

薄壁件铣削加工动力学研究的现状*

Present Situation of Thin-Walled Part Milling Dynamics Research

沈阳理工大学机械工程学院 谭瑞亮 王 凡 姜增辉

[摘要] 加工变形和铣削振动是影响薄壁件加工精度和质量的主要因素,合理的试验方法的设计、动力学模型的建立和仿真非常重要,为了深入研究薄壁件铣削加工的动力学,目前研究内容主要包括:薄壁件铣削动力学的实验方法、铣削动力学模型的建立和薄壁件铣削动力学模型的仿真与优化方法。

关键词: 加工变形 铣削振动 动力学模型 仿真与优化

[ABSTRACT] Machining deformation and milling vibration is the main factors that affect the machining accuracy and quality of thin-walled parts, the reasonable design of experiment method, dynamic model established and the simulation is very important, in order to deepen the research of thin-walled parts milling dynamics, the present situation of the research mainly includes: thin-walled milling kinetics experiment method, the establishment of dynamic model, simulation and optimization method of the thin-walled milling dynamics model.

Keywords: Machining deformation Milling vibration Dynamical model Simulation and optimization

薄壁件由于具有重量轻、强度高等诸多优点,已经在模具、航空航天等多个领域得到广泛的应用,但薄壁件结构复杂、刚度相对较低、加工余量很大等特点,在铣削加工中极易产生变形和振动,使得薄壁件的加工效率和加工精度降低,达不到工件的质量要求。可见,工件的加工变形和铣削振动问题已成为影响薄壁件加工质量的主要因素^[1]。因此对薄壁件铣削加工的动力学研究就非常有必要。目前对薄壁件铣削加工动力学的研究主要包括:薄壁件铣削动力学试验的研究、薄壁件铣削动力学模型的研究及薄壁件铣削动力学的仿真与优化。

1 薄壁件铣削动力学试验的研究现状

铣削加工过程中,薄壁件在铣削力的作用下极易发

生加工变形与铣削振动,加工精度与表面质量很难保证,并影响刀具乃至机床的使用寿命。铣削力是影响工件加工精度和表面质量的主要因素,故通过试验对薄壁件的铣削力的预测是非常重要的。主要的试验方法包括小波分析法、正交设计方法、单因素试验法。

1.1 小波分析法

小波分析法是近 10 年发展起来的信号处理的有力工具,在铣削力分析研究中有着良好的应用前景。

铣削力是铣削过程中重要的物理参数之一。铣削力的大小不仅决定了铣削过程中所消耗的功率,而且还直接影响铣削热的产生,铣削热影响铣削温度,铣削温度引起刀具的磨损或破损,最终影响刀具的使用寿命。铣削力的动态成分与铣削振动之间有着紧密的联系,它反映了刀具和工件之间的相对运动,而且铣削力的动态成分受外界干扰较小,因此采用铣削力中的动态成分来进行铣削颤振的预报识别具有广泛的发展前景^[2]。

石莉等^[3]在研究动态铣削力及预报铣削颤振的过程中,利用小波分析进行数据处理,分析研究铣削力信号的分解与重构,根据铣削力的主要频率,得到不同频带重构的动态铣削力信号,通过分析重构后的动态铣削力信号,发现产生铣削颤振,并依据动态铣削力信号概率密度的变化预报颤振原则证明铣削过程产生了铣削颤振现象,因而可以利用动态铣削力的变化初步预报铣削颤振。

1.2 正交设计方法

正交设计是试验优化的一种常用技术。它是建立在概率论、数量统计和实践经验的基础上,运用标准化正交表安排试验方案,并对结果进行计算分析,从而快速找到最优试验方案的一种设计方法^[4]。

正交设计方法大大减少了试验次数,提高了工作效率。正交设计使用上按表格安排试验,比较方便,其布点均衡,试验次数减少,能保证主要因素的各种可能都不会漏掉。正交设计方法还能提供一种分析结果的方法,结果直观容易分析,且每个试验水平都重复相同次数,可以消除部分试验误差的干扰,因其具有正交性,易于分析出各因素的主效应。但其也有缺点,它提供的数据分析方法所获得的优选值,只能是试验所用水平的某

* 国家科技重大专项(2012ZX04003-061)资助。

种组合,优选结果不会超越所取水平的范围;另外,也不能给进一步的试验提供明确的指向性,使试验仍然带很强的摸索性色彩,不很精确。这样,正交试验法用在初步筛选时显得收敛速度缓慢,难于确定数据变化规律,增加试验次数。尤其在试验工作烦琐、费用昂贵的情况更突出^[5]。

东北大学的李跃^[6]在薄壁件的高速铣削加工试验中,以 TH5650 型立式铣镗加工中心为主要试验设备,采用多因素正交设计法加工同一壁厚薄壁件,通过测量加工后工件的尺寸精度、位置精度和表面粗糙度等指标,得出不同因素对指标的影响,因素影响指标的主次以及因素的最佳搭配。

1.3 单因素试验法

单因素试验法是指保持参加试验过程的其他几个因素及其水平不变,考察某一个因素的水平变动对试验结果的影响^[7]。

在薄壁件的铣削过程中,用单因素试验法可以很清晰地得到某个因素对薄壁件的影响规律,但是有时这种方法得到的结果有点片面,不能准确的反应某一因素对薄壁件的影响。

南京航空航天大学李亮^[8]在薄壁件的铣削试验过程中,采用单因素试验法研究了不同的铣削参数对振动的影响规律,找到了抑制加工振动的最优化铣削参数。薄壁件铣削加工过程中铣削参数选择的不同对工件加工振动的影响也不一样,综合考虑影响工件振动的因素。对铣削参数进行不同的试验组合,可清晰的发现每一个铣削用量对加工振动的影响,结合力和频谱分析可以找到抑制薄壁件铣削振动的合理的铣削参数。

2 薄壁件铣削动力学模型的研究现状

建立相应特性的模型是研究铣削加工过程动力学特性最有力的手段,研究铣削力的前提就是建立铣削力模型,铣削力模型是通过建立刀具—工件的材料参数、刀具的几何参数以及铣削加工参数和铣削力之间的关系,为研究铣削过程中铣削力的变化情况和解决铣削过程的相关问题提供了研究的基础,铣削力的建模需要考虑刀具和工件复杂的几何特征以及铣削过程中的加工参数,是一个复杂的过程^[9]。

北京工业大学的谢春柳等^[10]分析了刀具和工件的子系统动态特性对铣削稳定性的影响。建立了一个新的铣削动力学模型,并借助 MATLAB/Simulink 软件开发了一个仿真模型,并发现通过改变刀具子系统和工件子系统刚度的相互关系可以起到抑制颤振的目的。Ozturk 等人针对球头铣刀加工自由曲面提出了用于计算刀具—工件啮合区的解析模型,由于模型采用解析方法而

非常规的离散化处理和布尔运算方法,故其计算速度快、精度高^[11]。

2.1 建立动力学模型的方法

铣削过程动力学建模是指在给定的铣削条件下对加工过程中的铣削力进行预测。要对铣削加工的稳定性进行准确地预测,建立准确的面向铣削过程的动力学模型是十分必要的。有关铣削过程建模的方法包括经验法、解析法、有限元法、力学方法^[12]。

2.2 动力学模型的类型

铣削力是研究铣削加工过程的重要因素,因此对铣削力数学模型的建立显得尤为重要。因此建立适当的动力学模型是很关键的。在铣削加工中,铣削力学模型通常依据铣刀形状与参数不同,可以建立不同的铣削力模型,包括球头铣刀建模、端面铣刀建模、圆柱螺旋铣刀建模和圆锥型铣刀建模等^[13]。下面主要对球头铣刀的模型进行详细的介绍。

在铣削力建模中,Altintas 建立的瞬时刚性力模型的应用和研究较为广泛,它的离散化处理的思路使得该模型在刀具瞬时铣削力仿真方面有相当高的精度和实用性,目前针对此类模型的研究也较为成熟。首先将刀刃划分为足够多的微元,每个微元可简化为直刃,建立适合球头铣刀加工的微元铣削力模型如下式:

$$\begin{cases} dF_t(\theta, z) = K_{te}dS + K_{tn}t_n(\theta, \varphi, k)db \\ dF_r(\theta, z) = K_{re}dS + K_{rn}t_n(\theta, \varphi, k)db \\ dF_a(\theta, z) = K_{ae}dS + K_{an}t_n(\theta, \varphi, k)db \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $dF_t(\theta, z)$ 、 $dF_r(\theta, z)$ 和 $dF_a(\theta, z)$ 分别为切向力、径向力和轴向力微元。 K_{te} 、 K_{re} 和 K_{ae} 分别为微元的切向、径向、轴向的剪切力系数; K_{tn} 、 K_{rn} 和 K_{an} 分别为微元的切向、径向、轴向的犁耕力系数。

微分刀刃之长度 dS :

$$dS = \|dr\| = \sqrt{R'(\varphi)^2 + R^2(\varphi) + R_0^2 \cot^2 \beta_0 d\varphi} \quad (2)$$

而与刀刃方向相垂直的切屑厚度 $t_n(\theta, \varphi, k)$:

$$t_n(\theta, \varphi, k) = f_z \cdot \sin(\varphi) \sin(k), \quad (3)$$

式中, f_z 为刀具进给率。

$$db = \frac{dz}{\sin k} \quad (4)$$

X、Y、Z 3 个方向的全域微分铣削力如下式:

$$\begin{cases} dF_x = -dF_t \cos(\varphi) - dF_r \sin(k) \sin(\varphi) - dF_a \cos(k) \sin(\varphi) \\ dF_y = dF_t \sin(\varphi) - dF_r \sin(k) \cos(\varphi) - dF_a \cos(k) \cos(\varphi) \\ dF_z = dF_r \cos(k) - dF_a \sin(k) \end{cases} \quad (5)$$

2.3 建立动力学模型的原则

研究薄壁件铣削的稳定性,就必须对薄壁件铣削系统进行动力学分析。要进行系统精确的动力学分析是

十分困难的,因而,必须对实际铣削系统进行简化和抽象,以方便进行力学描述和数学表示。在建立铣削系统动力学模型时应遵循如下原则^[14]:

(1)连续系统的离散化。实际的铣削过程是连续进行的,因而铣削中的各种物理参数如质量、刚度和阻尼,都具有连续分布的特性。描述连续弹性体的动力学方程是偏微分方程,求解困难。为此,应将连续系统离散化,简化为离散系统。离散系统只有有限个自由度,描述其运动的动力学方程为常微分方程,求解较为容易。

(2)非线性系统的线性化。多自由度系统微幅振动的微分方程是线性微分方程,其中的惯性力、阻尼力和弹性恢复力分别与加速度、速度和变形成正比。线性微分方程的求解比较容易,其分析也已经成熟。实际的铣削过程为非线性系统,非线性微分方程的求解比较复杂,在建立系统数学模型时,忽略掉非线性因素,将非线性系统简化为线性系统。

(3)抓主要因素,忽略次要因素。影响铣削系统动力学特性的因素很多,若把所有因素都考虑进去,会使问题变得极为复杂且无必要。建立模型时,应区别影响因素的主次,抓住主要因素,忽略次要因素。

3 薄壁件铣削动力学的仿真与优化

近几年来,对铣削动力学的研究取得了相当可观的成果,基本形成了一套比较成熟的理论。在考虑了多种非线性因素的前提下,能够建立一个比较完善的可以预报铣削振动产生的动力学模型。计算机仿真技术在研究铣削振动中的应用也趋于成熟。通过铣削动力学建模仿真的方法能得出铣削振动曲线的走向、稳定性极限铣削深度数值,分析出振动频率成分、振幅大小及其变化情况,并能得到刀具的振动位移输出等,为动力学特性分析提供了重要依据。而且目前针对铣削动力学也有了相关微机通用仿真软件开发出来^[15]。常用的动力学仿真软件有: ABAQUS、ANSYS、DEFORM 等,下面主要对 ABAQUS、ANSYS 进行详细的介绍。

3.1 ABAQUS 仿真软件

ABAQUS 是一套功能强大的工程模拟的有限元软件,其解决问题的范围从相对简单的线性分析到许多复杂的非线性问题。从薄壁件的铣削加工动力学来说,因为动态铣削力对薄壁件的加工有很大的影响,故可以通过对薄壁件的铣削仿真对其动态铣削力进行分析,得到理论上动态铣削力的变化规律,在实际加工过程中,可以根据其变化规律采取相应的措施来减小薄壁件的变形和振动,从而提高薄壁件的加工精度和表面质量。

沈阳航空航天大学的于金等^[16]在考虑工件材料性能参数基础上,利用 ABAQUS 仿真软件,研究了航空铝

合金薄壁件铣削过程中铣削力的变化规律。其薄壁件的加工仿真如图 1 所示。

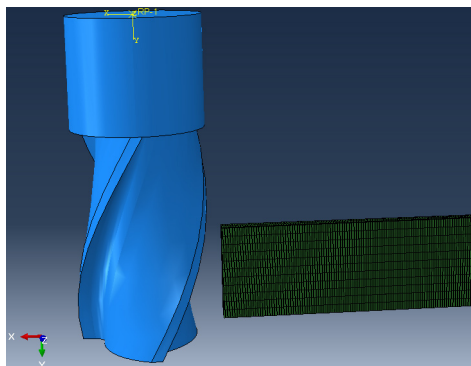


图1 薄壁件的加工仿真

Fig.1 Thin-walled part processing and simulation

3.2 ANSYS 仿真软件

动力学上对薄壁件进行模态分析和谐响应分析是非常重要的,模态是机械结构的固有振动属性,结构的动力特性主要取决于它的模态参数,包括各阶固有频率、阻尼系数、振型系数等。是研究结构动力特性的一种主要方法,是系统辨别方法在工程振动领域中的应用,最终目的就是为确定结构的动力特性,以得到该结构一系列的振型(图 2)和对应各个振型的频率,以分析结构系统的振动特性、诊断系统的振动故障以及对系统的动力特性进行设计优化^[17-18]。

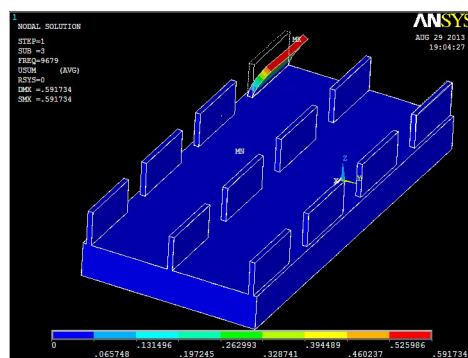


图2 薄壁件的振型图

Fig.2 Thin-walled part model graph

谐响应分析是用于确定线性结构在承受随时间按正弦规律变化的载荷时的稳态响应的一种技术。分析的目的在于计算出结构在几种频率下的响应,并得到一些响应值(位移)与频率的曲线,使能预测结构的持续动力特性(固有频率和相应的模态与振型),从而能够验证其设计能否成功地克服共振、疲劳及其他受迫振动引起的有害效果。通过对薄壁零件进行谐响应分析,得出其在周期性激励下的振动幅值响应,对于预测薄壁件高速铣削状态下是否发生共振提供了理论依据^[6]。对于振动

对薄壁件加工变形的影响,利用有限元软件 ANSYS 对薄壁工件进行了谐响应分析,确定出其受迫振动的频率范围,从而在加工时避开这个频率范围生产出合格的工件。

东北大学的李跃^[6]用 ANSYS 仿真软件对薄壁件进行了模态分析和谐响应分析,得到了薄壁件的固有频率、振型(见图 2)和振动幅值响应,这对薄壁件的生产加工具有非常重要的作用。

3.3 开发动力学仿真优化平台

(1) MATLAB-GUIDE 仿真优化系统。

该系统是以 MATLAB-GUIDE 为软件开发的平台,可以快速、有效地预测铣削加工过程中刀具的瞬时铣削力、主轴功率、主轴转矩等物理量,预测加工表面的形貌与刀具的振动情况。同时,借助于试验模态分析结果,可以准确地计算出整个系统的稳定铣削区域,为数控机床工艺参数的合理、有效选择提供了有益的指导和理论依据^[19]。该系统弥补了当前大多数 CAD/CAM 仿真软件在动力学仿真和工艺参数优化等功能上的不足,显示出了特有的应用优势。同时作为铣削过程动力学仿真技术研究和应用的一个平台,该系统对于进一步提高我国数控加工工艺水平和相关技术的研究也具有十分重要的理论意义和实际应用价值。

(2) SIMUCUT-CUTPRO 仿真优化系统。

此系统可以进行动力学仿真与优化,获得优化的铣削参数,可对包括铣削力、扭矩、功率、动态变形量和颤振等在内的铣削加工过程物理量和物理现象进行预测,并将颤振稳定域作为一个重要的约束条件引入到加工参数优化求解中,使用优化的铣削参数进行加工,能有效地消除颤振和因加工变形引起的局部超差,提高加工效率^[20]。

北京航空航天大学的李忠群^[20]使用 CUTPRO 软件的镶齿刀模型来对 T 型槽铣削中的静力学和动力学进行了仿真,并且对铣削过程中的切削力、振动、表面粗糙度和稳定性叶瓣图进行了预测,这对提高工件的加工精度和表面质量具有很重要的意义。

4 结束语

在薄壁件的铣削加工过程中,产生的加工变形和铣削振动对薄壁件的加工精度和表面质量有很大的影响,所以在铣削加工中,选择合理的试验方法是非常重要的,要根据零件的结构综合考虑,采取相应的措施来减小加工变形和抑制振动,从而提高工件的加工精度和表面质量。建立合适的动态铣削力模型,选择恰当的仿真软件对模型进行仿真,有时需要根据不同情况,用一个或多个仿真软件同时对模型进行仿真与优化。通过对

薄壁件动态铣削力和位移等的准确预测,在实际加工中可以采取相应的控制措施来提高零件的加工精度降低零件表面粗糙度,从而提高零件的加工效率,降低生产成本。

参 考 文 献

- [1] 邢鹏鸾.关于薄壁零件的铣削加工技术.技术应用,2012(8):169-170.
- [2] 马秀红,曹继平.小波分析及其应用.微机发展,2003,13(8):93.
- [3] 石莉,贾春德,孙玉龙.应用小波研究动态铣削力及预报铣削颤振.哈尔滨工业大学学报,2006,38(10):1778.
- [4] 刘瑞江,张业旺,闻崇伟,等.正交实验设计和分析方法研究.实验技术与管理,2010,27(9):52-56.
- [5] 程敬丽,郑敏,楼建晴.常见的实验优化设计方法对比.实验室研究与探索,2012,31(7):8-9.
- [6] 李跃.薄壁零件高速铣削工艺与仿真研究[D].沈阳:东北大学,2008.
- [7] 苏永生.铣削 Cr12 的动态铣削力实验研究[D].天津:天津理工大学,2010.
- [8] 李亮.薄壁零件的加工振动分析与加工工艺研究[D].南京:南京航空航天大学,2005.
- [9] 张学中.数控铣削过程铣削力建模及仿真系统研发[D].天津:河北工业大学,2010.
- [10] 谢春柳,王民,费仁元,等.刀具和工件的子系统动态特性对铣削稳定性的影响.现代制造工程,2005(5):11-13.
- [11] Ozturk B, Lazoglu I. Machining of free-form surfaces part I: analytical chip load. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(7-8): 728-735.
- [12] 马帅.薄壁件周铣表面质量影响因素的研究[D].沈阳:东北大学,2009.
- [13] 吴琼,张以都,张洪伟,等.航空薄壁件铣削加工动态特性与实验分析.兵工学报,2008(9):1118-1119.
- [14] 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.
- [15] 李沪曾,于信汇,吕清强.切削振动计算机仿真的数值方法.同济大学学报,2001,29(5):551-556.
- [16] 于金,杨贵武.航空薄壁件铣削力有限元分析.机床与液压,2011,39(21):136-137.
- [17] 管迪华.模态分析技术.北京:清华大学出版社,1995.
- [18] 汴本文,焦群英.机械振动与模态分析基础.北京:机械工业出版社,1998.
- [19] 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,2005,16(13):1146-1149.
- [20] 李忠群.复杂切削条件高速铣削加工动力学建模、仿真与切削参数优化研究[D].北京:北京航空航天大学,2008.

(责编 小城)