

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.01.001

复杂曲面薄壁件铣削颤振稳定性研究综述^{*}

吴 雁,王开发,郑 刚,周 琼,张而耕
(上海应用技术大学 机械工程学院,上海 201418)

摘要:针对复杂曲面薄壁件铣削过程中出现的颤振问题,基于再生型颤振理论,对复杂曲面薄壁件铣削颤振产生的原因进行了分析,阐述了抑制颤振发生的相关工艺优化策略和颤振稳定性分析之间的联系;在此基础上,对现阶段复杂曲面铣削稳定性分析中的频域法、时域法、试验法,以及工艺优化方法研究现状进行了综述和归纳,对现阶段国内外复杂曲面薄壁件铣削颤振的抑制方法的优缺点和适用条件进行了评价,并提出了整体式叶轮五轴加工非均匀余量工艺优化策略;通过分析影响颤振稳定性的因素,提出了今后复杂曲面薄壁件颤振抑制的研究方向。研究表明:相对于普通铣削颤振,复杂曲面薄壁件颤振抑制更为复杂,建立三维工艺系统稳定性模型,并考虑工件模态参数的变化,可有效抑制颤振的发生。

关键词:复杂曲面;铣削颤振;稳定性分析;非均匀余量优化;综述

中图分类号:TH161

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)01-0001-07

Review of research on flutter stability in thin wall milling with complex curved surface

WU Yan, WANG Kai-fa, ZHENG Gang, ZHOU Qiong, ZHANG Er-geng
(School of Mechanical Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: Aiming at the problems of chatter in the milling process of thin-walled parts with complex curved surfaces, based on the regenerative chatter theory, the causes of chatter in the milling process of thin-walled parts with complex curved surfaces were analyzed. And the relationship between the optimization strategy of technology to suppress chatter and the analysis of chatter stability was expounded. On this basis, the current research status of frequency domain method, time domain method, experimental method and process optimization method in milling stability analysis of complex curved surface were summarized. The advantages, disadvantages and applicable conditions of chatter suppression methods for thin-walled parts with complex curved surface at home and abroad at this stage were evaluated, and the non-uniform residual process optimization strategy for five-axis machining of integral impeller was put forward. Finally, by analyzing the factors affecting flutter stability, the research direction of flutter suppression for thin-walled parts with complex curved surfaces in the future was pointed out. The results show that the flutter suppression of thin-walled parts with complex curved surfaces is more complex than that of conventional milling. The flutter suppression can be effectively suppressed by establishing a three-dimensional process system stability model and considering the change of workpiece modal parameters.

Key words: complex surface; milling flutter; stability analysis; non-uniform allowance process optimization; review

0 引 言

高速低刚度结构件广泛应用于航空工业,但是其

加工过程中,存在工作易变形、切削颤振等加工缺点。铣削作为一种多齿加工的连续切削过程,具有铣削力小、加工温度低、加工范围广等优点,因而广泛应用于多轴复杂曲面加工中。

收稿日期:2019-05-07

基金项目:上海市科委重点支撑计划资助项目(170905038000)

作者简介:吴雁(1970-),女,四川巴中人,副教授,主要从事多轴联动数控理论与复杂曲面加工技术方面的研究。E-mail:wuyan613613@126.com

由于工件的弱刚性,在加工过程中会出现切削颤振,会严重降低铣削质量和刀具寿命。在加工复杂曲面时,预测颤振的发生,避免颤振和通过选择合理的切削参数来实现无颤振切削,成为近年来诸多学者研究的焦点。目前,有关加工颤振抑制的研究方向大致可以分为理论和工艺优化两方面:

(1)理论研究机理。主要有 3 种,分别为:再生型颤振理论、振型耦合型理论、摩擦型颤振理论;

(2)工艺优化。即通过改变传统的加工工艺进而改变整个工艺系统的动态特性。

目前,对于复杂曲面薄壁件颤振抑制问题的解决方法,大多是通过颤振抑制理论构造颤振稳定域,在稳定域中选择合适的切削参数。但是,构建精确的三维颤振稳定域模型,进而来指导实际加工,仍存在很大困难。

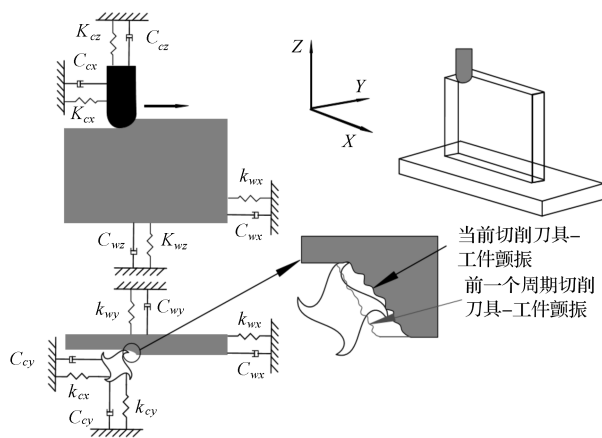
本文将从复杂曲面薄壁件铣削加工颤振产生的机理、抑制方法、控制难点、适用场合、实际应用情况,和目前众多控制颤振方法的优、缺点几方面,来对此进行综述和分析。

1 再生型颤振理论简介

在再生型颤振理论中,去掉刚性刀具的假设,切削时切削力会引起刀具的挠度改变,由于铣刀具有刚度和质量,进而会发生振动。如果刀具在去除材料时产生振动,这些振动就会以波形的形式印在工件表面。初始铣刀与工件表面的碰撞,使刀具开始振动,沿刀具移动方向的振动特性被复制到工件表面上。当工件开始第二次旋转时,振动刀具遇到第一次旋转时产生的波浪面,此时的刀具发生振动的相位与工件表面波浪的相位进行叠加,发生第二次振动。因此,任何时刻的切屑厚度既取决于当时的刀具挠度,也取决于前一次旋转后的工件表面。

对于复杂曲面薄壁件铣削加工,再生型颤振更为难以控制。由于工件系统刚性与刀具系统刚性处在同一数量级,在构建复杂曲面薄壁件加工颤振稳定域时,机床-工件的模态参数也必须考虑在内。同时,随着工件上的材料被去除,弱刚性工件系统的动态特性(工件质量、模态参数、工件振型)在铣削过程中不断变化。薄壁件在铣削时刀具位置反复变化,刀具位置和走刀次数也对加工系统的动态特性有较大影响。对于薄壁铣削而言,绘制传统的稳定性叶瓣图,已经不能精确地预测铣削过程的稳定性。

再生型颤振简化模型如图 1 所示。



2 稳定性分析与工艺优化的关系

颤振稳定性分析研究内容主要为构造颤振铣削模型和稳定性叶瓣图,预测铣削过程稳定性边界,划分出稳定铣削区域和颤振铣削区,进而供加工人员选择合适的铣削参数,通过降低颤振,以提高工件的表面精度。

复杂曲面薄壁件工艺优化主要为优化薄壁件的加工余量,以增加零件-机床的模态参数,进而提高整个系统的整体刚度,实现对颤振的抑制。颤振抑制理论是从理论分析上研究颤振,通过得到极限切深,来指导实际加工,主要参数为主轴转速、切深。而工艺优化大多是从提高系统的刚度出发,提高切削系统的极限切深,使得传统的切深落在稳定域内,从而达到无颤振切削的目的。

3 颤振稳定性分析

3.1 时域法

时域法是指在时间范围内对铣削稳定性进行分析的方法,通过对原始时滞微分方程进行近似,构造有限维单值算子,借助极限逼近无限维单值算子,以此来提高计算速度。

针对复杂曲面薄壁件颤振的抑制,广大学者在时域内开展了许多研究。

WU S^[1]采用实验方法研究了两端固定薄壁件的非线性铣削颤振稳定性判据,以薄壁零件的振动信号为研究对象,对不同加工参数的振动信号进行了分析,并讨论了最大李雅普诺夫指数与主轴转速、铣削深度变化的关系,最后以最大李雅普诺夫指数为判据,利用轮廓法和全离散法确定了铣削颤振稳定域;但是文中将薄壁件两端固定,机床-工件的刚度已经发生改变,

无法代表铣削薄壁件时的工况。

LIU W W^[2]通过建立薄壁铣削过程动力学的单自由度动力学模型,采用离散化方法对该模型的稳定性进行了分析,在此基础上得到了不同铣削阶段的模态参数,并提出了主轴转速的共振区,利用颤振稳定域对不同铣削阶段的铣削参数进行了优化,得到了不同铣削阶段的稳定域叠加区;但是其建立薄壁件的单自由度系统并不是三维甚至多维度铣削工艺系统,因此,建立的稳定域也无法精确反应工件的颤振稳定性极限。

ZHANG X^[3]建立了铣削过程薄壁零件三维动力学模型,采用全离散解析法验证了铣削加工过程主轴转速与颤振临界轴向切深之间存在非线性关系,主轴转速对颤振稳定性影响较明显,当系统模态质量、阻尼比及固有频率增大时,颤振稳定域相应变大,同时,叶瓣图形状分布随之改变;构建了薄壁件铣削加工时的三维工艺系统,考虑工件-刀轴方向的振动,并将刀具子系统和工件子系统均考虑其中,预测效果较好。

WANG T Y^[4]基于机床-工件系统两个垂直方向的角度,分析了薄壁工件的动态铣削模型,在2A12铝合金高速铣削过程中,提出了基于惯性效应修正的补偿方法,得到了精确的切削力系数,并将加工系统分为“主轴-刀具”和“工件-夹具”两个子系统,通过模态分析实验,得到了两个子系统的模态参数,得到了2A12薄壁工件高速铣削时的稳定域;该研究虽然通过惯性效应修正的补偿方法,精确预测了切削力系数,但在构造工艺系统时,未能考虑工件-刀轴方向的振动。

ZHANG Zhan^[5]提出了一种将铣削系统浸入粘性流体中,以减小薄壁工件颤振的新方法,通过研究粘性流体对铣削力系数的影响,分别在干燥和粘性条件下确定了薄壁工件的模态参数,发现在粘性流体条件下铣削力系数显著降低,在粘性流体条件下铣削系统的阻尼显著增大,铣削系统的固有频率减小;最后,其通过一系列铣削试验,验证了该方法的有效性。

MA J^[6]提出了一种新的动态分析模型,来确定阻尼因子对薄壁工件加工动态响应的影响,通过设计磁流变液柔性夹具,来抑制加工过程中的加工振动;提出了用于动态响应预测的关键动力学方程的一般动态切削力模型和阻尼力模型,用以评价有阻尼控制和无阻尼控制铣削过程的稳定性。

文献[5-6]均是通过改变铣削系统的外部环境来抑制颤振的发生,虽然可以明显降低切削过程中的颤振,但试验条件较为苛刻,大规模试用还尚待时日。

SONG Q H^[7]介绍了一种预测薄壁工件高速铣削过程动态稳定极限的方法,该方法考虑了工件的动态

特性随刀具位置或加工时间而变化,分析了系统模态特征随刀具位置变化的曲线方程,通过扫描加工过程中工件沿被加工方向的动态特性和离散法建模,得到了薄壁件稳定性叶瓣图,证明了薄壁工件在铣削过程中,随着材料的去除其稳定性极限曲线是动态的时变曲线,通过时刻预测工件的动态特性参数可实现对薄壁件稳定域精确预测;但是该研究计算和推导过程较为复杂。

典型三维颤振稳定域如图2所示。

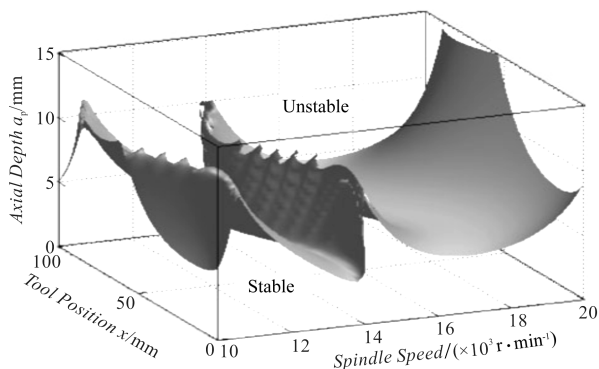


图2 薄壁件三维颤振稳定域

JU Gang-gang^[8]针对如何识别铣削过程的瞬态动态特性,提出了一种变质量结构动态修正方法,用于预测复杂曲面多轴铣削薄壁工件的瞬时动态特性。该方法考虑了工件的动力学特性随刀具位置和材料去除量的变化,将材料切削过程视为切削系统的结构动态修正。利用扩展的舍曼-莫里森-伍德伯里公式,可以估计出切削系统的瞬时动态特性,从而得到修正后的频响函数(FRF);通过补偿的方法,每次走刀结束都会修正工件子系统的模态参数。但是,该方法所利用的公式,只能估计出瞬时动态特性参数,误差虽然在允许范围内,但在薄壁件精加工阶段,其预测的精度尚欠提高。

3.2 频域法

频域法又称解析求解法,是在频域内对铣削稳定性进行分析,并求解的方法。目前,频域法有零阶频率法(ZOA)和多频域法(MF)两种。

李忠群^[9]根据柔度耦合结构分析(RCSA)技术获得了机床-刀具系统刀位点的动态特性,采用经典的零阶频域法(ZOA)方法近似得到了与某一刀位点对应的稳定性叶瓣图(SLD),通过考虑不同轴向切削深度对应的实际刀尖位置,以及刀尖位置对预测SLD的影响,获得了具有较大轴向切削深度的铣削加工的SLD;零阶频域法虽然精度不高,但对于薄壁件粗加工阶段已经可以很好抑制颤振。

SINGH K K^[10] 通过有限元法模态分析,得到了微型铣刀的频响函数,并将模态分析得到的频响函数与实验得到的频响函数进行了验证,对高速微铣削过程中的颤振进行了预测;但是研究中,在对微型铣刀和刀柄进行分析时,忽略了薄壁件自身具有的弱刚性,若考虑工件的动态特性,对整个工艺系统进行分析,就可十分精准地预测颤振稳定域。

LI Z^[11] 提出了一种直接利用加工系统模态参数,快速预测稳定性波瓣图的方法,利用单自由度模态参数估计方法直接通过频响函数估计了铣削系统的模态参数,利用刀尖的频响函数直接绘制出了稳定波瓣图,并对 3 种不同刀具的加工中心的加工性能进行了评价,确定了相应的优化切削条件;该研究通过控制变量分别研究模态参数对稳定域的影响,忽略了模态参数之间的关联,而且单自由度模态参数法虽然简单方便,但对薄壁件精加工阶段并不适用,只能适用于薄壁件粗加工阶段。

牛兴华等^[12] 通过模态试验和铣削力辨识试验,基于 Matlab 对立式加工中心稳定域进行了研究,得到了立式加工中心铣削稳定性叶瓣图,根据颤振稳定域选取相应的数据验证了其可靠性;但是文中对稳定域建模仍停留在 X, Y 两个方向上,并且尚未考虑零件的弱刚性,对于复杂曲面薄壁件颤振预测精度较低,有待改进。

频响函数和叶瓣图两者关系如图 3 所示。

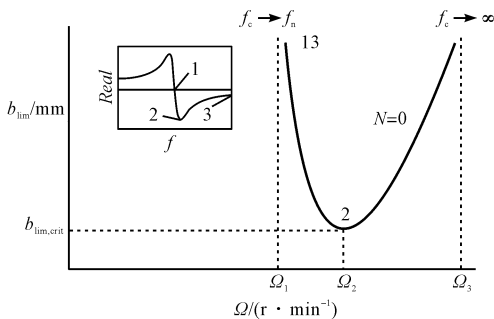


图 3 频响函数与叶瓣图关系

李宏坤等^[13] 通过有限元仿真模拟实际铣削过程,得到了铣削力大小以及铣削力系数,同样通过模态试验获取了主轴-刀具系统的模态参数,再以铣削系数和模态参数为基础,完成了基于铣削力仿真的稳定域叶瓣图构建;但是该研究中所建立的颤振稳定域,由于忽略了工件动态特性和刀具位置,只适用于平面铣削。

杜洪等^[14] 利用模态实验和铣削力实验,得到了特定刀具和工件系统的模态参数和铣削力系数,并结合完全平均和峰值平均两种算法,建立了颤振稳定性边界曲线,从而得到了铣削工艺参数;但其建立的稳定性

模型为单自由度模型,而且试验验证在三轴机床上完成,对于指导复杂曲面薄壁件无颤振切削,目前仍有一定的误差。

朱立达等^[15] 在频域内,针对正交车铣复杂运动产生变深度和厚度的特性,把工件-刀轴方向的振动考虑在内,提出了三维颤振稳定性的理论模型,为薄壁件颤振抑制提供了理论基础;该研究虽然将机床主轴-工件方向考虑在内,但在构建传递函数时,忽略了机床-工件的传递函数,对薄壁件稳定性预测精度仍存在欠缺。

BUDAK E 等^[16] 基于薄壁件的有限元模型,利用结构动力学修正法,根据刀具位置确定了每一个周期内刀具位置上被切削的工件,预测了薄壁工件在加工过程中的动态特性,该方法可精确检测到与刀具位置对应的极限切深和主轴转速,适用于复杂曲面薄壁件的稳定性预测。

刀位点带入稳定域计算如图 4 所示。

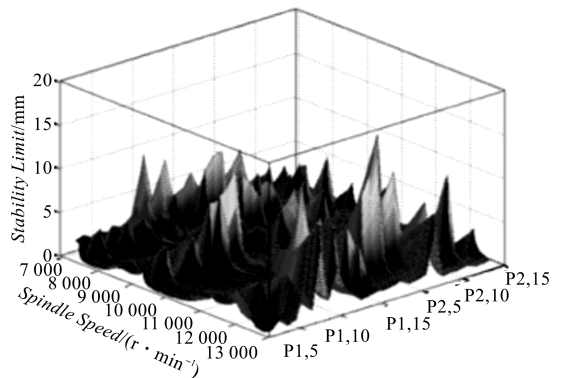


图 4 考虑刀位点实时三维稳定域

3.3 试验法与颤振在线监测

试验法是通过切削试验来获取机床-刀具-工件颤振稳定域的方法。其大致思路为固定主轴转速,然后沿着刀具进给方向改变轴向切深,通过麦克风或者声传感器拾取切削噪声信号,当颤振发生时停止切削,进而获取颤振发生时的极限切深。改变主轴转速,重复上述步骤,就可以获取特定材料和特定刀具的稳定性叶瓣图。

DELIO T^[17] 通过对各种传感器的比较,表明麦克风是一种很好的颤振检测和控制传感器,比较了麦克风和其他一些常见的传感器(位移探头和加速度计)在检测不稳定铣削方面的性能,结果表明:各类传感器在复杂情况下,麦克风信号用来识别颤振更为优越,但由于选择对比传感器较少,并不能反应麦克风面对所有传感器的优势,而且目前激光等位移传感器精度更高。

LAMRAOUI M^[18] 提出了一种新的计算机数控铣

床颤振检测方法,该方法的创新之处在于仅利用电机机箱采集的电机电流信号和人工智能对颤振进行监测,利用支持向量机(SVM)将所选特征分为了稳定和 unstable 两类,通过实验数据的训练,智能颤振检测对切削状态的识别精度达到了96%以上;但是文中对实验数据的训练需要大量时间,计算过程繁琐而且需要大量理论支持,适用于特定复杂曲面薄壁件的加工。

QUINTANA G^[19]提出了一种用于铣削加工中稳定性叶瓣图识别的实验方法,该方法基于经验测试,工件允许在进给方向上的轴向切削深度逐渐增加,表示它们在进给方向上的坐标,而主轴转速也逐渐增加,在这过程中一旦检测到颤振,就会中断切削过程,识别出稳定与不稳定切削的边界,即稳定叶瓣图;但该方法基于经验法,只适用于没有技术和理论支持的中小型企业。

FRIEDRICH J^[20]提出了一种在线获取和监测颤振稳定域的方法,该方法允许在生产过程中计算SLD,根据加工过程中测量到的振动信号来估计稳定边界,对输入数据进行了连续训练,并提出了一种信任准则,用于判断算法的预测效果;虽然该方法可以为很多企业很好解决颤振稳定域问题,但其分析基准函数和建立的二自由度铣削系统,忽略了工件具有弱刚性的特性,对复杂曲面薄壁件并不具备较好适用性。

费仁元等^[21]分析了现有的颤振监控方法的技术特点和发展趋势,提出了通过基于智能材料主动控制切削系统动态特性来进行颤振在线抑制的新方法;但智能材料条件苛刻,只能对特种材料具有较好的颤振抑制,对于航空航天等固定材料的铣削加工,仍无法解决。

从上述文献中可以发现:对于复杂曲面薄壁件颤振控制理论的研究,无论是改变切削环境,还是对工艺系统在线监测,越来越多的学者考虑工件的弱刚性和刀位点,并且将工件切削时材料移除对机床-工件的工艺系统动态特性的影响考虑在内,建立了实时精确的三维稳定性叶瓣图。而且在此基础上,如何简化算法和提高计算效率,仍是目前建立复杂曲面薄壁件稳定域急需解决的问题。

4 颤振抑制工艺优化策略

铣削加工中,工艺系统的动力学特性与加工余量的分布形式密切相关,尤其对于薄壁零件而言。采用非均匀的加工余量可以形成对加工过程的自位支撑,从而改善工艺系统的动力学特性(模态传参数:频率、阻尼比、刚度等),提高加工过程的稳定性。

针对复杂曲面薄壁件铣削过程产生的再生型颤振,张定华等^[22]提出了一种基于切削颤振控制的加工余量设计方法,将稳定切削参数考虑到加工余量设计之中,通过计算得到了满足稳态切削的非均匀加工余量,该方法不仅提高了薄壁零件的刚性,还有效地减小铣削颤振;但该研究并未深入分析和解释非均匀余量设计增加系统哪些参数,只对叶片的固有频率作出了简要分析,对刚度和阻尼比等尚未作出深入研究。

REN J X 等^[23]基于刚度优化和材料去除工序优化的原则,对薄壁件采用非均匀余量设计和螺旋铣削工艺技术,提高了薄壁构件的刚度;但是对于复杂曲面,螺旋铣削编程要求高,而且对刀具磨损严重,因此,目前尚未得到推广。

TIAN W 等^[24]基于薄壁工件的结构刚度和模态有限元分析,借助特征值灵敏度分析方法,确定并优化了半精加工薄壁工件的余量分布状态,实现了提高薄壁零件加工本身刚度的目标;但研究中特征值灵敏度分析法中的模型修正问题未能得到很好的解决,仍存在误差。

LUO M 等^[25]提出了一种对称螺旋铣削方法,通过释放叶片两侧的残余应力,以控制加工变形,该方法在加工过程中叶片两边都留有非均匀余量,以增加刚性和抑制颤振;但是对于叶片两边都保持非均匀余量,会增加叶片精加工的时间,进而降低加工效率,因此在保证抑制颤振的基础上,非均匀余量加厚应尽可能的小。

ZHOU X^[26]提出了一种基于单线刀具轨迹的切削参数优化选择方法,以抑制切削颤振,通过对叶轮叶片进行模态分析,对叶片表面易引起加工变形和振动的不稳定区域进行了预测,基于此建立了三维稳定波瓣图,提出了基于单线轨迹的切削参数优化方法,对某种单一薄壁件具有较好的效果;但是目前,对于五轴数控加工,单线刀具轨迹尚不适用,因此并未得到普及。

JIANG L^[27]提出了一种切削力-扫描面积模型,通过进给量,使切削力的控制转化为扫描面积率(SAR),该方法还可以将不稳定旋转分解为更多的微连续旋转,或根据刀具轴线与加工公差的几何关系调整刀具轴线方向,从而改善微角度不连续或往复旋转等不稳定旋转状态。

对于复杂曲面薄壁件抑制颤振的工艺优化方面,主要有两种方式:

- (1) 优化刀具轨迹,进而降低切削力,达到减小颤振;
- (2) 改变工件传统加工工艺,采用不同加工余量,

以此增加机床-工价工艺系统的动态特性(刚度、阻尼比等),使得工件的极限切深提高。

基于以上的研究,本文提出了一种非均匀余量工艺优化策略,改进传统整体式叶轮的加工工艺,针对轴流式整体叶轮提出了非均匀余量工艺优化策略,极大地提高了机床-叶片工艺系统的模态参数,降低再生型颤振的发生^[28-32]。

优化方案和稳定域提高如图 5 所示。

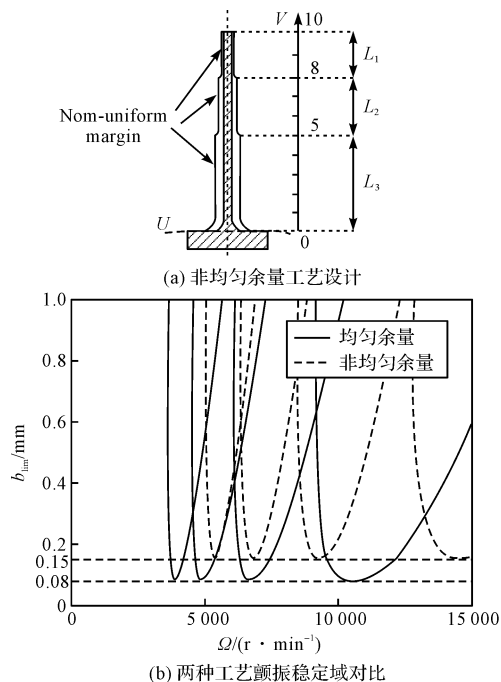


图 5 非均匀余量优化策略工艺与稳定域

均匀余量精加工跟非均匀余量精加工相比,在加工效率得到大幅度提高的同时,加工质量和加工精度也得到了改善。

从图 5(b)可以得出:非均匀余量叶片加工时,对于相同的主轴转速,轴向切深更大,对于同样的切深,主轴转速可选择范围更广,可明显提高加工效率和抑制颤振。

5 结束语

基于再生型颤振,本文结合国内外研究现状对复杂曲面薄壁件颤振抑制技术进行了对比分析;归纳和分析了构建稳定性叶瓣图三大研究方法和相关工艺优化策略,并对目前复杂曲面薄壁件铣削颤振存在的难点进行了探讨,最后通过分析影响薄壁件颤振稳定性的因素,提出了整体式叶轮五轴加工非均匀余量工艺优化策略,提高了机床-工件系统的模态参数,实现了降低颤振,提高精度的要求。

作为目前颤振稳定性分析的难点,今后研究方向

仍从以下 4 个方面入手:

(1)机床-刀具方面,考虑刀具-工件方向的振动,建立三维稳定域分析模型,这是目前大多数国内研究人员仍未解决的一个难题;

(2)机床-工件方面,将弱刚性的机床-工件工艺系统加入整个工艺系统进行分析,并考虑材料去除和刀具位置对工件模态参数的影响;

(3)工艺优化方面,应在增加工件刚性的前提下,尽可能地减小预留量,以提高精加工阶段的效率;

(4)改变切削环境,以增加铣削系统的稳定性。

参考文献 (References):

- [1] WU S, LI R, LIU X, et al. Experimental study of thin wall milling chatter stability nonlinear criterion [J]. **Procedia CIRP**, 2016,56(5):422-427.
- [2] LIU W W, CAI Y Y, LI F, et al. A study of chatter stability domain in different phases of milling process of thin-wall component[J]. **Advanced Materials Research**, 2013,711(6):137-142.
- [3] ZHANG X, YU T, WANG W, et al. Three-dimensional process stability prediction of thin-walled workpiece in milling operation [J]. **Machining Science and Technology**, 2016,20(3):406-424.
- [4] WANG T Y, HE N, LI L. Study on the stability of high-speed milling of thin-walled workpiece[J]. **Advanced Materials Research**, 2010,50(4):97-101.
- [5] ZHANG Zhan, LI Hong-guang, LIU Xian-bo, et al. Chatter mitigation for the milling of thin-walled workpiece[J]. **International Journal of Mechanical Sciences**, 2018(138-139):262-271.
- [6] MA J, ZHANG D, WU B, et al. Stability improvement and vibration suppression of the thin-walled workpiece in milling process via magnetorheological fluid flexible fixture[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2017,88(5-8):1231-1242.
- [7] SONG Q H, TANG W X, AI X. Prediction of dynamic stability limit of time-variable parameters system in thin-walled workpiece high-speed milling processes [J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2011,55(9-12):883-889.
- [8] JU Gang-gang, SONG Qing-hua, LIU Zhan-qiang, et al. Instantaneous dynamics of multi-axis milling thin-walled workpiece with complex curved surface[J]. **Materials Science Forum**, 2016,3901(836):152-156.
- [9] LI Zhong-qun, WANG Zhi-kang, SHI Xiao-fang. RCSA-based prediction of chatter stability for milling process with large axial depth of cut [J]. **The International Journal of**

- Advanced Manufacturing Technology**, 2018, 96(1-4): 833-843.
- [10] SINGH K K, SINGH R. Chatter stability prediction in high-speed micromilling of Ti6Al4V via finite element based microend mill dynamics [J]. **Advances in Manufacturing**, 2018, 6(4): 1-12.
- [11] LI Z, WANG Z, SHI X. Fast prediction of chatter stability lobe diagram for milling process using frequency response function or modal parameters [J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2017, 89(9-12): 2603-2612.
- [12] 黄乾友,牛兴华,赵铁民,等. 基于 Matlab 铣削颤振稳定域计算与仿真[J]. 天津理工大学学报, 2017, 33(5): 24-28.
- [13] 李宏坤,周帅,任远杰,等. 基于铣削力仿真的稳定域叶瓣图构建[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(6): 1136-1141.
- [14] 李洪涛,杜红,郭延艳. 钛合金 Ti6Al4V 铣削加工的稳定性[J]. 黑龙江科技大学学报, 2016, 26(4): 405-408.
- [15] 朱立达,王宛山,李赫,等. 正交车铣偏心加工三维颤振稳定性研究[J]. 机械工程学报, 2011, 45(23): 186-192.
- [16] BUDAK E, TUNC L T, ALAN S, et al. Prediction of workpiece dynamics and its effects on chatter stability in milling[J]. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, 2012, 61(1): 339-342.
- [17] DELIO T. Use of audio signals for chatter detection and control[J]. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, 1992, 114(2): 146.
- [18] LAMRAOUI M. Vibration engineering and technology of machinery [M]. 1th ed. New York: Springer International Publishing, 2015.
- [19] QUINTANA G, CIURANA J, TEIXIDOR D. A new experimental methodology for identification of stability lobes diagram in milling operations[J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2008, 48(15): 1637-1645.
- [20] FRIEDRICH J, TORZEWSKI J, VERL A. Online learning of stability lobe diagrams in milling[J]. **Procedia CIRP**, 2018, 67(8): 278-283.
- [21] 费仁元,王民. 切削颤振在线监控的研究现状及进展[J]. 中国机械工程, 2001, 12(9): 1075-1079.
- [22] 周续,张定华,吴宝海,等. 基于颤振控制的薄壁零件加工余量设计方法[EB/OL]. 北京: 中国科技论文在线 [2013-12-27]. [http://www. paper. edu. cn/releasepaper/content/201312-981](http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201312-981).
- [23] REN J X, YANG B Q, LIANG Y S, et al. Research on chatter suppression in machining thin-walled components based on rigidity optimization[J]. **Advanced Materials Research**, 2010(97-101): 1947-1951.
- [24] TIAN W, REN J, WANG D, et al. Optimization of non-uniform allowance process of thin-walled parts based on eigenvalue sensitivity[J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2018, 96(5-8): 2101-2116.
- [25] WU B H, LUO M, ZHANG D H, et al. Deformation control and chatter suppression in 5-axis milling of thin-walled blade[J]. **Advanced Materials Research**, 2011, 188(6): 314-318.
- [26] ZHOU X, ZHANG D, LUO M, et al. Toolpath dependent chatter suppression in multi-axis milling of hollow fan blades with ball-end cutter[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2014, 72(5-8): 643-651.
- [27] JIANG L, YAHYA E, GUOFU DING. The research of surface waviness control method for 5-axis flank milling[J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2013, 69(1-4): 835-847.
- [28] 吴雁,吕博鑫,吕仕强,等. 基于非均匀余量的整体叶轮加工工艺优化策略[J]. 航空制造技术, 2017(5): 72-76, 81.
- [29] 吴雁,吕博鑫,吕仕强,等. 整体叶轮系零件制造精度关键技术研究综述[J]. 现代制造工程, 2017(1): 151-156.
- [30] 董佳灵,黄立新,何祥圣. 球头铣刀铣削 SKD61 钢三维仿真研究[J]. 轻工机械, 2018, 36(3): 17-23, 30.
- [31] 朱国奎,张敏良,朱鹤. 基于铣削声音信号的刀具状态实验研究[J]. 轻工机械, 2017, 35(1): 61-65, 70.
- [32] 吕博鑫,吴雁,陈青云,等. 减小轴流式整体叶轮铣削颤振的工艺优化研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(23): 86-89, 94.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

吴雁,王开发,郑刚,等. 复杂曲面薄壁件铣削颤振稳定性研究综述[J]. 机电工程, 2020, 37(1): 1-7.

WU Yan, WANG Kai-fa, ZHENG Gang, et al. Review of research on flutter stability in thin wall milling with complex curved surface[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020, 37(1): 1-7.《机电工程》杂志: [http://www. meem. com. cn](http://www.meem.com.cn)