匣加工变形研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.
- WANG Yinqi. Research on machining deformation of casing based on auxiliary support[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2018.
- [57] 周泽斌. 薄壁结构件加工变形机理及夹具优化设计方法研究[D]. 上海: 东华大学, 2011.
- ZHOU Zebin. Deformation prediction and fixture layout optimization of thin walled workpiece[D]. Shanghai: Donghua University, 2011.
- [58] 崔惠婷, 陈蔚芳, 冯婷. 装夹优化抑制薄壁件加工振动研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(5): 138-142.
- CUI Huiting, CHEN Weifang, FENG Ting. The study on vibration suppression for thin-walled parts based on fixture optimization[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2016(5): 138-142.
- [59] ZENG S S, WAN X J, et al. A novel approach to fixture design on suppressing machining vibration of flexible workpiece[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012, 58: 29-43.
- [60] DO M D, SON Y, CHOI H, et al. Optimal workpiece positioning in flexible fixtures for thin-walled components[J]. Computer-aided Design, 2018, 95: 14-23.
- [61] 张志杰, 韩子渊, 张占辉, 等. 曲面薄壁零件的仿形装夹优化研究[J]. 机械工程师, 2015(9): 117-119.
- ZHANG Zhijie, HAN Ziyuan, ZHANG Zhanhui, et al. Research on optimal design of fixture for thin wall parts with curved surfaces[J]. Mechanical Engineer, 2015(9): 117-119.
- [62] 李尚政, 刘宏. 弱刚度件加固装夹技术研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2003(11): 5-7.
- LI Shangzheng, LIU Hong. Research on reinforce fixture technologies of the weak rigidity workpiece[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2003(11): 5-7.
- [63] GAO B, SUN J, LI J F. Research on machining accuracy in milling Ti6Al4V thin-walled component with paraffin reinforcement[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 268-270: 504-509.
- [64] WANG Y F, WONG Y S, FUH J Y H. Off-line modelling and planning of optimal clamping forces for an intelligent

- fixturing system[J]. *International Journal of Machine Tools Manufacture*, 1999, 39(2): 253-271.
- [65] MOHRING H, WIEDERKEHR P. Intelligent fixtures for high performance machining[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 46: 383-390.
- [66] MERVYN F, KUMAR A S, NEE A Y, et al. An adaptive fixture design system for integrated product and process design[C]// *IEEE International Conference on Automation Science & Engineering*. IEEE, 2005: 87-92.
- [67] NEE A Y C, KUMAR A S, TAO Z J. An intelligent fixture with a dynamic clamping scheme[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2000, 214(3): 183-196.
- [68] GONZALO O, SEARA J M, GURUCETA E, et al. A method to minimize the workpiece deformation using a concept of intelligent fixture[J]. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 2017, 48: 209-218.
- [69] LUO M, ZHANG X F, ZHANG D H, et al. On-line compressor blade stiffness enhancement in multi-axis machining process by controlling of tension force[J]. *Ifac Papers Online*, 2015, 48(3): 664-667.
- [70] BAKKER O J. Control methodology and modelling of active fixtures[D]. Nottingham: University of Nottingham, 2010.
- [71] PAPASTATHIS T. Modelling and design methodology for fully-active fixtures[D]. Nottingham: University of Nottingham, 2011.
- [72] 王斌利, 李迎光, 郝小忠, 等. 复杂结构件数控加工浮动装夹自适应控制方法[J]. *航空制造技术*, 2017(10): 64-69.
- WANG Binli, LI Yingguang, HAO Xiaozhong, et al. An adaptive control method of floating fixture for NC machining of complex structural parts[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017(10): 64-69.
- [73] SUN W Y, LUO M, ZHANG D H. Machining vibration monitoring based on dynamic clamping force measuring in thin-walled components milling[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107: 2211-2226.
- [74] BRECHER C, ESSER M, WITT S. Interaction of manufacturing process and machine tool[J]. *CIRP Annals*, 2009, 58(2): 588-607.
- [75] ALTINTAS Y, WECK M. Chatter stability of metal cutting and grinding[J]. *CIRP Annals*, 2004, 53(2): 619-642.
- [76] GROSSI N, SCIPPA A, SALLESE L, et al. Spindle speed ramp-up test: A novel experimental approach for chatter stability detection[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2015, 89: 221-230.
- [77] RIVERO A. Thin-wall machining of light alloys: A review of models and industrial approaches[J]. *Materials*, 2019, 12(12): 2012.
- [78] MONTEVECCHI F, GROSSI N, SCIPPA A, et al. Improved RCSA technique for efficient tool-tip dynamics prediction[J]. *Precision Engineering*, 2016, 44: 152-162.
- [79] 张钊. 薄壁结构铣削过程颤振分析及抑制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- ZHANG Zhao. Chatter analysis and mitigation for the milling of thin-walled structure[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018.
- [80] CLAEYSSSEN F, LHERMET N, MAILLARD T, et al. Magnetostrictive actuators compared to piezoelectric actuators[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4763: 194-200.
- [81] 江浩. 铣削加工振动主动控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- JIANG Hao. Active vibration control in milling[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009.
- [82] SALLESE L, GROSSI N, TSAHALIS J, et al. Intelligent fixtures for active chatter control in milling[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 55: 176-181.
- [83] MOHRING H, WIEDERKEHR P, LEREZ C, et al. Sensor integrated CFRP structures for intelligent fixtures[J]. *Procedia Technology*, 2016, 26: 120-128.
- [84] BRECHER C, MANOHARAN D, LADRA U, et al. Chatter suppression with an active workpiece holder[J]. *Production Engineering*, 2010, 4(2-3): 239-245.
- [85] ABELE E, HANSELKA H, HAASE F, et al. Development and design of an active work piece holder driven by piezo actuators[J]. *Production Engineering*, 2008, 2(4): 437-442.
- [86] YANG Y, XU D, LIU Q. Vibration suppression of thin-walled workpiece machining based on electromagnetic induction[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, 30(7): 829-835.
- [87] Innoclamp GmbH, Stabilisierendes Blisker Spannsystem [EB/OL]. [2020-10-20]. <https://www.innoclamp.de/blisker>.
- [88] HAO X, LI Y G, CHEN G X, et al. 6+X locating principle based on dynamic mass centers of structural parts machined by responsive fixtures[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 125:

- 112-122.
- [89] WANG S, SONG Q, LIU Z. Vibration suppression of thin-walled workpiece milling using a time-space varying PD control method via piezoelectric actuator[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105: 2843-2856.
- [90] CHEN P, ZHAI J, ZHANG X, et al. Research on active vibration control of thin-walled workpiece in milling based on voice coil motor[J]. Springer Berlin Heidelberg, 2013, 8103: 503-512.
- [91] SALLESE L, SCIPPA A, GROSSI N, et al. Investigating actuation strategies in active fixtures for chatter suppression[J]. Procedia CIRP, 2016, 46: 311-314.
- [92] SALLESE L, GROSSI N, SCIPPA A, et al. Numerical investigation of chatter suppression in milling using active fixtures in open-loop control[J]. Journal of Vibration and Control, 2018, 24(9): 1757-1773.
- [93] SALLESE L, INNOCENTI G, GROSSI N, et al. Mitigation of chatter instabilities in milling using an active fixture with a novel control strategy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(9): 2771-2787.
- [94] PARUS A, POWALKA B, MARCHELEK K, et al. Active vibration control in milling flexible workpieces[J]. Journal of Vibration and Control, 2013, 19(7): 1103-1120.
- [95] TAVAKOLPOUR A R, MAILAH M, DARUS I Z, et al. Self-learning active vibration control of a flexible plate structure with piezoelectric actuator[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2010, 18(5): 516-532.
- [96] RASHID A, NICOLESCU C M. Active vibration control in palletized workholding system for milling. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(12): 1626-1636.
- [97] FORD D, MYERS A, HAASE F, et al. Active vibration control for a CNC milling machine[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2013(2): 230-245.
- [98] LONG X, JIANG H, MENG G. Active vibration control for peripheral milling processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(5): 660-670.
- [99] 郑平旭, 江浩, 龙新华, 等. 基于 H_∞ 的铣削加工振动主动控制[J]. 振动与冲击, 2014, 33(5): 31-36.
- ZHENG Pingxu, JIANG Hao, LONG Xinhua, et al. Active vibration control of milling processes based on H_∞ [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(5): 31-36.
- [100] PAUL S, MORALES-MENENDEZ R. Active control of chatter in milling process using intelligent PD/PID control[J]. IEEE Access, 2018, 6: 72698-72713.
- [101] 张兴武, 刘金鑫, 陈雪峰, 等. 基于神经网络的薄壳多目标振动优化控制研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(9): 56-64.
- ZHANG Xingwu, LIU Jinxin, CHEN Xuefeng, et al. Neural network based multi-objective active vibration optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(9): 56-64.

作者简介: 吴宝海, 男, 1975 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为复杂结构多轴数控加工技术、自适应智能加工、智能制造。

E-mail: wubaohai@nwpu.edu.cn

郑志阳, 男, 1997 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为复杂薄壁结构智能装夹技术、装夹布局优化。

E-mail: zhengzhiyang@mail.nwpu.edu.cn

张莹(通信作者), 女, 1981 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为计算机辅助几何设计、多轴数控加工及自适应加工技术。

E-mail: zhangyingcdim@nwpu.edu.cn