

航空薄壁件铣削加工动力学仿真技术*

杨 昀^{1,2}, 张卫红², 党建卫¹, 郑小伟¹, 万 敏²

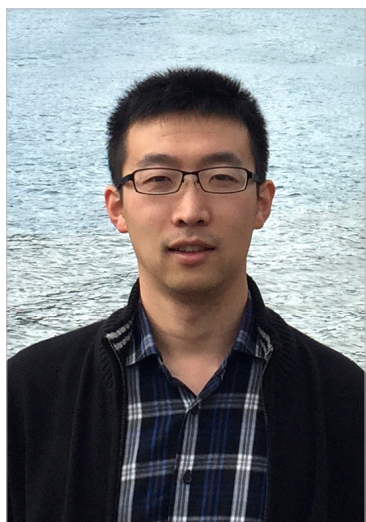
(1. 航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司, 西安 710089;

2. 西北工业大学机电学院, 西安 710072)

[摘要] 薄壁件铣削是航空工业中最常见的加工方式。航空薄壁件铣削工艺系统固有的弱刚性特点易引起切削颤振和变形,极大影响加工质量和效率。研究航空薄壁件铣削加工动力学仿真技术,指导工艺、刀具参数优选,对高质高效加工技术具有重要意义。围绕薄壁件铣削加工动力学仿真中的刀具-主轴系统动力学建模、切削瞬时薄壁件动力学建模及铣削过程动力学建模等技术进行介绍。

关键词: 薄壁件; 铣削; 颤振; 刀尖导纳; 工件动态特性

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.07.042



杨 昀

博士,航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司与西北工业大学联合培养博士后。研究方向为弱刚度构件切削加工动力学、难加工材料高效切削。发表SCI索引学术论文20余篇,获国家发明专利10余项,省部级一等奖2项,主持国家自然科学基金等项目4项。

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51705427); 中国博士后科学基金项目(2017M610652); 中央高校基本科研项目(3102017ZY006)。

为减轻飞机重量并满足结构强度和性能要求,先进飞机设计中大量采用整体薄壁件,如整体隔框、整体壁板等。通常这些零件的设计尺寸及位置精度要求高,零件表面质量要求高,零件品种规格多但批量较小,因此多采用板料或锻件数控铣削加工。由于此类零件同时具有尺寸大(某些零件尺寸可达数十米)、结构形状复杂(如具有各种形式的下陷、槽腔、加强筋及凸缘等)、壁薄刚度差(某些零件厚度仅有1~2mm)、多采用难加工材料(如钛合金和高强钢等)等特点,导致其切削加工工艺性极差。在切削力和切削热等因素的影响下,极易发生切削颤振和加工变形,对加工效率、加工精度和表面质量等造成诸多不良影响,加速刀具磨损和破坏,严重时导致零件报废。因此,航空薄壁件切削加工是国际公认的制造难题之一。掌握这类关键零件的高精度、高效率制造技术与手段对我国高端装备制造能力的提升有

着关键性的作用。

为抑制加工颤振和变形,传统做法是降低切削用量,这将导致机床、刀具的性能难以得到充分发挥,大大降低加工效率,延长整个产品的制造周期。例如,某型机的整体框采用钛合金TC18锻件毛坯铣削成形,加工过程中为避免振动和刀具快速磨损,以保守的切削参数进行切削,加工时间长达55天,严重影响了产品研发生产进度。随着计算机仿真技术的快速发展,切削加工过程的动力学仿真成为一种替代传统上基于经验法或试错法等模式的极其有效的手段。通过对切削过程中的切削力和振动等关键性物理量进行合理建模,量化描述切削过程中刀具和工件的振动和变形等物理现象,进而对切削加工过程进行优化,实现高质高效加工,在航空航天领域受到广泛关注^[1]。

切削过程是机床-刀具-工件系统的动态作用结果,切削过程的力

学模型是探索切削系统-工艺相互作用机理的理论基础^[2]。这其中既包括切削系统中刀具和工件的静力学和动力学建模,也包括切削工艺过程的静力学和动力学建模。就航空薄壁件铣削过程而言,刀具常处于大悬伸状态,工件壁高且厚度小,故刀具和工件的动刚度都较低,薄壁件铣削加工动力学仿真分析要同时考虑刀具和工件的振动。在铣削力作用下,刀具与工件均可能发生较大的变形、振动。航空薄壁件铣削加工动力学仿真主要包括以下问题:(1)刀具-主轴系统动力学建模:对刀具-主轴系统进行动力学建模,获得铣削系统中刀具-主轴系统动态特性;(2)切削瞬时薄壁件动力学建模:准确快速提取铣削系统中工件部分的时变动态特性;(3)铣削过程动力学建模:以(1)和(2)获取的动态特性为系统参数,对铣削系统中刀具与工件相互作用力及所引起的振动进行准确建模和系统稳定性分析。针对以上3方面的问题,国内外学者进行了大量研究工作,提出了多种建模仿真方法。本文通过介绍归纳航空薄壁件铣削加工动力学仿真技术的关键问题,分析其研究现状,并对存在的问题进行趋势展望。

刀具-主轴系统动力学建模

刀具-主轴系统动态特性是铣削加工动力学仿真中所需的基础数据,对仿真准确性有着至关重要的作用。一般情况下,通过锤击模态试验(图1)测量刀具刀尖的位移-力频响应函数,即导纳(Receptance);然后直接使用导纳或对导纳进行模态分析提取刀具-主轴系统动态特性参数(即动态质量、刚度和阻尼)以进行后续的铣削动力学仿真。然而刀具刀尖导纳与刀具、刀柄及主轴的组合密切相关。一旦刀具或刀柄的尺寸或材料变化,就需要重复锤击模态试验,这一缺点直接限制了动力学

仿真的实际工程应用。大批学者^[3-5]提出通过有限元方法对刀具-主轴系统进行动力学建模,以避免重复的锤击模态试验。但由于确定主轴与机床之间结合面的刚度和阻尼特性以及轴承的接触刚度等都较为困难,并且不易准确得知商用机床的各零件的几何尺寸,有限元方法对刀具-主轴系统进行准确动力学建模很难。为了解决这个问题,Schmitz等^[6]引入结构动力学中的子结构分析法来计算刀具-主轴系统动态特性。这种方法的一般思路^[7]可以总结如下:(1)将刀具-主轴系统分为几个子结构;(2)测量不易理论建模的子结构(即主轴-机床部分)的动态特性;(3)对易于建模分析的子结构(比如刀具和刀柄),计算其动态特性;(4)建立组装准则,耦合第(2)、(3)步中的结果。

下文将简要介绍作者提出的一种预测刀具-主轴系统拉-弯-扭动态特性的一次性整体建模方法^[8-9]。如图2(a)所示,将刀具-夹头-刀柄-主轴系统分为6个相对简单的子结构:(a)主轴-刀柄子结构;(b)刀柄-夹头连接界面子结构;(c)夹头子结构;(d)刀具-夹头连接界面子结构;(e)刀具柄部子结构;(f)刀具刃部子结构。其中刀柄通过刀柄-夹头连接界面为夹头提供支撑,而夹头通过刀具-夹头连接界面为刀具提供支撑。两连接界面均看作零厚度的分布式弹性阻尼

层。对于主轴-刀柄子结构,将刀柄可以分成 N_H-1 个单元,并通过 N_H 个节点与刀柄-夹头连接界面子结构相连。主轴-刀柄子结构的动力学方程可以写为:

$$\mathbf{Q}_H(\omega) = \mathbf{H}_H(\omega) \mathbf{F}_{H-HC}(\omega) \quad (1)$$

其中, $\mathbf{Q}_H(\omega)$ 和 $\mathbf{F}_{H-HC}(\omega)$ 分别为子结构各节点的位移和力向量; \mathbf{H}_H 为主轴-刀柄子结构各节点的导纳矩阵,通过图1所示的锤击模态试验测量; ω 为频率。

然后通过Timoshenko梁理论建立夹头子结构、刀具柄部子结构和刀具刃部子结构的动力学方程:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_C \ddot{\mathbf{Q}}_C(t) + \mathbf{C}_C \dot{\mathbf{Q}}_C(t) + \mathbf{K}_C \mathbf{Q}_C(t) &= \mathbf{F}_C(t) \\ \mathbf{M}_S \ddot{\mathbf{Q}}_S(t) + \mathbf{C}_S \dot{\mathbf{Q}}_S(t) + \mathbf{K}_S \mathbf{Q}_S(t) &= \mathbf{F}_S(t) \\ \mathbf{M}_F \ddot{\mathbf{Q}}_F(t) + \mathbf{C}_F \dot{\mathbf{Q}}_F(t) + \mathbf{K}_F \mathbf{Q}_F(t) &= \mathbf{F}_{F-S}(t) \\ &+ \mathbf{F}_{FE}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{M}_{\langle \cdot \rangle}$ 、 $\mathbf{C}_{\langle \cdot \rangle}$ 和 $\mathbf{K}_{\langle \cdot \rangle}$ 分别是子结构 $\langle \cdot \rangle$ 的质量、阻尼和刚度矩阵, $\mathbf{Q}_{\langle \cdot \rangle}$ 、 $\dot{\mathbf{Q}}_{\langle \cdot \rangle}$ 和 $\ddot{\mathbf{Q}}_{\langle \cdot \rangle}$ 分别为子结构 $\langle \cdot \rangle$ 上各节点的位移、速度和加速度向量,下标C、S和F分别表示夹头、刀具柄部和刀具刃部子结构。 $\mathbf{F}_C(t)$ 和 $\mathbf{F}_S(t)$ 分别是夹头和刀具柄部子结构受到的作用力, $\mathbf{F}_{F-S}(t)$ 和 $\mathbf{F}_{FE}(t)$ 分别是刀具刃部子结构受到来自柄部子结构的力和外部激励力。

将刀柄-夹头连接界面子结构和刀具-夹头连接界面子结构视为分布式的零厚度层。刀具、夹头和刀柄通过两者连接。如图2(b)所示,将刀柄-夹头连接界面子结构分成 $N_{HC}-1$ 个独立的4节点弹簧-阻尼

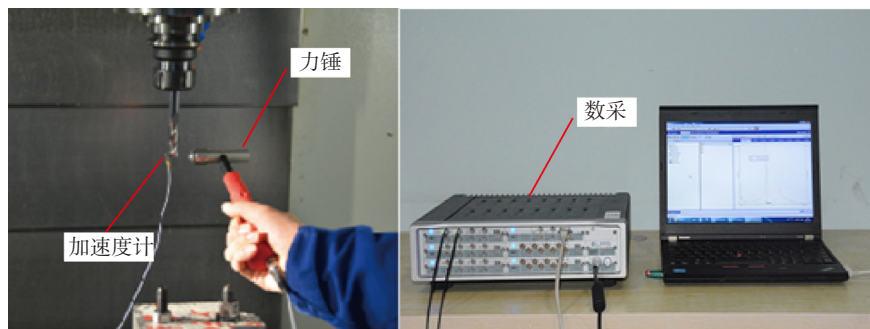


图1 锤击模态试验装置

Fig.1 Experimental setup in modal testing

学建模,准确获取瞬时薄壁件动态特性。Bravo等^[10]指出在进行薄壁件铣削动力学仿真时,薄壁件动态特性的变化直接影响仿真结果。由于材料去除引起航空薄壁件质量和刚度的减小以及刀具-工件切削区域的不断变化等原因,薄壁件动态特性在整个铣削过程中随时间变化。若只使用加工前或加工后的薄壁件动态特性进行动力学建模,则预测结果不准确,这进一步增加了航空薄壁件铣削加工动力学仿真的难度。因此他们使用不同刀位点处的瞬时薄壁件动态特性测量值进行仿真。但是,在切削过程中重复锤击模态试验测量瞬时薄壁件动态特性显然只适用于实验室研究,生产单位则需要更高效实用的计算方法。

一部分学者使用有限元方法计算薄壁件3轴和5轴铣削过程中的薄壁件动态特性。这些工作的共同点是在每一个刀位点处建立薄壁件的瞬时有限元模型,并进行模态分析获取薄壁件动态特性。这种方法的优点是只要正确地定义模型的边界条件,则可以保证预测的准确性。但由于每个刀位点处都需要重新建立有限元模型并重新进行计算模态分析,这种方法也相当耗时。

为克服此缺点,需将研究重点集中于提高数值计算效率方面。Meshreki等^[11]利用多跨梁理论,建立了框类薄壁件半解析法动力学模型,提高了计算效率。Tuysuz等^[12]建立了一种基于降阶子结构方法的薄壁件动态特性计算方法。Budak等^[13]和Song等^[14]分别基于初始薄壁件有限元模型,利用结构动力修改策略预测了不同刀位点处的瞬时薄壁件动态特性。上述两项工作的优点都是只需要对初始工件进行一次模态分析或频响函数测量便可得到切削过程中的瞬时动态特性。下文将介绍作者提出的一种基于结构动力修改策略的可预测航空薄壁

件各点动态特性的动力学建模方法^[15]。

首先,对初始薄壁件动力学方程:

$$\mathbf{M}_{w,0}\ddot{\mathbf{Q}}_w(t) + \mathbf{C}_{w,0}\dot{\mathbf{Q}}_w(t) + \mathbf{K}_{w,0}\mathbf{Q}_w(t) = \mathbf{F}_{w,0}(t) \quad (6)$$

进行模态分析,将该运动方程在模态空间中表达:

$$\ddot{\mathbf{\Gamma}}_{w,0}(t) + 2\zeta_{w,0}\omega_{w,0}\dot{\mathbf{\Gamma}}_{w,0}(t) + \omega_{w,0}^2\mathbf{\Gamma}_{w,0}(t) = \mathbf{U}_{w,0}^T\mathbf{F}_{w,0}(t) \quad (7)$$

其中, $\mathbf{M}_{w,0}$ 、 $\mathbf{C}_{w,0}$ 和 $\mathbf{K}_{w,0}$ 为初始薄壁件质量、阻尼和刚度矩阵, $\ddot{\mathbf{Q}}_w$ 、 $\dot{\mathbf{Q}}_w$ 和 \mathbf{Q}_w 分别为薄壁件上各节点的位移、速度和加速度向量, $\mathbf{F}_{w,0}(t)$ 为各节点受力向量。 $\mathbf{\Gamma}_{w,0}$ 为模态坐标向量, $\zeta_{w,0}$ 、 $\omega_{w,0}$ 和 $\mathbf{U}_{w,0}$ 分别为阻尼比矩阵、固有频率矩阵和模态变换矩阵。下标“0”表示薄壁件切削初始状态。

切削过程中第 m 个刀位点处的薄壁件动力学方程:

$$\mathbf{M}_{w,m}\ddot{\mathbf{Q}}_w(t) + \mathbf{C}_{w,m}\dot{\mathbf{Q}}_w(t) + \mathbf{K}_{w,m}\mathbf{Q}_w(t) = \mathbf{F}_{w,m}(t) \quad (8)$$

又可表示为:

$$(\mathbf{M}_{w,0} + \Delta\mathbf{M}_{w,m})\ddot{\mathbf{Q}}_w(t) + \mathbf{C}_{w,m}\dot{\mathbf{Q}}_w(t) + (\mathbf{K}_{w,0} + \Delta\mathbf{K}_{w,m})\mathbf{Q}_w(t) = \mathbf{F}_{w,m}(t) \quad (9)$$

公式(8)、(9)中各量与式(6)中的符号意义相似,下标“ m ”表示第 m 个刀位处薄壁件切削状态。 $\Delta\mathbf{M}_{w,m}$ 和 $\Delta\mathbf{K}_{w,m}$ 分别为材料去除过程中的质量和刚度矩阵的变化量。将式(9)写为无阻尼自由振动方程,利用 $\mathbf{U}_{w,m}$ 该方程进行模态变换后有:
 $(\mathbf{I} + \mathbf{U}_{w,0}^T\Delta\mathbf{M}_{w,m}\mathbf{U}_{w,0})\ddot{\mathbf{\Gamma}}_{w,0}(t) + (\omega_{w,0}^2 + \mathbf{U}_{w,0}^T\Delta\mathbf{K}_{w,m}\mathbf{U}_{w,0})\mathbf{\Gamma}_{w,0}(t) = 0 \quad (10)$

对式(10)再进行模态分析,得到与之对应的模态变化矩阵 \mathbf{U}_m 。再与式(6)、(7)中的模态矩阵结合,即可得到第 m 个刀位点处的薄壁件固有频率矩阵 $\omega_{w,m}$ 和模态矩阵 $\mathbf{U}_{w,m} = \mathbf{U}_{w,0}\mathbf{U}_m$ 。

使用上述的结构动力修改策略,即可进行切削瞬时薄壁件动态特性的提取,流程如图4所示。图5给出了带曲面薄壁件铣削时第2阶模态固有频率的变化规律。详细求解过

程及分析,请参照文献[15]。+

铣削过程动力学建模

完成刀具-主轴系统和薄壁件动力学建模后,即可利用获得的刀具-主轴系统和薄壁件动态特性进行铣削过程动力学建模。其主要目的是通过动力学建模预测铣削稳定域,利用该稳定域进行切削参数的合理选择,在稳定切削的前提下,尽量提高切削效率。若切削参数选择不当,产生铣削颤振,这会导致工件尺寸超差、工件表面粗糙度变大、刀具磨损加剧,甚至可能会损坏机床。因此铣削过程动力学建模具有十分重要的工程应用价值。

20世纪60年代,Smith等^[16]对直角切削过程动力学建模进行了开创性的研究工作,详细分析了切削颤振的主要诱因——切屑再生效应,并指出:切削过程中刀具总是完全或部分地重复切削到前一次或前一个刀齿切削过的表面。若由于某种原因,在已加工表面上有振纹残留,则当刀具再一次切削到这些有振纹的表面时,切屑厚度就会发生变化。切屑厚度的变化引起切削力的波动,又激励刀具和工件的相对振动,使系统产生振动,并再次残留下振纹。如果重复循环,有可能使开始较少的振纹波及整个加工表面,形成再生颤振。

直角切削动力学建模方面的研究工作为切削稳定性预测研究奠定了基础。但不同于直角切削,铣削过程具有的多齿分布、刀刃螺旋、切削力周期变化等特点导致铣削过程动力学建模及稳定性预测比直角切削困难。Tlustý等^[17]通过时域分析的方法对铣削过程进行了动力学建模,并考虑了刀齿跳出工件的非线性因素。Altintas等^[18]指出连续的铣削表面之间的相位移动引发指数增长的切屑厚度是诱发切屑再生颤振的根本原因,并提出了通过取切削力系数矩阵的傅立叶级数的零阶项,在频

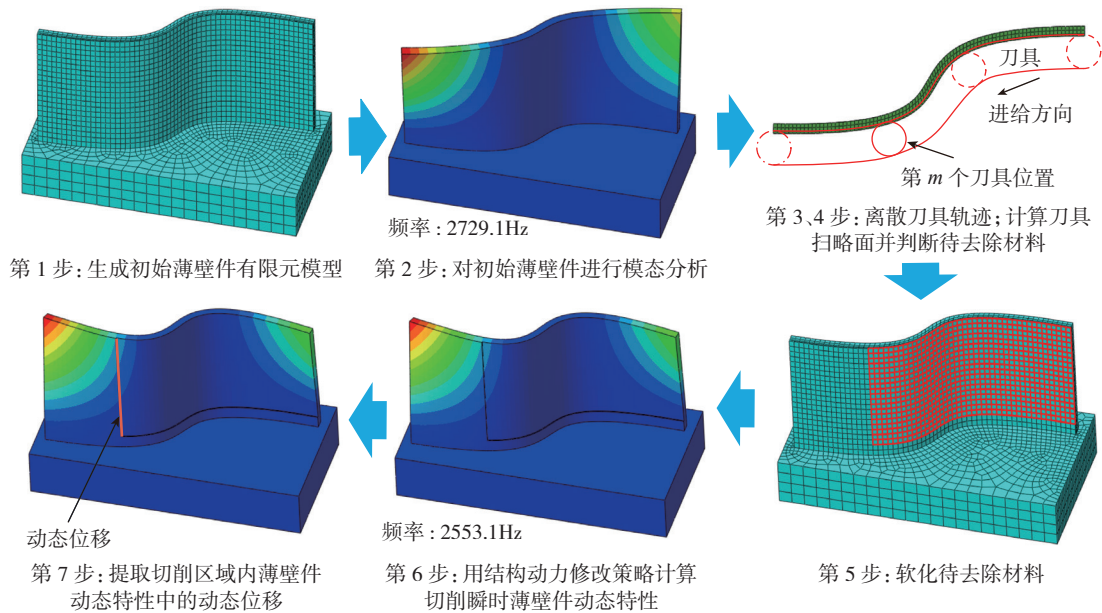


图4 利用结构动力修改策略提取切削瞬时薄壁件动态特性的流程

Fig.4 Extraction of in-process workpiece dynamics using structural dynamic modification scheme

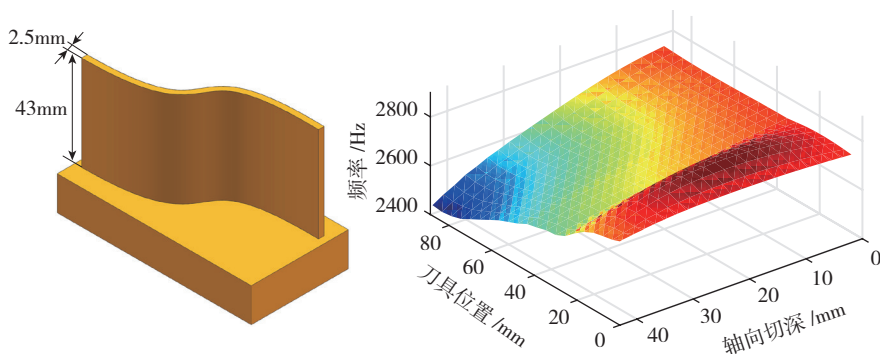


图5 带曲面薄壁件铣削时第2阶模态固有频率

Fig. 5 Predicted natural frequency of 2nd mode during milling of workpiece with curved surface

域中解析计算铣削稳定域的单频率法。该方法具有极高的计算效率,但不能很好预测高度断续切削的小径向切深情况。针对该问题, Insuperger 等^[19]提出了基于 Floquet 理论的半离散方法,以判断铣削过程稳定性。Wan 等^[20]基于半离散法提出了一种考虑了变螺旋角、变齿间角及刀具偏心等多延时因素的通用多延时铣削稳定性预测方法。Li 等^[21]提出了适用于钛合金薄壁件精加工的过程阻尼模型,提高了低速切削稳定域预测精度。但铣削过程动力学建模方法大多采用考虑刀具及工件振动的

单点接触动力学模型^[16]。单点接触模型将刀具及工件分别视为单个质量-弹簧-阻尼元件,它们沿刀轴方向通过单独一点相互作用。该模型并不适合刀具及工件动态特性沿轴向变化明显的铣削系统,比如薄壁件铣削系统。因此, Yang 等^[22]提出了基于刀具和工件多点接触模型的铣削过程动力学建模方法。下文给出简要介绍,具体过程请参照文献^[22]。

如图 6 所示,将刀具-工件切削区域沿轴向划分为 q 个离散点,刀具和薄壁件之间的作用力通过这 q 个

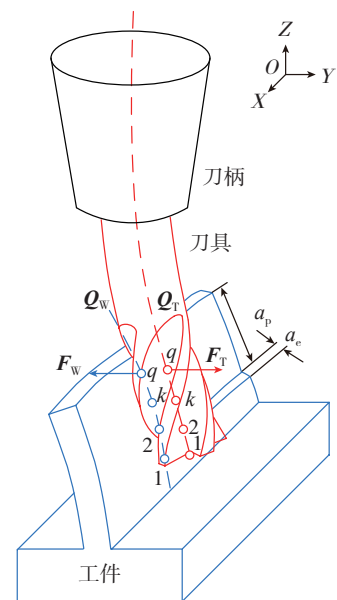


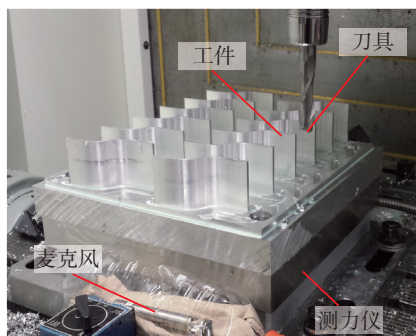
图6 细长刀具铣削薄壁件的多点接触动力学模型

Fig.6 Multiple-point dynamic model for milling of flexible workpiece

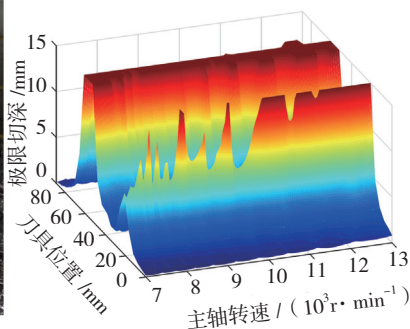
离散点传递,在 q 个离散点处分别建立刀具及工件的动力学方程:

$$M_s \ddot{Q}_s(t) + C_s \dot{Q}_s(t) + K_s Q_s(t) = F_s(t) \quad (S=T, W) \quad (11)$$

其中, \ddot{Q}_s 、 \dot{Q}_s 和 $Q_s(t)$ 分别为子系统 S 的位移、速度及加速度向量。 M_s 、 C_s 和 K_s 分别为子系统 S 在物理空间



(a) 测量装置



(b) 转速-刀位-切深三维切削稳定域预测结果

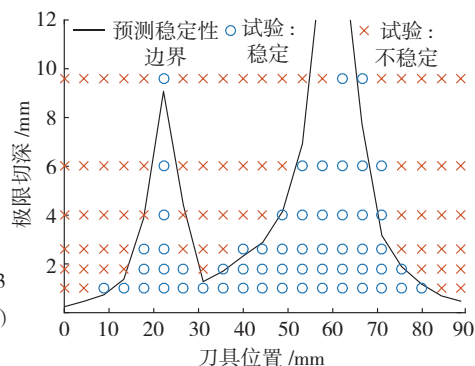
(c) 特定转速(12×10³r/min)下的铣削稳定域与测量结果对比

图7 薄壁件铣削动力学建模应用实例

Fig.7 Case study for modelling of milling of thin-walled workpiece

的质量、阻尼和刚度矩阵。 F_s 为各个节点受到的作用力。下标T和W分别表示刀具-主轴系统和薄壁件。

通过上文中刀具-主轴系统和薄壁件建模方法获得刀具-主轴系统和薄壁件的动态特性 ω_s 和 U_s ,并对式(11)进行模态变换,可得到式(11)在模态空间中表达的方程:

$$\ddot{\Gamma}_s(t) + 2\zeta_s \omega_s \dot{\Gamma}_s(t) + \omega_s^2 \Gamma_s(t) = U_s^T F_s(t) \quad (S=T, W) \quad (12)$$

使用文献[19]中的半离散时域法求解动力学模型式(12),即可得到薄壁件铣削过程稳定域。图7给出了薄壁件铣削动力学建模应用实例。可以看出,薄壁件切削稳定性随走刀位置的不同,变化明显。因此,在工艺规划时,应根据稳定性最差的刀位点选择工艺参数。

结论

本文系统地介绍了航空薄壁件铣削加工动力学仿真的几大关键技术问题,涵盖了从刀具-主轴系统动力学建模、切削瞬时薄壁件动力学建模及铣削过程动力学建模等多方面内容。虽然目前航空薄壁件铣削过程动力学仿真已有部分应用,但其中仍有许多力学问题(如过程阻尼、非线性振动)和计算效率问题有待解决。随着仿真技术的发展,航空薄壁件铣削加工动力学仿真技术将会得到广泛应用。

参考文献

- [1] KAPMEYER G, HUBIG C, HARDY M, et al. Modern machining of advanced aerospace alloys—enabler for quality and performance[J]. *Procedia CIRP*, 2012, 1: 28–43.
- [2] MUNOJA J, BEUDAERT X, DOMBOVARI Z, et al. Chatter suppression techniques in metal cutting[J]. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2016, 65: 785–808.
- [3] LI H, SHIN Y C. Integrated dynamic thermomechanical modeling of high speed spindles, Part 1—model development[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 2004, 26(1): 148–158.
- [4] CAO Y, ALTINTAS Y. Modeling of spindle-bearing and machine tool systems for virtual simulation of milling operations[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, 47(9): 1342–1350.
- [5] 曹宏瑞,何正嘉.机床-主轴耦合系统动力学建模与模型修正[J].*机械工程学报*, 2012, 48(3): 88–94.
CAO Hongrui, HE Zhengjia. Dynamic modeling and model updating of coupled systems between machine tool and its spindle[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(3): 88–94.
- [6] SCHMITZ T, DONALDSON R. Predicting high-speed machining dynamics by substructure analysis[J]. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2000, 49: 303–308.
- [7] SCHMITZ T L, DUNCAN G S. Three-component receptance coupling substructure analysis for tool point dynamics prediction[J]. *Transactions of the ASME – Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2005, 127: 781–790.
- [8] YANG Y, ZHANG W H, MA Y C, et al. Generalized method for the analysis of bending, torsional and axial receptances of tool-holder-spindle assembly[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 99: 48–67.
- [9] YANG Y, WAN M, MA Y C, et al. A new method using double distributed joint interface model for three-dimensional dynamics prediction of spindle-holder-tool system[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 95(5–8): 2729–2745.
- [10] BRAVO U, ALTUZARRA O, LACALLE LÓPEZ DE L N, et al. Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45(15): 1669–1680.
- [11] MESHREKI M, ATTIA H, KOVACS J. Development of a new model for the varying dynamics of flexible pocket-structures during machining[J]. *Transactions of the ASME – Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2011, 133(4): 041002.
- [12] TUYSUZ O, ALTINTAS Y. Frequency domain updating of thin-walled workpiece dynamics using reduced order substructuring method in machining[J]. *Transactions of the ASME – Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, 139: 071013.
- [13] 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.
- [14] SONG Q, LIU Z, WAN Y, et al. Application of Sherman-Morrison-Woodbury formulas in instantaneous dynamic of peripheral milling for thin-walled component[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, 96–97: (下转第69页)

Numerical Simulation and Experimental of Forming Defects in Roll-Bending Process for Z-Shaped Profiles With Large Cross-Section

WANG Anheng¹, XUE Hongqian¹, GAO Pengfei¹, LIU Gang², CHEN Genfa²

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

[ABSTRACT] This paper focus on the defects, such as wrinkling and warping, which generated in the process of four-roll bending for aluminum profiles with a large size Z-shaped section. A finite element analysis model for CNC four-axis roll-bending forming process of Z-shaped profile with large section was established by ABAQUS. Based on the analysis of forming defects, asymmetrical loading mode and secondary roll-bending process were presented to control forming defects. The results indicated that the secondary roll-bending could improve forming quality. Asymmetrical loading mode, the left roller was adjusted higher than the right one, which had significant inhibitory function on defects like wrinkling and warping. Experimental results proved that compared with numerical simulation results, the error was within 10%.

Keywords: Large cross-section; Z-shaped profile; Roll-bending process; Forming defect; Numerical simulation

(责编 铃兰)

(上接第 47 页)

79-90.

[15] 杨昀. 薄壁件铣削系统动力学建模及稳定性预测方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.

YANG Yun. Dynamic modelling and chatter stability prediction of the milling process of thin-walled workpiece[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.

[16] SMITH J, TOBIAS S. The dynamic cutting of metals[J]. International Journal of Machine Tool Design and Research, 1961, 1(4): 283-292.

[17] TLUSTY J, ISMAIL F. Basic nonlinearity in machining chatter[J]. CIRP Annals

- Manufacturing Technology, 1981, 30: 299-304.

[18] ALTINTAS Y, BUDAK E. Analytical prediction of stability lobes in milling[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1995, 44: 357-362.

[19] INSPERGER T, STEPAN G. Semi-discretization method for delayed systems[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2002, 55(5): 503-518.

[20] WAN M, ZHANG W H, DANG J W, et al. A unified stability prediction method for milling process with multiple delays[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(1): 29-41.

[21] LI Z Y, SUN Y W, GUO D M. Chatter prediction utilizing stability lobes with process damping in finish milling of titanium alloy thin-walled workpiece[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89: 2663-2674.

[22] YANG Y, ZHANG W H, MA Y C, et al. Chatter prediction for the peripheral milling of thin-walled workpieces with curved surfaces[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 109: 36-48.

通讯作者: 杨昀, E-mail: yunyang@mail.nwpu.edu.cn。

Dynamic Modelling Technology on Milling Process of Aerospace Thin-Walled Workpiece

YANG Yun^{1,2}, ZHANG Weihong², DANG Jianwei¹, ZHENG Xiaowei¹, WAN Min²

(1. AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Xi'an 710089, China;

2. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] Milling of thin-walled workpiece is the most widely used process in aerospace industries. Due to the low rigidity of the milling system, chatter often occurs, which will decrease the machining efficiency and product quality. Thus, it is greatly significant for high performance milling to study the dynamic modelling technics on milling process of aerospace thin-walled workpiece and further to select the process and tool geometry parameters. In this paper, dynamic modelling technics on milling process of aerospace thin-walled workpiece including dynamic modelling the tool-spindle system, the in-process thin-walled workpiece and milling processes are introduced.

Keywords: Aerospace thin-walled workpiece; Milling; Chatter; Tool point receptance; Workpiece dynamics

(责编 铃兰)