

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*

陈冰, 杨宝通, 牛智炆, 齐俊德

(西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072)

[摘要] 复杂薄壁工件是航空发动机中的一类关键、重要零件, 如何抑制因其弱刚性、材料难加工、强时变特征导致加工过程产生的变形和振动已成为亟待解决的瓶颈问题。夹具的合理布局及提升装夹稳定性可以有效地抑制加工振动。目前, 夹具系统的智能化已经成为制约智能加工技术实现的主要瓶颈。研制能够自适应薄壁零件复杂工况的夹具设计成为研究热点。从工件-夹具动力学建模, 夹具布局优化、夹紧力优化以及目前自适应夹具设计等几个方面进行综述, 希望为今后自适应夹具设计与工程应用提供帮助。

关键词: 航空发动机; 复杂薄壁件; 布局优化; 夹紧力优化; 自适应夹持

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.07.014



陈冰

副教授, 主要研究方向为工件-夹具动力学建模与主动自适应夹具设计, 机器人抛磨工艺与装备, 面向功率的加工能耗建模与分析优化。

航空发动机关键重要零件(叶片、机匣、叶盘等)大量采用高性能/轻量化复杂薄壁整体结构和高强度耐高温材料, 以满足在高负荷、高转

速、高温高压等复杂极端环境下的高可靠、长寿命等服役要求。这类复杂薄壁零件由于加工难度大、精度要求高, 表面质量要求高等特点, 通常采用多轴数控加工完成。因此, 面向复杂薄壁零件的多轴数控加工技术是提高国家重大装备制造水平、国防安全保障能力的核心关键技术。

零件切削成形的本质是多余材料的切除过程。在此过程中, 由于采用高强度耐高温材料, 导致刀具与工件接触界面力热耦合效应更加剧烈; 其次, 零件薄壁特征使得局部抗变形与抑振能力更加薄弱; 同时, 随着工件材料的连续切除, 刀具位姿和工艺参数变化引起的质量、结构变化对工艺系统模态变化的影响更加显著。从而导致复杂薄壁零件加工过程呈现出弱刚性、强时变、非线性等特性。在这样复杂苛刻的工况环境下, 极易引起工件-刀具-夹具-机床构成

的工艺系统各要素交互作用下的高阶复杂响应, 使得加工过程失稳。从而导致针对加工变形、切削颤振以及表面质量的预测和精确控制愈加复杂和困难, 严重制约了复杂薄壁零件多轴加工质量和效率提升。

造成上述问题的根本原因在于目前针对强时变、非线性、弱刚度条件下的复杂薄壁零件加工工艺系统动力学模型不够全面准确, 主要针对工件-刀具工艺子系统进行建模与分析, 针对强时变条件下复杂薄壁零件的工件-夹具系统力学特性研究不够深入, 使得无法精确刻画复杂高阶响应下工件-夹具接触界面的耦合作用和工艺系统动态响应。夹具是制造过程中用于定位、夹紧和支撑工件的重要元件, 相对于工艺系统其他部分, 夹具系统的主动自适应调控能力较弱, 无法在强激励输入强时变工况下进行感知预测与主动调控, 从而难以对变形、颤振等进行抑制。夹具系统的智能化已经成为制约智能

* 基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX04011011)。

加工技术实现的主要瓶颈。

综上,针对薄壁零件多轴加工复杂工艺系统的动态特性及其及时变特性,建立工件-夹具系统动力学模型,研制主动自适应夹具成为必然。

自适应夹具总体设计架构

在薄壁件加工过程中,工件在夹紧力、铣削力、摩擦力、自身的重力、由于惯性所产生的颤振、刀具与工件接触产生的热量等因素作用下,导致加工工件不符合要求,影响工件加工精度和表面质量。在夹具设计过程中,除了要考虑工件的结构特性和形状、尺寸外,还要考虑加工过程中的影响因素,选取合理的装夹布局方案,从而提供准确的位置(定位)、合适的刚度支撑、足够的夹紧力和稳定的工件夹持。

自适应夹具是夹具技术的最新发展产物,它拥有具有感知功能的夹具元件,能够及时响应外部激励。对夹紧元件、定位元件和支撑元件进行自适应调整以适应工况变化^[1]。自适应夹具系统由3部分组成,如图1所示。

(1)感知模块。感知模块的作用是采集来自加工动态环境的数据信息。其采集的数据信息主要分为两种,每一种信息在采集接收后感知模块均会有不同的响应。第一种信息是告知该夹具系统初始工件模型已创建完成,接收信息后感知模块将触发自动夹具设计模块来设计夹具初始装夹布局;第二种信息来自夹具构型管理器,当工件模型发生变化时,夹具构型管理器会发出该信息,感知模块接收此信息后会触发自适应夹具设计模块来处理设计更改状况。

(2)推理模块。推理模块由自动夹具设计子模块、工况记忆子模块和自适应夹具设计子模块3部分组成。自动夹具设计子模块基于进化搜索算法为初始毛坯件设计夹具装

夹方案。而其计算结果会不断进化,在加工过程中出现的所有求解结果都会存储在工况记忆子模块中。随着加工过程的不断推进,当工件的几何尺寸发生变化时,自适应夹具设计子模块会调用工况记忆子模块中存储的现有解集作为进化算法的初始种群,以进行进一步装夹设计。

(3)执行模块。执行模块根据推理模块返回的信息驱动夹紧元件(液压、气动)调整夹紧力,从而实现控制装夹变形,提高装夹稳定性。

自适应夹具应该满足以下条件^[2]:

(1)自动配置时间短;

(2)精确定位,能够通过传感器实现精确定位和定向夹具布局;

(3)在测量系统的支持下实现误差补偿和快速重新定位;

(4)在制造过程中重新配置夹具和支撑,实现自适应夹具布局构型自主调整优化;

(5)主动控制夹紧力,最大限度地减少零件夹具的变形,减少误差。

综上,从夹具设计角度寻找一种合适的布局,并根据实时工况进行基于约束的布局优化是关键。同时需要根据实际工况进行夹具稳定性分析、夹紧力和支撑力动态配置与自适应调控,图2描述了自适应夹具设计

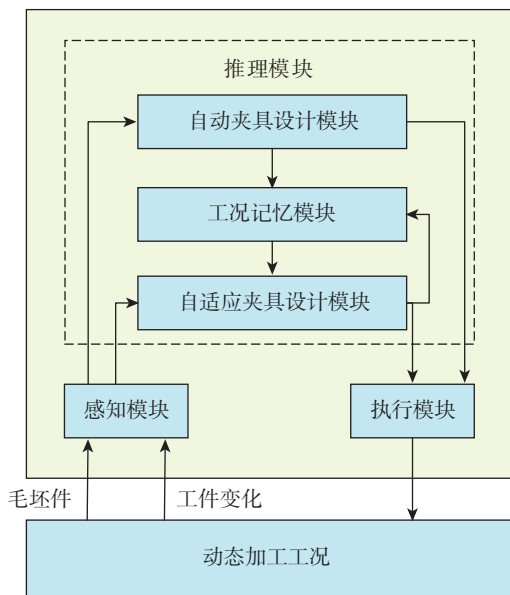


图1 自适应夹具结构

Fig.1 Structure of adaptive fixture

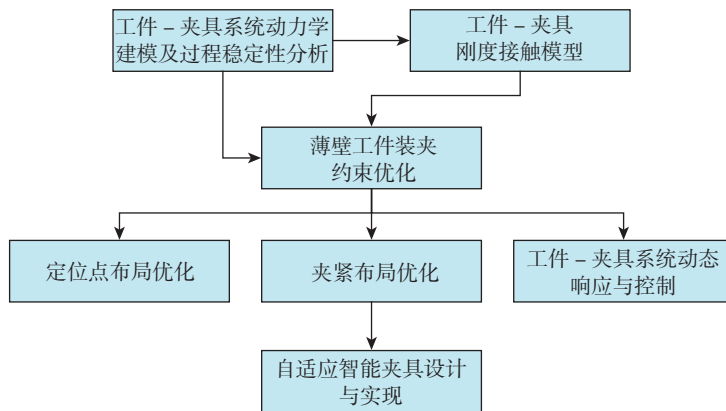


图2 自适应夹具设计技术路线

Fig.2 Workflow of adaptive fixture design

的总体设计架构。

工件-夹具系统动力学建模与过程稳定性分析

(1) 弱刚性工艺系统动力学建模。

在复杂薄壁零件铣削过程中,工件的弱刚性是导致变形、颤振等系统失稳的主要原因。Budak^[2]等采用有限元法分析工件变形情况,建立了刀具-工件四自由度动力学模型。Seguy等^[3]结合有限元方法和激振测试,采用多模态法建立了薄壁件铣削加工模型。万敏等^[4]提出基于三维非规则网格的刀具-工件变形耦合迭代格式和恒定网格下材料去除效应的变刚度处理方法。Meshreki等^[5]针对壁板框类零件加工过程,采用半解析法研究工件壁厚变化对工艺系统动力学的影响。孙珊珊^[6]等针对薄壁零件铣削过程中工件质量和刚度时变的特点,建立了刚性时变工艺系统动力学模型。张小明^[7]采用矩阵摄动法研究了叶片铣削过程中工件模态的近似快速计算方法。矩阵摄动法一般需要与激振试验法和有限元法进行结合以确定准确的边界条件和系统参数。

综上所述,目前弱刚性工艺系统建模主要考虑的刀具与工件的交互作用以及两者之间力-位移耦合作用。对于时变条件下工件-夹具系统的动力学模型与刀具系统耦合的模型较少。

(2) 弱刚性工艺系统响应预测与控制。

目前针对弱刚性工艺系统稳定性预测方法主要包括解析法、数值法。在解析法方面,Altintas^[8]发展了铣削过程颤振稳定性的单频率法以及多频率法,并针对刀轴轴向动力学问题,提出将二维颤振稳定性模型扩展到三维空间。在数值法方面,Insperger等^[9]提出了半离散预测方法(SDM),采用一系列分段常

微分方程逼近延迟微分方程的迟滞项,从而用线性方法进行系统求解。Liu等^[10]应用埃尔米特差值提出了一种针对铣削加工过程稳定性求解的高效全离散方法(HFDM)。Schmitz等^[11]提出了在频域内通过考虑稳定切削过程中结构的强迫振动响应来预测表面位置误差的方法。Insperger等^[12]将运动控制方程分解为描述强迫振动的常微分方程和描述颤振的时滞微分方程,通过求解常微分方程得到动态加工误差。

弱刚性工艺系统动态响应控制的主要方法包括工艺参数优化法、刀齿间距优化法、系统结构刚度优化和阻尼抑振法。汤爱君^[13]等建立了薄壁零件铣削过程颤振稳定性模型,得到了包括轴向切深、径向切深和主轴转速的三维稳定性叶瓣图,并在此基础上优选了稳定加工的切削参数。Luo等^[14]依据加工振动图进行加工余量分布和材料去除顺序优化,提高加工过程稳定性。Budak^[15]提出了变齿间角铣刀设计的解析方法,并通过切削试验和工程应用表明,合理优化刀具刀齿间距可以很好地提升加工过程稳定性。Namazi等^[16]分析了刀柄和主轴之间的接触刚度和阻尼对稳定性的影响。刘立佳^[17]等建立了变刚度-约束阻尼减振镗杆动力学模型,并完成了变刚度-约束阻尼型减振镗杆。

综上所述,弱刚度工艺系统动态响应预测控制研究主要集中于简单切削条件下的优化与控制。没有充分考虑强时变动力学特性,多侧重于静态或者准静态情况,而忽略铣削过程动态性能。亟需建立考虑刀具-工件-夹具间的强烈非线性耦合作用的高精度动力学模型,实现对加工过程的有效预测与分析。

(3) 工件-夹具系统动力学建模及稳定性分析。

夹具是保证工件在加工过程中的准确位置和方向的重要工具。夹

具的可靠性直接影响工件-夹具系统的稳定性。在复杂薄壁零件加工过程中产生的装夹应力容易导致让刀变形以及残余内应力,是造成加工误差主要因素。工件和夹具的相对刚度以及夹紧力对工件变形量直接影响接触区域及工件加工过程中的变形^[18]。

Ratchev等^[19]提出了一种工件-夹具系统动态行为的预测方法,能够有效预测工件-夹具接触力以及对夹持过程中的工件-夹具交互行为的影响。Asante^[20]在假设工件和定位器/夹紧元件夹具之间的接触界面遵循线性弹性定律的前提下,认为弹性变形是作用在接触界面上的所有力在法向和切向方向上影响的线性总和。Tan等^[21]把夹具及工件均看作弹性体,考虑工件与夹具间的接触刚度及摩擦,建立了工件-夹具系统刚度模型,预测了加工过程中工件-定位元件间的法向接触力及加工过程中工件变形。Wan等^[22]针对框类薄壁板零件铣削加工过程,提出一种夹具布局对加工过程动态响应影响的评估方法。将工件-夹具系统等效为具有中间线和点支撑的多跨距薄板。通过拉格朗日方法构建工件-夹具系统的动力学方程。Zeng等^[23]针对柔性部件加工过程振动问题,构建了刀具-工件-夹具系统模型,进行了夹具布局优化设计。试验证明其能够有效抑制振动和预测振动位移响应。针对现有的点接触模型已经不能精确描述夹具-复杂曲面工件系统的动力学行为,Wang等^[24]提出了一种基于有限元的夹具和涡轮叶片的动力学建模方法,对加工过程中的弹性变形与工件位移误差进行预测。较少文献考虑到夹具的阻尼特性及夹具布局对复杂薄壁弱刚性零件整体特性的影响。

(4) 工件-夹具系统动态响应与控制。

工件-夹具系统动态响应主要是变形与再生或自激振动对加工精度与表面质量的影响,主要通过夹具布局优化实现有效控制。Meshreki等^[25]针对航空航天薄壁框类结构零件铣削加工过程,基于功率谱方法构建了工件-夹具系统动力学模型,用于描述工件、夹具和切削力之间的交互作用及动态响应。并采用有限元方法进行预测和试验分析。Dong等^[26]采用虚拟弹簧-阻尼器模型对定位元件与工件接触模型进行描述,基于有限元法对由夹紧力引起的静态变形和切削力引起的动态变形进行分析和预测。Hurtado等^[27]基于刚体分析方法和接触力学原理,提出了零件公差要求驱动的夹具刚度优化模型,确定了夹具偏转对加工特征公差影响所需的最佳夹具刚度。Qin等^[28]提出了工件位置误差、工件弹性变形、基准误差与工件加工误差的定量方程。通过求解工件-夹具系统的总补充能量最小化的非线性整数规划问题获得工件弹性变形。Rai等^[29]在考虑装夹、铣削顺序、刀具路径和切削参数的作用下,利用有限元与切削力及切削温度数学建模相结合的方法来模拟复杂框体结构件在铣削过程中的偏移和弹塑性变形、切削应力和瞬时切削温度。上述研究存在的共同点是夹具系统属于被动模式,不具备智能感知及自适应响应机制,无法实现时变效应下的夹具系统的智能调控。

工件-夹具接触刚度模型

装夹应力是影响工件变形的重要因素之一,尤其对弱刚度工件,夹紧力引起的工件变形是产生加工误差的重要组成部分。进行装夹变形预测与控制首先要建立工件-夹具的接触刚度模型。

工件-夹具系统接触模型中按照工件及夹具材料的性质可分为刚体-刚体接触模型、刚体-弹性体

接触模型及弹性体-弹性体接触模型。Tao等^[30]把夹具看作刚体、工件看作弹性体,考虑了工件与夹具间的摩擦,建立了工件-夹具系统刚度模型,预测了加工过程中工件-夹具间的法向接触力及工件变形,但没有考虑夹具元件与工件间的接触刚度。Lee等^[31]把夹具看作刚体、工件看作弹性体,同时考虑了夹具元件与工件间的接触刚度及摩擦,建立了工件-夹具系统刚度模型,预测了加工过程中工件变形。

目前,建立的工件-夹具系统刚度模型大多为静态模型。把加工过程中的切削力离散到每个载荷步,并对加工过程中工件变形进行预测及对装夹方案进行优化。有少部分学者建立了动态装夹模型,分析了工件加工过程中的动态装夹稳定性^[32]、工件-夹具系统的动态接触特性^[33],确定了工件动态装夹稳定情况下的最小夹紧力^[34]。

综上所述,大部分的研究将工件-夹具系统视作静态环境进行约束的添加。同时,许多模型中还忽略了摩擦力的约束,并且所有的接触刚度模型对于接触面都是进行过近似处理的,这使接触刚度模型的构建本身就会造成误差。

薄壁工件装夹约束优化

目前,夹具布局优化是为了使得夹具的变形或振动变小,对定位布局进行合理优化的过程,主要分为两类,基于减振要求的主要是需要确保布局规划能约束工件的自由度并保证其稳定性;而基于最小变形的定位布局侧重于确保在定位完善的情况下,优化定位点的位置使得整体塑性变形下降^[35]。

(1)基于动力学模型的夹具布局优化。在加工中首先需要确定合理的定位方案,Wang等^[36]构建了针对接触表面几何特性的定位件-工件确定性定位全接触运动学模型。

针对力封闭与形封闭的约束,Xiong等^[37-40]利用非线性规划,以接触变形最小为目标,对定位布局进行寻优。由于工件与定位件有较大相对运动,Carlson^[41]认为线性逼近接触模型于此类情况不能有效获取工件的位移,因此改用二阶泰勒展开获取其定位误差。在无摩擦点接触的假设下,Marin等^[42]基于力旋量矩阵满秩,建立了“3-2-1”定位法则的确定性模型,给出了定位矩阵满秩的充分必要条件,在此基础上利用组合优化获取定位销布局。Armillotta等^[43]采用位置矩阵的奇异值分解表示螺旋坐标系中的定位约束,通过判断位置矩阵行列式的秩是否等于位置矩阵的奇异值的数量来判断工件位置的正确性。Zheng等^[44]基于形闭合和力闭合建立了夹具数学模型,同时开发了能够精确选定夹具定位点的算法。Wan等^[45]将位移函数转换为能量函数并通过微分最小化总能量特征,建立了一种基于频率灵敏度的新型非线性规划问题,通过优化夹具布局,最大限度地提高工件-夹具系统的基本固有频率。

(2)基于有限元分析的夹具布局优化。Kashyap等^[46]利用有限元方法,针对工件的变形抑制,优化定位布局使得工件变形最小。Siebenaler等^[47]引入摩擦系数对工件-夹具系统数学模型进行优化,通过有限元分析对夹具变形进行预测。董辉跃等^[48]在考虑装夹位置与载荷施加顺序的情况下,利用FEM方法计算了不同布局、不同约束下的工件变形。张发平等^[49]使用FEM方法分析工件的静态受力情况,并在其中引入赫兹接触力学,从而构建出一套完整的计算工件-夹具系统刚度的新方法,进而较为准确地预测加工误差。王运巧等^[50]针对弧形件的装夹特征,利用有限元方法优化布局,使得加工过程中弹性变形最小。

(3)基于智能算法的夹具布局

优化。Krishnakumar 等^[51-52]提出了一种基于遗传算法(GA)的夹具布局优化技术,从而最大限度地减小加工表面在整个刀具轨迹上由于夹紧和加工力引起的变形,以实现夹具的夹紧力与布局同步优化,最终生成较好的布局方案。陈蔚芳等^[53]建立了夹具布局和变夹紧力分层优化模型,以工件加工变形最小化和变形最均匀化为目标函数,在结合摩擦力、切削力、夹紧力等因素的情况下,利用有限元得到工件的形变量,并使用遗传算法求解所构建分层优化模型,获得布局与夹紧力大小。周孝伦等^[54]使用遗传算法与软件开发手段,将装夹布局与夹紧力大小相结合进行了同步优化。Hamedi^[55]将遗传算法、神经网络和有限元方法相结合对夹具布局进行优化设计。Prabhakaran 等^[56]以尺寸误差和形状误差最小为目标,采用有限元法对工件变形进行建模,分别采用遗传算法(GA)和蚁群算法(ACA)对夹具布局进行优化,同时在同一工件几何形状上定义了3个不同数目的节点系统,以保证GA和ACA性能的一致性,同时分别对这3个节点系统求最优解,即整个布局中可能的最小值。Pelinescu 等^[57]采用层次分析法对多准则优化夹具布局设计进行了研究,提出了一种有效的交换算法,并将其应用于不同的实际情况,为夹具布局设计提供了合适的策略。Wan 等^[58]从最小化姿态误差入手,通过定位矩阵的奇异值分解求解出6个自由度的误差放大因子,将最大误差放大系数、相对误差放大系数、误差椭球体积和位置稳定性作为目标函数,通过非支配排序遗传算法获得了最小姿态误差下的夹具定位最佳布局。

综上所述,对于薄壁件装夹约束的研究,主要是引入了有限元方法与智能算法,并逐步从静态建模转为动力学建模,充分发挥了近代计算机技

术与机器智能的潜力,也为自适应夹具的设计奠定了相关理论基础。

夹紧力及夹紧顺序优化

在加工过程中,工件应该在夹具中受到定位元件、夹紧元件和支撑元件的约束。夹紧力必须足够大以约束工件不产生偏离。通常,选择夹具元件的位置和确定夹紧力很大程度上依赖于设计者的经验。对于给定的工件,不能保证所得到的解是最优的或接近最优的。因此,夹紧布局的优化成为夹具设计的重要影响因素。合理选择夹紧点的位置以及夹紧力的取值,使夹紧和切削力引起的工件变形最小化和均匀化。主要分为基于接触力模型、智能算法和基于图论的优化。

(1) 基于交互作用的夹紧力优化。

Deng 等^[59]研究了满足动态装夹稳定性的最小夹紧力确定方法,建立的动态装夹模型考虑工件材料去除及动态切削力的影响,但忽略了切削热对工件变形的影响。Qin 等^[60-61]基于摩擦力与接触力的相关性,建立了夹紧力及夹紧顺序的分析模型及优化方法,提出了基于最小总余能原理的接触力求解技术,并利用有限元法实现了接触力与接触变形计算。此方法在定位元件布局给定的情况下,通过优化多重装夹的夹紧力顺序控制装夹变形,取得了较好的效果。

Li 等^[62]提出了面向加工过程的大接触区域问题的模型,该模型能够预测由夹紧力和切削力造成的工件变形,并使用最小余能定理对该模型进行求解。Raghu 等^[63]分析造成薄壁框类零件装夹误差的因素,对工件定位的夹紧力和装夹顺序进行了建模,并对模型进行了仿真和试验计算。Mahmud 等^[64]针对航空仪表盘的切削装夹过程,考虑仪表板和夹紧元件之间的摩擦力,同时考虑切

削力、切削深度和切削角度等对夹紧力的影响,建立了最小化夹紧力的计算模型。Kurnadi 等^[65]针对圆环的切削加工过程,建立了3爪夹持条件下计算最小夹持力的数学模型。Estrems 等^[66-67]针对在3爪对称夹持下的薄壁圆筒型铝环切削过程,通过扭矩扳手施加切削扭矩,进而估计所需夹持力的大小,然后利用卡氏定理(Castigliano's Theorem)建立了计算圆环总体夹持变形的估计模型,并通过试验验证了模型的准确性。

(2) 基于有限元及智能算法的优化。

Selvakumar 等^[68]针对矩形框工件的装夹切削过程,采用有限元方法计算工件在不同装夹定位中的最大形变量,将求解的装夹变形结果和装夹布局作为人工神经网络(ANN)模型的训练样本进行训练,求解了使工件夹持变形最小的最优夹持位置。Kaya^[69]在不考虑摩擦的条件下,以最小化装夹变形为目标,利用有限元法和遗传算法对工件在固定夹紧力作用下定位元件和夹持元件的位置进行了优化。Padmanaban 等^[70]采用有限元方法计算工件变形,然后分别利用遗传算法和蚁群算法对工件在动态夹紧条件下的最小变形进行了优化。郑联语等^[71]采用基于神经网络的决策机制,利用一种新的数值表示方法来表示工件定位特征信息与设置规划之间的符号关系,从而确定工件定位基准。

(3) 基于图论的夹紧规划方法。

很多研究者采用基于图论的方法来进行夹紧规划的研究。Cai 等^[72]找到了一种将加工特征的刀具接近方向作为特征分类依据进行更深层次分析的自适应方法。马丽梅等^[73]通过对加工特征进行拓展,从而构造出了基于富集加工特征的可拓基元模型,并完成了基于XML的描述方法,最终完成了包含启发式算法与拓展混合图论的夹紧布局优化算法。

Zhang 等^[74]借助无向图反应工件的关系,利用合适的元启发式算法计算对应加工特征定位布局,并结合其分布方式选取定位基准。Yao 等^[75]根据工艺参数和加工特征参数,提出了一种基于图形的夹具规划算法,该算法能够在多个工件条件下设计夹具布局和优化工艺,实现夹具的快速规划。

综上所述,目前针对夹紧力和夹紧顺序的优化问题,综合考虑了工件与夹具的交互作用,主要使用了有限元、智能算法与图论的手段进行研究,可以预见机器智能在夹紧力夹紧顺序优化中的应用将不断深化。

自适应主动夹持系统及应用

随着传感技术、信号识别以及智能材料的发展,主动自重构智能夹具系统已经成为目前国外学者的研究热点^[76]。Papastathis 等^[77]提出了表征动态移动负载下主动夹具元件和薄壁工件间的动态响应的模型。江浩^[78]通过研究切削参数与振动之间的关系,建立了侧铣加工表面形成模型,设计了一种用于减振的两自由度主动式工件装夹平台。Parus 等^[79]针对在柔性工件铣削过程中再生颤振抑制问题提出主动控制系统,并在系统中引入阻尼以抑制铣削加工振动。Papastathis 等^[80]提出了一种用于自动装配和拆卸航空发动机部件的夹具系统。该系统通过多个夹紧位置和夹紧力的精确控制,从而实现夹紧元件的自动重新配置。Deiab 等^[81]提出了一种工件-柔性夹具系统模型,应用增强弹簧元件和改进库仑摩擦定律描述工件-夹具接触行为。同时该模型还集成了刀具刀刃的几何形状和机床的模式特性。Bakker 等^[82]针对航空薄壁工件开发了主动夹具系统,利用高级有限元(FE)法对零件和自适应夹紧进行建模分析,在有限元模型的基础上为自适应夹紧建立了二阶模型。将支撑

件和夹具接触件等效为弹簧缓冲元件,引入压电制动器提供自适应夹紧所需力,最后通过比例积分(PI)控制器对多个夹紧元件进行动态补偿。

在自适应主动夹具系统构建方面,德国 Dortmund 大学已经构建了一套针对薄壁工件铣削过程的主动阻尼振动与识别装置^[83],如图3所示。西班牙 IK4-TEKNIKER 研究所^[84]已开发出一套针对低压涡轮机匣车削所用的动态夹持力的主动控制夹具原型系统,如图4所示。意大利 Firenze 大学^[85]针对一般铣削操作中的自适应振动和不稳定抑制,为了提高可实现的材料去除率,开发了一种自适应夹具原型系统,以检测和减轻一般的粗铣削操作中的颤振水平。德国 Magdeburg 大学针对大型细长薄壁航天零件加工过程中

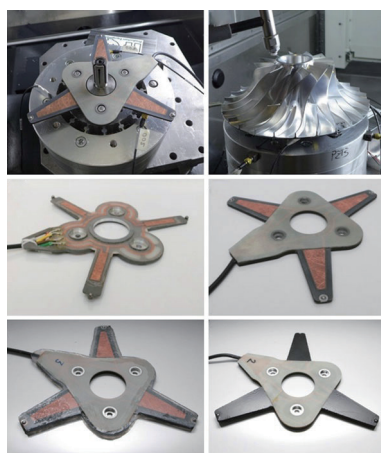


图3 集成到卡盘中的智能感知结构
Fig.3 Intelligent perception structure integrated into chuck



图4 低压涡轮机匣车削用主动控制夹具原型系统

Fig.4 Prototype of active fixture control system for low pressure turbine-shell turning

的工件变形检测与补偿问题,开发了一种智能夹具,它可以在顺序加工步骤中检测工件变形的趋势,并允许对夹紧条件进行主动调整,以补偿残余应力对零件最终形状的影响^[86]。西班牙 IK4-TEKNIKER 研究所^[87]针对飞机发动机涡轮部件加工,开发一种控制夹紧部件的智能夹具原型系统。捷克 Czech 科技大学开发了一套具有工件自适应功能和夹持预变形功能的夹具原型系统^[88]。西班牙 TECNALIA 研究院针对风力发电叶片中的大型零件设计了一套拥有高精度定位的主动夹具系统,使用立式铣床的行星架定位为叶片加工过程提供更高的精度^[89]。

Li 等^[90]以动态特征概念为基础,建立了一套完整的动态加工条件融合信息模型,为优化高精复杂零件加工过程控制的集成、监控和在线检测操作提供了基础,并以此开发了一个基于开放平台的原型架构。同时,针对大型航空薄壁件,开发出了一种加工过程中自动响应工件变形的柔性夹具^[91],可对工件的变形进行在线监测,并及时调整工件位置和方向,以确保在低应力下能按照设计中所需相关参数进行后续加工。

综上所述,主动自适应夹具大部分停留在理论研究或者原型系统开发阶段,距离实用还有较大距离,形成这种状况的重要原因有很多,主要是因为对于夹具的闭环控制理论、

加工过程动力学模型构建、材料去除模型、切削加工机理等多个领域中的部分方向研究不足。

自适应夹具的控制策略

在自适应夹具设计过程中,一个不可或缺的环节就是对其闭环控制策略的设计,这也是实现自适应夹具随加工工况演化改变装夹策略的实现环节。

Mannan 等^[92]提出了自适应夹紧元件的级联位置/力控制算法。该算法需要使用力传感器和位置传感器作为其信号反馈源。该控制算法所形成的控制回路主要是通过两个方式实现:PID(比例积分导数)控制器和简单的比例控制器。而整个控制回路中需要调节的变量是其自适应夹紧元件所施加的夹紧力。

Nee 等^[93]采用了与 Mannan 等稍有不同的控制手段,把 Mannan 等构建的力反馈回路中的比例控制器替代为一种通用的简化版最小方差自校正控制器。Du 等^[94]结合了两种不同的控制策略来调节 3 指智能夹具原型机的定位方式和施力方案。其中定位方式采用直接位置反馈进行控制,其控制回路的反馈源是安装在直流电机轴上的光学编码器;而夹紧力的施力大小则采用直接力反馈进行控制,其反馈源为安装在夹紧件上的应变计。整个夹具控制过程使用数字控制器进行调整。

Bakker 等^[95-98]测试了不同控制策略对工件-夹具系统的影响。具体来说,他们详细分析了各种控制策略中的力反馈和位置反馈,其目的是研究所测试的控制策略中哪一种反馈能使工件-夹具系统对外部载荷做出反应以达到工件位移最小化。研究过程中使用到了直接力反馈和直接位置反馈,而其最终结果表明位置反馈能有效抑制工件的位移。Papastathis 等^[80]通过试验测试了两种控制策略的效果,这两种控制策略

均使用在基于 PMAC 执行器的自适应装夹元件上。第一种控制策略是串联位置/力控制策略;第二种控制策略是直接力控制策略。试验结果表明,第二种控制策略对指令输入具有较快的响应速度,但这种方法存在较高的过度响应现象。Grochowski 等^[99]利用步进电机作为自适应夹具元件,构建了一种简易位置反馈回路结构来控制工件的位移,并利用 PID 调节器来控制工件-夹具系统的响应。

综上所述,大多数研究通过控制所施加的夹紧力或通过修正夹紧元件的尖端位置来减小工件在夹紧下的位移和变形,并且大多只是针对单个工件而不是针对装配体,且主要是在控制理论上进行探索,而相关实际应用见前一节。

结论

随着传感技术、智能材料及信息技术的发展,夹具将进一步融合到工件-机床-夹具工艺系统中,成为工艺系统智能化的重要组成部分。未来的发展将集中于智能定位、夹紧和支撑元件以及相应的实时闭环控制系统,从而真正实现复杂弱刚度工况条件下的整个工艺系统的动态感知,实时分析、自主决策、精准执行。

参考文献

[1] MERVYN F, KUMAR A S, NEE A Y C. An adaptive fixture design system for integrated product and process design[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Automation Science & Engineering. Edmonton, Alberta, Canada, 2005.

[2] BUDAK E. Mechanics and dynamics of milling thin walled structure[D]. Vancouver: The University of British Columbia, 1994.

[3] SEGUY S, DESSEIN G, ARAUD L. Surface roughness variation of thin wall milling, related to model interactions[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(3/4): 261-274.

[4] 万敏, 张卫红, 谭刚. 薄壁零件周铣过程中材料去除效应的快速仿真[J]. 航空学报, 2007, 28(5): 1247-1251.

WAN Min, ZHANG Weihong, TAN Gang. Efficient simulation model of material removal in peripheral milling of thin-walled workpiece[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(5): 1247-1251.

[5] MESHREKI M, ATTIA H, KOVECSES J. Development of a new model for the varying dynamics of flexible pocket-structures during machining[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2011, 133(4): 041002.

[6] 孙珊珊. 刚度时变系统非线性动力学研究及稳定性预测[D]. 济南: 山东大学, 2009.

SUN Shanshan. Nonlinear dynamics study and stability forecast of the time varying stiffness system[D]. Jinan: Shandong University, 2009.

[7] 张小明. 五轴数控铣削加工几何-动力学建模与工艺参数优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.

ZHANG Xiaoming. Geometry-dynamics modeling in five axis numerical control milling and cutting parameters optimization[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.

[8] ALTINTAS Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibration, and CNC design[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

[9] INSPIERGER T, MANN B P, STÉPÁN G, et al. Stability of up-milling and down-milling, part I: Alternative analytical methods[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(1): 25-34.

[10] LIU Y L, ZHANG D H, WU B H, et al. An efficient full-discretization method for prediction of milling stability[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 63: 44-48.

[11] SCHMITZ T L, MANN B P. Closed-form solutions for surface location error in milling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(12/13): 1369-1377.

[12] INSPIERGER T, GRADIESK J, KALVERAM M, et al. Machine tool

- chatter and surface location error in milling process[J]. Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128(4): 913-920.
- [13] 汤爱君. 薄壁件高速铣削三维稳定性及加工变形研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- TANG Aijun. Three-dimensional stability and deformation of thin-walled part in high speed end milling[D]. Jinan: Shandong University, 2009.
- [14] LUO M, ZHANG D H, WU B H, et al. Material removal process optimization for milling flexible workpiece considering machining stability[J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineers Manufacture, 2011, 225(8): 1263-1272.
- [15] BUDAK E. An analytical design method for milling cutters with nonconstant pitch to increase stability, part I: Theory[J]. Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2003, 125(1): 29-34.
- [16] NAMAZI M, ALTINTAS Y, ABE T, et al. Modeling and identification of tool holder-spindle interface dynamics[J]. International of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(9): 1333-1341.
- [17] 刘立佳. 变刚度-约束阻尼减振镗杆设计及特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- LIU Lijia. Design and characteristics research on damping boring bar with variable stiffness and constrained damping[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016.
- [18] WANG H, RONG Y M, LI H, et al. Computer aided fixture design: recent research and trends[J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(12): 1085-1094.
- [19] RATCHEV S, PHUAH K, LIU S. FEA-based methodology for the prediction of part-fixture behaviour and its applications[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191(1-3): 260-264.
- [20] ASANTE J N. A combined contact elasticity and finite element-based model for contact load and pressure distribution calculation in a frictional workpiece fixture system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39: 578.
- [21] TAN E Y T, KUMAR A S, FUH J Y H, et al. Modeling analysis and verification of optimal fixturing design[J]. IEEE Transaction Automation Science and Engineering, 2004, 1(2): 121-132.
- [22] WAN X J, ZHANG Y, HUANG X D. Investigation of influence of fixture layout on dynamic response of thin-wall multi-framed work-piece in machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2013, 75: 87-99.
- [23] ZENG S S, WAN X J, LI W L, et al. A novel approach to fixture design on suppressing machining vibration of flexible workpiece[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 58: 29-43.
- [24] WANG Y, CHEN X, GINDY N, et al. Elastic deformation of a fixture and turbine blades system based on finite element analysis[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 36(3/4): 296-304.
- [25] MESHREKI M, KÖVECSÉS J, ATTIA H, et al. Dynamics modeling and analysis of thin-walled aerospace structures for fixture design in multiaxis milling[J]. Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2008, 130(3): 1011-1022.
- [26] DONG Z H, JIAO L, WANG X B, et al. FEA-based prediction of machined surface errors for dynamic fixture-workpiece system during milling process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(1-4): 299-315.
- [27] HURTADO J F, MELKOTE S N. Improved algorithm for tolerance-based stiffness optimization of machining fixtures[J]. Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123(4): 720-730.
- [28] QIN G H, ZHANG W H, WU Z X, et al. Systematic modeling of workpiece-fixture geometric default and compliance for the prediction of workpiece machining error[J]. Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129(4): 789-801.
- [29] 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 and Manufacture, 2008, 48(6): 629-643.
- [30] TAO Z J, SENTHIL K A, NEE A Y C. Automatic generation of dynamic clamping force for machining fixtures[J]. International Journal of Production Research, 1999, 37: 2755-2776.
- [31] LEE J D, HAYNES L S. Finite element analysis of fixible manufacturing system[J]. Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry, 1987, 109: 134-139.
- [32] DENG H Y, MELKOTE S N. Analysis of fixturing dynamic stability in machining[C]//Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Monterey, 2005: 869-874.
- [33] RATCHEV S, PHUAH K, LAMMEL G, et al. An experimental investigation of fixture-workpiece contact behavior for the dynamic simulation of complex fixture-workpiece systems[J]. Journal of Material Processing Technology, 2005, 164-165: 1597-1607.
- [34] DENG H Y, MELKOTE S N. Modeling of fixturing dynamic stability accounting for material removal effect[C]//Proceedings of 2005-2006 PMRC Industrial Advisory Board Meeting. Georgia, 2006.
- [35] 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.
- [36] WANG M, LIU T, PELINESCU D M. Fixture kinematic analysis based on the full contact model of rigid bodies[J]. Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2003, 125(2): 316-324.
- [37] XIONG C H, LI Y F, RONG Y K, et al. Qualitative analysis and quantitative evaluation of fixturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2002, 18(5-6): 335-342.

- [38] XIONG C H, WANG M Y, XIONG Y L. On clamping planning in workpiece–fixture systems[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2008, 5(3): 407–419.
- [39] WAN X J, XIONG C H, WANG X F, et al. A machining–feature–driven approach to locating scheme in multi–axis milling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(1): 42–50.
- [40] XIONG C H, WANG M Y, TANG Y, et al. On the prediction of passive contact forces of workpiece fixture systems[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2003, 219(3): 309–324.
- [41] CARLSON J S. Quadratic sensitivity analysis of fixtures and locating schemes for rigid parts[J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2000, 123(3): 462–472.
- [42] MARIN R A, FERREIRA P M. Kinematic analysis and synthesis of deterministic 3–2–1 locator schemes for machining fixtures[J]. Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2000, 123(4): 708–719.
- [43] ARMILLOTTA A, MORONI G, POLINI W, et al. A unified approach to kinematic and tolerance analysis of locating fixture[J]. Transactions of the ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2010, 10(2): 21–30.
- [44] ZHENG Y, QIAN W H. A 3–D modular fixture with enhanced localization accuracy and immobilization capability[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(6): 677–687.
- [45] WAN X J, ZHANG Y. A novel approach to fixture layout optimization on maximizing dynamic machinability[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 70: 32–44.
- [46] KASHYAP S, DEVRIES W R. Finite element analysis and optimization in fixture design[J]. Structural Optimization, 1999, 18(2/3): 193–201.
- [47] SIEBENALER S P, MELKOTE S N. Prediction of workpiece deformation in a fixture system using the finite element method[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(1): 51–58.
- [48] 董辉跃, 柯映林. 铣削加工中薄壁件装夹方案优选的有限元模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(1): 17–21.
- DONG Huiyue, KE Yinglin. Finite element simulation for optimal clamping scheme of thin-walled workpiece in milling process[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, 38(1): 17–21.
- [49] 张发平, 孙厚芳, 袁光明, 等. 工–夹系统刚度计算及变形加工误差模型[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(12): 1041–1044.
- ZHANG Faping, SUN Houfang, YUAN Guangming, et al. Machining error analysis based on the stiffness of workpiece–fixture system[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(12): 1041–1044.
- [50] 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, 41(6): 214–217.
- WANG Yunqiao, MEI Zhongyi, FAN Yuqing. Finite element optimization for the clamping layout of thin-walled arc parts[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(6): 214–217.
- [51] KRISHNAKUMAR K, MELKOTE S N. Machining fixture layout optimization using the genetic algorithm[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(4): 579–598.
- [52] KRISHNAKUMAR K, SATYANARAYANA S, MELKOTE S N. Iterative fixture layout and clamping force optimization using the genetic algorithm[J]. Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2002, 124(1): 119–125.
- [53] 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, 18(12): 1413–1417.
- CHEN Weifang, NI Lijun, WANG Ningsheng. Machining error analysis based on the stiffness of workpiece–fixture system[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(12): 1413–1417.
- [54] 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, 24(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 for Aerospace Engineering, 2005, 24(3): 339–342.
- [55] HAMED M. Intelligent fixture design through a hybrid system of artificial neural network and genetic algorithm[J]. Artificial Intelligence Review, 2005, 23(3): 295–311.
- [56] PRABHAKARAN G, PADMANABAN K P, KRISHNAKUMAR R. Machining fixture layout optimization using FEM and evolutionary techniques[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(11/12): 1090–1103.
- [57] PELINESCU D M, WANG M Y. Multi-objective optimal fixture layout design[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2002, 18(5/6): 365–372.
- [58] WAN X J, YANG J Q, ZHANG H J, et al. Optimization of fixture layout based on error amplification factors[J]. Transactions of the ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2018, 18(4): 041007–12.
- [59] DENG H Y, MELKOTE S N. Determination of minimum clamping forces for dynamically stable fixturing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(7/8): 847–857.
- [60] QIN G H, ZHANG W H, WAN M. Analysis and optimal design of fixture clamping sequence[J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128(2): 482–493.
- [61] 秦国华, 吴竹溪, 张卫红. 薄壁件的装夹变形机理分析与控制技术[J]. 机械工程学报, 2007, 43(4): 211–216.
- QIN Guohua, WU Zhuxi, ZHANG Weihong. Analysis and control technology for the mechanism of thin-walled parts clamping deformation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(4): 211–216.
- [62] LI B, MELKOTE S N, LIANG S Y. Analysis of reactions and minimum clamping force for machining fixtures with large contact areas[J]. The International Journal of Advanced

- Manufacturing Technology, 2000, 16(2): 79–84.
- [63] RAGHU A, MELKOTE S N. Analysis of the effects of fixture clamping sequence on part location errors[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(4): 373–382.
- [64] MAHMUD A, MAYER J R R, BARON L. Determining the minimum clamping force by cutting force simulation in aerospace fuselage pocket machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(9–12): 1751–1758.
- [65] KURNADI M S, MOREHOUSE J, MELKOTE S N. A work holding optimization model for turning of ring-shaped parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(7–8): 656–665.
- [66] ESTREMS M, ARIZMENDI M, CUMBICUS W E, et al. Measurement of clamping forces in a 3 jaw chuck through an instrumented aluminium ring[J]. Procedia Engineering, 2015, 132: 456–463.
- [67] ESTREMS M, ARIZMENDI M, ZABALETA A J, et al. Numerical method to calculate the deformation of thin rings during turning operation and its influence on the roundness tolerance[J]. Procedia Engineering, 2015, 132: 872–879.
- [68] 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.
- [69] KAYA N. Machining fixture locating and clamping position optimization using genetic algorithms[J]. Computers in Industry, 2006, 57(2): 112–120.
- [70] PADMANABAN K P, PRABHAHARAN G. Dynamic analysis on optimal placement of fixturing elements using evolutionary techniques[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(15): 4177–4214.
- [71] 郑联语, 谷强, 汪叔淳. 装夹规划中确定工件定位基准的神经网络决策机制[J]. 航空学报, 2001, 22(2): 130–134.
- ZHENG Lianyu, GU Qiang, WANG Shuchun. Decision mechanism for workpiece locating datum based on neural network in setup planning[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(2): 130–134.
- [72] CAI N, WANG L, FENG H Y. Adaptive setup planning of prismatic parts for machine tools with varying configurations[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(3): 571–594.
- [73] 马丽梅, 李建勇, 徐文胜. 面向可重构机床配置合成的装夹规划方法[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(4): 153–158.
- MA Limei, LI Jianyong, XU Wensheng. Setup planning method for configuration synthesis of reconfigurable machine tools[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(4): 153–158.
- [74] ZHANG Y, HU W, RONG Y, et al. Graph-based set-up planning and tolerance decomposition for computer-aided fixture design[J]. International Journal of Production Research, 2001, 39(14): 3109–3126.
- [75] YAO S, HAN X, YANG Y, et al. Computer aided manufacturing planning for mass customization: Part 2, automated setup planning[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(1/2): 205–217.
- [76] BAKKER O J, PASTATHIS T N, POPOV A A, et al. Active fixturing: literature review and future research directions[J]. International Journal of Production Research, 2013, 51(11): 3171–3190.
- [77] PASTATHIS T N, RATCHEV S M, POPOV A A. Dynamics model of active fixturing systems for thin-walled parts under moving loads[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(9–12): 1233–1247.
- [78] 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 Jiao Tong University, 2009.
- [79] PARUS A, POWAŁKA B, MARCHELEK K, et al. Active vibration control in milling flexible workpieces[J]. Journal of Vibration and Control, 2012, 19(7): 1103–1120.
- [80] PASTATHIS T, RYLL M, BONE S, et al. Development of a reconfigurable fixture for the automated assembly and disassembly of high pressure rotors for Rolls-Royce aeroengines[J]. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2010, 315: 283–289.
- [81] DEIAB I M, ELBESTAWI M A. Effect of workpiece/fixture dynamics on the machining process output[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2004, 218: 1541–1553.
- [82] BAKKER O J, POPOV A A, SALVI E. Model-based control of an active fixture for advanced aerospace components[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225: 35–51.
- [83] MÖHRING H C, WIEDERKEHR P, LEREZ C, et al. Case study 1.1: Identification and active damping of critical workpiece vibrations in milling of thin walled workpieces[M]//Intelligent Fixtures for the Manufacturing of Low Rigidity Components. Lecture Notes in Production Engineering. Berne: Springer International Publishing, 2018.
- [84] GONZALO O, SEARA J M, OLABARRIETA E, et al. Case study 1.2: Turning of low pressure turbine casing[M]//Intelligent Fixtures for the Manufacturing of Low Rigidity Components. Lecture Notes in Production Engineering. Berne: Springer International Publishing, 2018.
- [85] SALLESE L, TSAHALIS J, GROSSI N, et al. Case study 1.3: Auto-adaptive vibrations and instabilities suppression in general milling operations[M]//Intelligent Fixtures for the Manufacturing of Low Rigidity Components. Lecture Notes in Production Engineering. Berne: Springer International Publishing, 2018.
- [86] MÖHRING H C, WIEDERKEHR P, LEOPOLD M, et al. Case study 2.1: Detection and compensation of workpiece distortions during machining of slender and thin-walled aerospace parts[M]//Intelligent Fixtures for the Manufacturing of Low Rigidity Components. Lecture Notes in Production Engineering. Berne: Springer International Publishing, 2018.

- [87] GONZALO O, SEARA J M, GURUCETA E, et al. Case study 2.4: machining of aircraft turbine support structures[M]// Intelligent Fixtures for the Manufacturing of Low Rigidity Components. Lecture Notes in Production Engineering. Berne: Springer International Publishing, 2018.
- [88] SVEDA J, KOLAR P, KOUBEK J, et al. Case study 3.1: Fixture system for workpiece adjustment and clamping with/without its pre-deformation[M]// Intelligent Fixtures for the Manufacturing of Low Rigidity Components. Lecture Notes in Production Engineering. Berne: Springer International Publishing, 2018.
- [89] ESTÉVEZ A, RODRÍGUEZ G, AYESTA K. Case study 3.3: Active fixtures for high precision positioning of large parts for the windmill sector[M]// Intelligent Fixtures for the Manufacturing of Low Rigidity Components. Lecture Notes in Production Engineering. Berne: Springer International Publishing, 2018.
- [90] LI Y G, LIU C Q, GAO J X, et al. An integrated feature-based dynamic control system for on-line machining, inspection and monitoring[J]. Integrated Computer-Aided Engineering, 2015, 22(2): 187-200.
- [91] LI Y G, LIU C Q, HAO X Z, et al. Responsive fixture design using dynamic product inspection and monitoring technologies for the precision machining of large-scale aerospace parts[J]. CIRP Annals, 2015, 64(1): 173-176.
- [92] MANNAN M A, SOLLIE J P. A force-controlled clamping element for intelligent fixturing[J]. CIRP Annals, 1997, 46(1): 265-268.
- [93] NEE A Y C, KUMAR A S, TAO Z J. An advanced treatise on fixture design and planning[M]. New Jersey: World Scientific, 2004.
- [94] DU H, LIN G C I, ZHAO J, et al. An approach to enhancing the intelligence of a three-fingered automated flexible fixturing system by using adaptive control theory[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1999, 15(2): 101-110.
- [95] BAKKER O J, POPOV A, RATCHEV S. Control of a workpiece holder with piezo-electric-mechanical actuation[J]. Journal of Machine Engineering, 2008, 8(3): 17-28.
- [96] BAKKER O J, POPOV A A, RATCHEV S M. Investigation into feedback control of part-fixture systems undergoing dynamic machining forces[C]// Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2008). Katholieke Universiteit Leuven, Heverlee, 2008: 131-140.
- [97] BAKKER O J, POPOV A A, RATCHEV S M. Fixture control by hydraulic actuation using a reduced workpiece model[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(12): 1553-1566.
- [98] BAKKER O J, POPOV A A, RATCHEV S M. Model-based control of an advanced actuated part-fixture system[C]// Proceedings of ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference. West Lafayette, 2009: 381-393.
- [99] GROCHOWSKI M, BUKOWSKI A, JEDRZEJEWSKI J. Modelling of mechatronic workpiece-fixture system focusing on active compensation of displacements[C]// Proceedings of the 21st International Conference on Computer-Aided Production engineering (CAPE 2010). Edinburgh, Scotland, 2010.

通讯作者: 陈冰, E-mail: bingchen72@nwpu.edu.cn。

Adaptive Fixture Designing of Thin-Walled Aero-Engine Workpiece: A Survey of the State of Art

CHEN Bing, YANG Baotong, NIU Zhiyang, QI Junde

(Key Lab of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] Complex thin-walled workpiece is a kind of key parts in aero-engine. And how to restrain the deformation and vibration of machining process due to its characteristics of weak stiffness, difficult material processing and strong time-varying turns to be a bottleneck to be solved. The reasonable layout of fixture and the promotion of clamping stability can effectively suppress the machining vibration. At present, the intellectualization of fixture system has become the main bottleneck of the popularization of intelligent machining technology. The development of fixture design which can adapt to complex working conditions of thin-wall parts has become a popular research. In this paper, the dynamic modeling of fixture and work-piece, the optimization of fixture layout, the optimization of clamping force and the design of adaptive fixture at present are reviewed. It will be helpful to the design and engineering application of adaptive fixture in the future.

Keywords: Aero-engine; Complex thin-walled workpiece; Fixture layout optimization; Clamping force optimization; Adaptive fixture design

(责编 李丹)