

航空薄壁件铣削加工中保持工艺系统高刚性方法

Method to Hold High Process System Stiffness in Milling Aerial Thin-Wall Part

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 李广旭 刘 强

[摘要] 针对航空铝合金薄壁工件铣削加工时易出现的颤振以及切削效率低的问题,从动力学角度出发进行了深入的分析研究,提出了通过采用保持工艺系统高刚性的加工过程工艺优化与铣削加工动力学仿真结合的方法进行铣削加工。试验结果证明本法可以收到很好的效果,较好地解决了航空铝合金薄壁结构工件加工的颤振问题,提高了工件的加工表面质量和切削效率。

关键词: 颤振 颤振稳定域仿真 薄壁工件

[ABSTRACT] The chatter phenomenon and low efficiency in the milling process of aerial aluminum alloy thin-wall part are studied from the dynamics aspect. A combination method of process optimization to hold high process system stiffness with milling dynamics simulation is presented. Test results prove that better effect is gained by using this method, and the chatter problem of aerial aluminum alloy thin-wall part is solved. The surface quality of workpiece and machining efficiency are improved.

Keywords: Chatter Chatter stability lobes simulation Thin-wall part

在航空制造领域,为了减轻重量和减少装配工作量,大量采用整体薄壁结构件。这种结构件的形状复杂,刚性差,材料去除率高达90%以上^[1-2],对切削加工提出了新的技术要求。国内外对此进行了理论和试验研究^[1-9]。文献[1]从控制加工变形、提高效率方面研究了薄壁整体结构件的高速铣削工艺优化问题;文献[2]提出了薄壁零件铣削加工的振动模型,并实际分析、验证了模型的准确性;文献[3]叙述的是薄壁零件加工中的变形预测和仿真;文献[5]叙述的是薄壁零件圆周铣削过程的系统仿真程序用于检测工艺的合理性和优化工艺参数;文献[6]叙述的是加工变形控制问题;文献[7]叙述的是装夹变形,以及对薄壁件装夹方案进行的优选;文献[8]叙述的是腹板的加工变形规律,以及相应的变形控制方案;文献[9]叙述的是薄壁铣削加工的让刀误差问题。目前,国外学者基于有限元建模,

将工件与机床的动态特性进行耦合,从颤振的角度开展了薄壁零件的铣削加工研究^[4]。以上介绍的主要是从加工变形、振动方面开展的大量研究,从颤振角度开展的研究较少。

目前,国内铝合金薄壁工件高速铣削过程中出现的颤振现象严重困扰着工艺人员,尤其是深腔薄壁件的高速铣削加工,已成为研发和生产的瓶颈。虽然采用基于动力学原理的铣削加工颤振稳定域仿真结果选取的切削参数基本可以避免加工颤振问题,但是,薄壁工件的弱刚性(远低于“机床-刀具”系统的刚性)致使颤振稳定域的切深很低,切削效率差。在加工深腔薄壁件时,大的刀具悬伸量导致“机床-刀具”系统刚性降低,使这个问题更加突出。由此可见,要在保证加工质量的前提下提高切削效率,应当采用避免在弱刚性条件下高速铣削薄壁工件的方法。

作者所在的课题组对加工颤振问题进行了比较系统的研究,在前人研究^[10-12]的基础上开发了基于铣削过程的动力学仿真优化系统和机床动力学特性测试分析系统^[13-15]。本文针对航空制造中薄壁结构件的加工颤振以及切削效率低下问题进行了分析和研究,提出了一种解决薄壁工件加工颤振问题、提高切削效率的方法,并验证了该方法的正确性。

1 基本原理

“机床-刀具-工件”是一个很复杂的系统,可以看作许多集中质量通过“弹簧-阻尼”连接起来的多自由度动力学系统,其动力学特性直接影响动态切削过程。对于立铣加工来说,我们可以通过等效处理把复杂的“机床-刀具”系统和“机床-工件”系统分别简化为 X (进给)、 Y (法向)两个相互垂直方向的“弹簧-阻尼”多自由度系统,建立如图1所示的动态铣削模型。

“机床-刀具”系统动力学模型数学表达式为

$$\begin{cases} m_c \ddot{x} + c_c \dot{x} + k_c x = \sum_{j=0}^{n-1} F_{xj} = F_x(t) \\ m_c \ddot{y} + c_c \dot{y} + k_c y = \sum_{j=0}^{n-1} F_{yj} = F_y(t) \end{cases}; \quad (1)$$

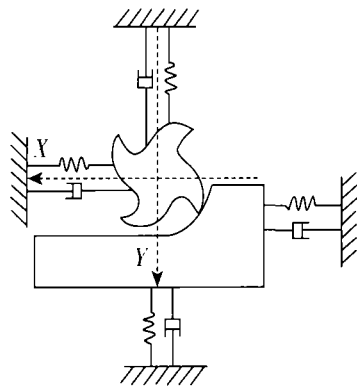


图1 “机床-刀具-工件”系统动力学模型
Fig.1 Dynamics model of “machinetool-cutter-workpiece” system

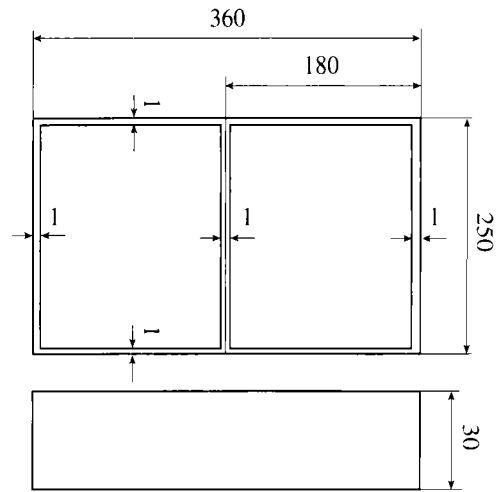


图2 工件草图
Fig.2 Sketch of workpiece

“机床-工件”系统动力学模型数学表达式为

$$\begin{cases} m_w \ddot{x} + c_w \dot{x} + k_w x = \sum_{j=0}^{n-1} F_{xj} = F_x(t) \\ m_w \ddot{y} + c_w \dot{y} + k_w y = \sum_{j=0}^{n-1} F_{yj} = F_y(t) \end{cases} \quad (2)$$

根据上述系统动力学模型,我们只须分别对X、Y方向进行模态试验,测得“机床-刀具”系统和“机床-工件”系统的频率响应函数,然后进行模态分析,辨识出各方向的各阶模态参数,从而为颤振稳定域的计算提供条件。

2 试验方法与仿真分析

2.1 试验系统的搭建

对于“机床-刀具-工件”系统进行力锤冲击试验^[16-17],并采用模态参数辨识方法计算出系统动态特性参数,为稳定域的计算提供参数。

试验测试设备:MSC-1冲击力锤;相应的500kg力传感器;YD67小型加速度传感器(灵敏度:0.3pc/m·s⁻²,频带范围:1~18 000Hz,重量<3g);DLF-3型四合一两通道电荷放大器(衰减率>140dB/oct,具有电荷/电压放大、抗混滤波和积分功能);数据采集器(AD转换精度12位,可实现四路同步采集,最高采样频率50ksps);便携式电脑1台。

2.2 试验工件的设计

航空领域中大量的整体铝合金薄壁结构工件为框格型,根据这一结构特点,我们设计了一个“日”字型铝合金薄壁结构工件(如图2所示)作为试验件代替实际薄壁结构件,对其进行加工工艺过程分析、动力学分析以及试验验证。

2.3 薄壁工件的有限元仿真分析

通过有限元分析可以获取工件的动力学特性及其振动变形情况。采用壳体结构,单元类型采用Elastic 4node 63,采用Mapped方式进行网格划分。

从有限元动力学分析的各阶云纹图中可以发现,工件刚性最弱之处也是振动位移最大的位置,位于各个壁板中间靠上的部位,在实际加工中,也正是这些部位的颤振最严重,加工表面质量最差。

2.4 颤振稳定域仿真计算

在翻板铣AEROSTAR 2500TM上,针对20mm直径的硬质合金铣刀进行锤击试验,并在视工件为刚性的情况下计算颤振稳定域曲线,仿真结果如图3所示(采用的切削参数为:径向切削宽度a_r=20mm,切削速度f=10 000mm/min),图中的数据点是实测结果。

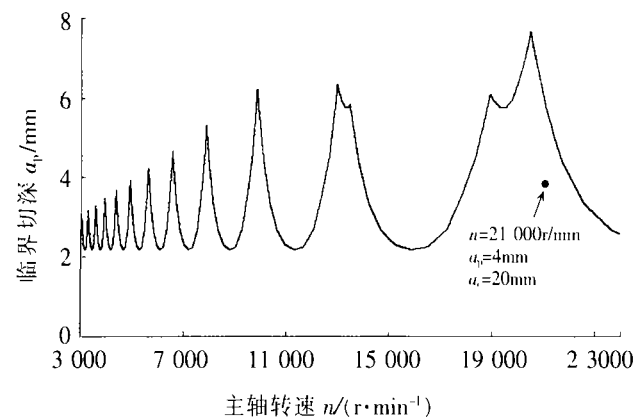


图3 颤振稳定域仿真结果
(a_r=20mm; f=10 000mm/min)
Fig.3 Simulation results of chatter stability lobes

根据工件有限元仿真结果,选择工件刚性最弱的部位进行锤击试验,获得其动力学特性,与“机床-刀具”系统的动力学特性相结合(考虑工件动态特性)计算弱刚性情况下的颤振稳定域,如图4所示($a_r=20\text{mm}; f=10\ 000\text{mm}/\text{min}$)。与图3相比较,稳定域极低,而且极易发生颤振。

试验研究和工程应用表明,加工颤振对刀具悬长的改变敏感(见图5,采用五坐标数控加工中心K197;刀具直径 12.7mm)。因此需要控制刀具的悬伸量(图中3条曲线分别为刀具悬伸量 $40、55、70\text{mm}$)。

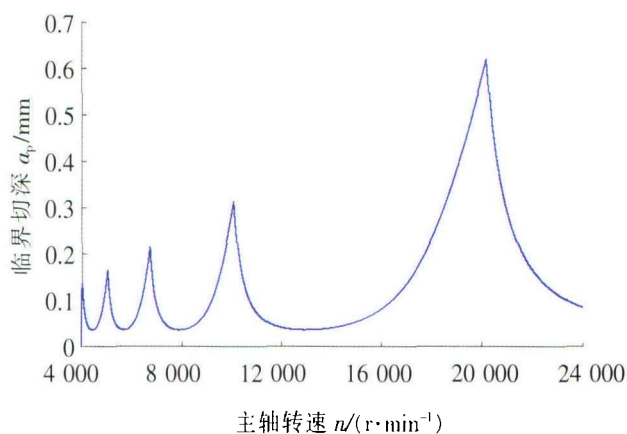


图4 颤振稳定域仿真曲线

Fig.4 Simulation curve of chatter stability lobes

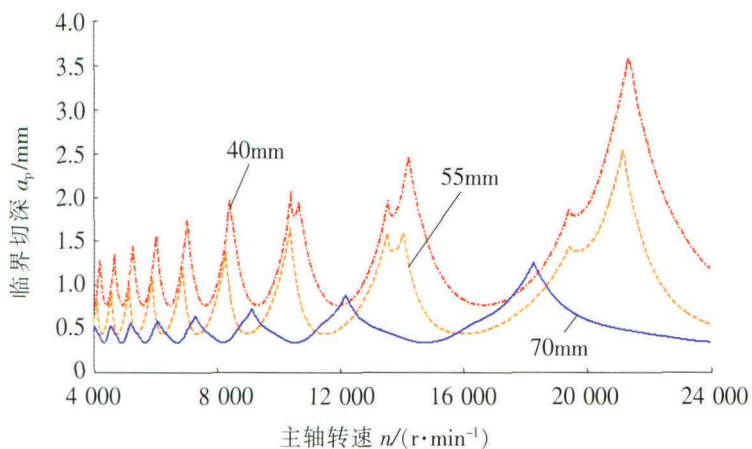


图5 刀具不同悬伸量对颤振稳定域的影响

Fig.5 Effect of different overhang of cutter on chatter stability lobes

3 薄壁件加工试验与讨论分析

试验加工的工件壁厚很薄,仅为 1mm ,壁高达 30mm ,采用小的切削参数($a_r=0.2\text{mm}, a_p=0.5\text{mm}, f=10\ 000\text{mm}/\text{min}, n=18\ 000\text{r}/\text{min}$)进行加工时,也难以避免发生颤振(见图6a),但颤纹局限在薄壁的中部部位的靠上



(a)采用小切削参数



(b)采用大切削参数

图6 用不同切削参数加工的工件表面

Fig.6 Surfaces of workpiece machined by using different cutting parameters

部位置,即工件刚性最弱的部位,而工件薄壁的下部位置却未发生颤振,表面光滑;最初采用的切削参数很大($a_r=20\text{mm}, a_p=2\text{mm}, f=10\ 000\text{mm}/\text{min}, n=18\ 000\text{r}/\text{min}$),不可避免地发生颤振(图6b),颤纹已经不仅仅局限在薄壁各边外侧的中间靠上部位的较小面积,而几乎遍布在除了拐角外的整个外侧壁板表面。

根据有限元分析和试验测试结果分析,在同一组切削条件下,工件各薄壁中间位置上部发生颤振,而下部和其他位置未发生颤振,原因在于工件薄壁上部的刚性比下部弱,中间比两侧弱。通过建立一个简化的工件局部模型(见图7a)对这种现象进行分析,此模型可以看作细长的悬臂梁或板,由悬臂梁理论可知上部刚性最弱,而越靠近根部刚性越好,越不易被激

振。铣刀作用在工件上时,其瞬时铣削力相当于外部激励,同时激励“机床-刀具”和“机床-工件”系统。当铣刀加工薄壁上部时(见图7b),相当于给这个悬臂梁的头部一个激励,由于头部的刚性极弱,工件被激振起来,加工发生颤振;而接近根部的部位(见图7c),

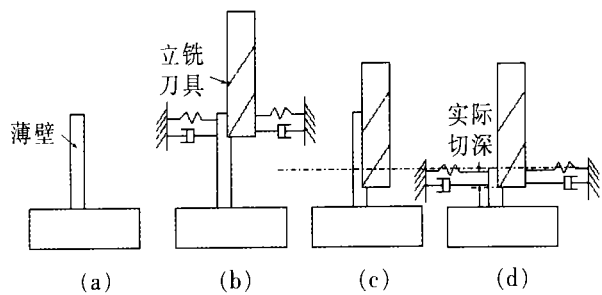


图7 薄壁零件加工示意图

Fig.7 Machining process of thin-wall part

由于其刚性高,不易被激振,相当于对图7d所示工件进行加工,悬长变短,其工件刚性必定要高,而刀具作用在工件的实际作用点在刀具切削工件的位置,即实际切深所示位置,因此,没有发生颤振。从稳定域角度分析,随着刀具从工件壁顶部向下加工,实际刀具工件相互作用位置的刚性不断增加,使得稳定切深变大,从而使采用的切削参数由在稳定域曲线之外变成在稳定域之内,从而由原来的颤振切削转变为稳定切削。

从动力学角度分析上述现象,不难发现,如果能够在整个工件的加工过程中采取某种加工方法,使“机床-工件”系统具有较高的刚性(高于或接近“机床-刀具”系统的刚性),就可以采用基于“机床-刀具”系统的动态特性计算得到的颤振稳定域内的切削参数进行无颤振加工,获取高质量的加工表面。

既然铝合金薄壁结构工件的整体刚性已经无法获得明显的改善,只好采用其他方法改善加工系统加工时与刀具接触的工件位置的局部刚性。可以设想,如果能使“机床-工件”系统加工时与刀具接触的工件局部位置的刚性高于或接近“机床-刀具”系统刚性,那么就可以仅在基于“机床-刀具”系统的动态特性计算得到的颤振稳定域内选取切削参数。

4 新的加工工艺方法与试验验证

针对弱刚性薄壁件铣削加工,本文提出了保持工艺系统高刚性的加工过程工艺优化与铣削加工动力学仿真结合的综合优化方法进行薄壁结构件无颤振高效加工。

原有加工工艺过程是,采用满刀进行铣削加工,先铣完左腔后再铣右腔,铣完右腔后,采用槽铣进行外壁铣削。加工结果(见图6)显示:在中间筋板和壁板外侧发生了严重的颤振,加工表面存在振纹。振纹的产生是由于铣削筋板和外壁时,采用的切削参数处

于稳定域以外(工件实际加工参数: $a_c=20\text{mm}$, $a_p=2\text{mm}$, $f=10\ 000\text{mm/min}$, $n=18\ 000\text{r/min}$),如图5所示。考虑工件动态特性的颤振稳定域结果显示:稳定切深远低于实际加工中采用的切深 $a_p=2\text{mm}$,处于不稳定切削状态,即使采用很小的切削用量也很难避免颤振,仍然会发生小的局部颤振(见图6)。

为此,改变原有加工工艺,基于“机床-刀具”系统动态特性计算的颤振稳定域曲线和切削力仿真结果优化选取更效率的切削参数(切削参数: $a_c=20\text{mm}$, $a_p=4\text{mm}$, $f=10\ 000\text{mm/min}$, $n=21\ 000\text{r/min}$),见图3;采用“层优先”的层层切削的加工工艺方法,见图8;合理地安排走刀轨迹,在每一层加工时由腔体中间开始铣削,由内向外,见图9。

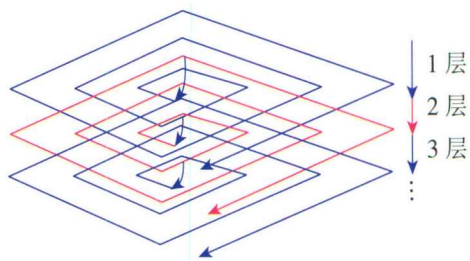


图8 分层加工示意图

Fig.8 Diagram of step machining process

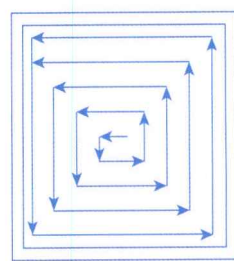


图9 选定的加工轨迹示意图

Fig.9 Diagram of selected machining tool path

为保证切削时薄壁工件的接触区具有较大的刚性,加工到壁厚为 1.5mm 时即止,壁厚余量为 0.5mm ,然后采用同样的切深、进给速度、主轴转速切除 0.5mm 余量,见图10。这样可以保证刀具每次加工薄壁时均对薄壁的根部进行加工,可以看作刀具仅对悬臂梁的根部位置激振,此时形成的“机床-刀具-工件”系统的刚性比图7a、图7b所示形成的加工系统高得多,因此,本法保证与刀具接触的工件部分具有高刚性,基本可以视刀具接触的工件的局部位置为刚性。在此基础上,可采用基于“机床-刀具”系统的动态特

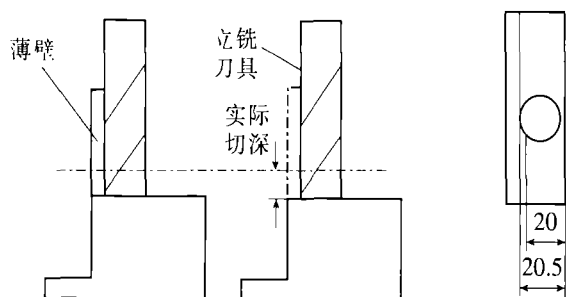


图 10 加工工艺优化后的加工示意图
Fig.10 Surface of workpiece machined after process optimization

性计算得到的颤振稳定域内较高效率的切削参数进行无颤振加工。在选取切削余量时,应考虑切削力引起的刀具和工件的变形,避免出现“让刀”现象,使加工精度下降。

综上所述,应先进行切削力的仿真,然后将其施加在加工部位进行局部变形分析,再进行切削余量的优化选取,对加工变形进行控制。

通过优化选取的加工工艺参数和走刀方式提高了加工效率和加工表面质量,见图 11,被加工工件表面光滑,无颤纹,精度符合制造技术要求。



图 11 加工工艺优化后的加工工件表面
Fig.11 Surface of workpiece machined after process optimization

5 结论

通过上述试验与仿真分析,可以得出如下结论:在铣削薄壁工件时,选择合理的加工工序和走刀轨迹,保持工艺系统高刚性的加工过程工艺优化,并采用与铣削加工动力学仿真相结合的优化的方法,是解决铝合金薄壁件的铣削颤振问题并实现高速切削的有效方法。在实际的航空铝合金薄壁结构工件高效数控加工中,这一加工工艺方法研究成果在某工厂

中得到了应用验证,并开始逐步推广。

参 考 文 献

- [1] 李沪曾,王逸,张冲,等. 薄壁整体结构件的高速铣削. 同济大学学报(自然科学版),2007,4:552-525.
- [2] 汪通悦,何宁,李亮. 薄壁零件铣削加工的振动模型. 机械工程学报,2007,8:22-25.
- [3] Svetan Ratchev, Evan Govender, Stan Nikov, et al. Force and deflection modelling in milling of low-rigidity complex parts. Journal of Materials Processing Technology, 2003: 143-144, 796-801.
- [4] Mane, Gagnol V, Bouzgarrou B C, et al. Stability-based spindle speed control during flexible workpiece high-speed milling, 2007. 5:184-194.
- [5] Wan M, Zhang W H, Tan G, et al. Systematic simulation procedure of peripheral milling process of thin-walled workpiece. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 6:109-114.
- [6] 郑联语,汪叔淳. 薄壁零件数控加工工艺质量改进方法. 航空学报,2001,05:424-428.
- [7] 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. 浙江大学学报,2004,1:17-20.
- [8] 武凯,何宁,廖文和,等. 薄壁腹板加工变形规律及其变形控制方案的研究. 中国机械工程,2004,670-674.
- [9] 董辉跃,柯映林,杨慧香. 薄壁板高速铣削加工过程中的让刀误差预测. 浙江大学学报,2006,4:634-637.
- [10] Altintas Y. Manufacturing automation-metal cutting mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [11] Armarego E J A, Whitfield R C. Computer based modeling of popular machining operations for force and power predictions. Annals of the CIRP, 1985, 34(3): 65-69.
- [12] Weinert K, Enselmann A, Friedhoff J. Milling Simulation for manufacturing. Annals of the CIRP, 1997, 46 (1): 325-328.
- [13] 尹力,刘强. 基于加工过程动力学仿真的 CNC 机床工艺参数选择与应用研究. 制造技术与机床,2004,6:87-90.
- [14] 刘强,尹力. 一种面向数控工艺参数优化的铣削过程动力学仿真系统研究. 中国机械工程,2005,13:1146-1149.
- [15] 金晓亮,刘强,袁松梅. 基于虚拟仪器的数控机床动态特性测试与分析系统研究. 制造技术与机床,2007,6:83-86.
- [16] 李德葆,陆秋海. 实验模态分析及其应用. 北京:科学出版社,2001.
- [17] Altintas Y, Shamoto E, Lee P. Analytical prediction of stability lobes in ball end milling. ASME of Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1999, 121: 586-592.

(责编 德然 溪蓝)