

铣削加工过程动力学建模、 仿真研究现状与展望*

李忠群¹,石晓芳¹,党剑涛¹,李文²

(1. 湖南工业大学机械工程学院, 株洲 412007;

2. 中国航发南方航空工业有限公司, 株洲 412002)

[摘要] 对铣削加工过程参数进行准确预测,对于实现无颤振高效铣削至关重要。对铣削加工过程动力学建模方法与原理、仿真算法与工程应用等进行了综述。首先,将切削过程建模方法归纳为经验法、解析法、有限元法及力学方法4类,并分析了其各自特点。其次,详细介绍了静态切削力建模与动态切削力建模,并给出了其各自的应用场合。再次,对几种典型铣削加工稳定性分析方法的实现原理、优缺点和应用场合进行了对比,为采用合适的稳定性分析方法提供了理论依据。最后,介绍了铣削加工表面形貌预测常用的两种方法。上述分析得出的结论可为该领域深入研究与工程化应用提供理论指导。

关键词: 铣削过程;动力学仿真;切削力;表面形貌;颤振稳定性

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.16.016



李忠群

博士、教授,主要研究方向为切削工艺与装备、数字化制造及机械动力学等。主持完成国家自然科学基金、国家科技重大专项子课题、湖南省自科重点项目等,发表论文60余篇,SCI收录10篇,软件著作权4项,出版专著1部,获航空科学技术奖一等奖、三等奖各1项。

由于具有切削力小、切削温度低、加工变形小、加工效率高等诸多优点,铣削被广泛应用于航空、航天、模具、汽车、轨道交通等行业。制约铣削加工质量与效率的两大因素分别是切削力与切削颤振。前者不仅直接决定零件的加工精度和刀具、机床的使用寿命,也是进行切削变形、切削稳定性及表面形貌预测的基础。后者是指发生在切削过程中的一种自激振动现象,它会严重制约切削加工效率、降低零件加工精度、损害刀具和机床主轴轴承。在影响切削力及切削稳定性的诸多因素中,切削参数的选择与优化由于不需要额外的设备投入,不涉及管理与人为因素,任何企业都可以直接采用。因此,在铣削过程动力学建模、仿真

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51375160)。

技术基础上,通过铣削参数优化实现高速、高效切削具有显著的现实意义。

切削过程建模

所谓切削过程建模,是指通过构建物理或数学模型,实现对某种切削条件下的切削过程参数进行预测的过程。鉴于切削加工过程的复杂性和非线性特点,要对切削过程参数进行精确预测存在很大困难。目前,有关切削过程建模的主要方法可归纳为以下几种:

(1) 经验法: 改变切削用量进行切削试验,测量切削力、表面形貌、刀具磨损量等物理指标,进而在这些指标与切削参数、刀具几何角度等切削条件之间建立某种经验公式^[1-2]。该方法实用性很强,但也存在显著不足:一方面需要大量切削

试验支撑,另一方面经验公式的适用范围受限。

(2)解析法:通过适当的假设与简化,基于切削机理用解析方法建立切削过程参数的预测模型,实现对切削力、切削稳定性等的预测。解析法是深入研究切削过程本质的基础,典型的解析模型有 Merchant 的正交切削模型^[3]和 Oxley 的斜角切削模型^[4]。

(3)有限元法:有限元建模方法主要有拉格朗日模型和欧拉模型两种,前者适用于弹性材料,后者适用于塑性材料。目前,利用商用有限元分析软件,如 Marc、Deform 和 Abaqus 等,可较方便地进行切削加工过程仿真,其应用范围非常广泛。

(4)机械法:切削力机械模型认为切削力与切屑面积成正比,比例系数取决于刀具与工件材料特性^[5]。通过对经典机械模型进行拓展,考虑刀具变形及刀具偏心的影响,可实现铣削静态切削力预测^[6];在切削力预测时考虑机床-刀具机构的多振动模态,可实现动态切削力的预测^[7]。

切削力建模

1 静态切削力建模

静态切削力建模是指假设工艺系统为刚性的前提下,对切削过程中的切削力和表面形貌等物理量进行预测。当工艺系统刚性较好时,静态切削力模型可以获得较好的预测精度。

切削力机械模型认为切削是由单个或多个切削刃微元共同参与完成的,可根据瞬时刚性力模型由微元的切屑面积及材料的切削力系数计算单个微元上的切削力,进而通过力的分解与合成得到总的瞬时静态切削力。

获取刀具/工件材料的切削力系数是进行切削力预测的前提。目前,获取切削力系数主要有以下两种途径:

(1)正交切削到斜角切削转换

模型。

正交切削到斜角切削转换模型的表达式为^[7]:

$$\left. \begin{aligned} K_{tc} &= \frac{\tau}{\sin \phi_n} \times \frac{\cos(\beta_n - \alpha_n) + \tan \eta_c \sin \beta_n \tan \beta}{\sqrt{\cos^2(\phi_n + \beta_n - \alpha_n) + \tan^2 \eta_c \sin^2 \beta_n}} \\ K_{rc} &= \frac{\tau}{\sin \phi_n \cos \beta} \times \frac{\sin(\beta_n - \alpha_n)}{\sqrt{\cos^2(\phi_n + \beta_n - \alpha_n) + \tan^2 \eta_c \sin^2 \beta_n}} \\ K_{ac} &= \frac{\tau}{\sin \phi_n} \times \frac{\cos(\beta_n - \alpha_n) \tan \beta - \tan \eta_c \sin \beta_n}{\sqrt{\cos^2(\phi_n + \beta_n - \alpha_n) + \tan^2 \eta_c \sin^2 \beta_n}} \end{aligned} \right\} (1)$$

式中, K_{tc} 、 K_{rc} 、 K_{ac} 分别为切向、径向和轴向切削力系数; τ 为剪切应力; ϕ_n 为剪切角; α_n 为法向前角; β_n 为材料摩擦角; η_c 为切屑流动角; β 为铣刀螺旋角。

(2)快速标定斜角铣削切削力系数的试验方法。

该方法由 Budak 等^[8]提出,在保持径向切深与轴向切深不变的前提下,通过改变进给速度进行试验,测量不同进给速度下每刀齿周期的平均切削力,进而获得工件材料的切削力系数。为消除刀具偏心对测量结果的影响,可测量主轴每转的总切削力,再除以刀齿数。为简化计算,选用槽铣来标定切削力系数,待测试的 3 向平均切削力可表示为:

$$\left. \begin{aligned} \bar{F}_x &= -\frac{Na_p}{4} K_{rc} f_t - \frac{Na_p}{\pi} K_{rc} \\ \bar{F}_y &= +\frac{Na_p}{4} K_{tc} f_t + \frac{Na_p}{\pi} K_{tc} \\ \bar{F}_z &= +\frac{Na_p}{\pi} K_{ac} f_t + \frac{Na_p}{2} K_{ac} \end{aligned} \right\} (2)$$

式中, N 为刀齿数; a_p 为轴向切深; f_t 为每齿进给量; K_{rc} 、 K_{tc} 、 K_{ac} 分别为刃口力系数。利用式(2)可得到不同进给量 f_t 下的平均切削力,利用最小二乘线性回归分析方法就能得到工件材料的铣削力系数。该试验标定

方法可以重复应用于各种几何形状的铣刀,也可以用于新型铣刀的铣削力模型系数测定。

2 动态切削力建模

若铣削系统为弱刚性机床-刀具系统或/和弱刚性机床-工件系统时,在切削力的作用下,刀具或/和工件会发现较大变形,理论切屑厚度与实际切屑厚度会存在差异,静态切削力模型很难对真实的切削情况做出正确的反映。因此,切削力模型中必须考虑由切削力所引起的切屑厚度的动态变化。

如图 1 所示,可将铣削系统简化为两相互垂直方向(x 、 y)上的二自由度系统,其微分方程可表示为^[8]:

$$\left\{ \begin{aligned} m_x \ddot{x} + c_x \dot{x} + k_x x &= \sum_{j=1}^N F_{xj} = F_x(t) \\ m_y \ddot{y} + c_y \dot{y} + k_y y &= \sum_{j=1}^N F_{yj} = F_y(t) \end{aligned} \right. (3)$$

式中, m 、 c 、 k 分别为机床-刀具系统的质量、阻尼和刚度, F 为作用于刀具上的切削力, N 为刀齿数。

考虑到铣削过程的再生作用,动态切屑厚度可表示为:

$$h(\phi_j) = f_t \sin \phi_j + (u_{jc}^0 - u_{jc}) - (u_{jw}^0 - u_{jw}) (4)$$

式中, u_j 、 u_j^0 分别为当前刀齿与前一个刀齿产生的动态位移; c 表示刀具; w 表示工件; ϕ_j 为刀齿 j 的转角。参考静态切削力建模原理,考虑振动引起的切屑厚度变化,经过必要的

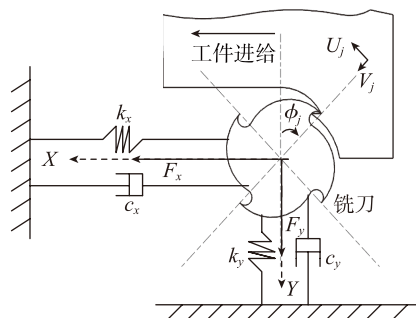


图1 铣削系统简化模型

Fig.1 Dynamic model of milling system

简化处理,可得到动态切削力计算公式为:

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} a_p K_{tc} \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} \\ a_{yx} & a_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式中,方向系数可表示为:

$$\begin{aligned} a_{xx} &= -\sum_{j=1}^N (\sin 2\phi_j + K_r (1 - \cos 2\phi_j)) \\ a_{xy} &= -\sum_{j=1}^N ((1 + \cos 2\phi_j) + K_r \sin 2\phi_j) \\ a_{yx} &= -\sum_{j=1}^N (-(1 - \cos 2\phi_j) + K_r \sin 2\phi_j) \\ a_{yy} &= -\sum_{j=1}^N (-\sin 2\phi_j + K_r (1 + \cos 2\phi_j)) \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)写成矩阵形式为:

$$\begin{aligned} \{F(t)\} &= \\ \frac{1}{2} a_p K_{tc} [A(t)] \{\Delta(t)\} \end{aligned} \quad (7)$$

3 切削力建模拓展研究

在静态与动态切削力基本预测模型的基础上,很多拓展模型相继被提出,归纳起来主要呈现以下特点:

(1) 建立具有更强适应性的通用切削力模型,如 Engin 等^[9]建立了通用螺旋铣刀几何模型和切削力模型,可对圆柱螺旋铣刀、R 刀、球头铣刀和锥形球头铣刀等进行切削力预测; Li 等^[10]建立了镶齿铣刀通用几何模型和切削力模型,可对不同数量、不同布置及不同形状刀片的镶嵌铣刀进行切削力预测。

(2) 建立更为精确的切削力模型,如刘敏等^[11]采用偏最小二乘法进行回归分析,确定了立铣模具钢 4Cr16Mo 的精确切削力系数,并分析了切削参数对切削力的影响。

(3) 建立面向刀具路径的三维切削力模型,实现三维切削力仿真。如 Ozturk 等^[12]提出了五轴应力切削力预测模式,分析刀具姿态对切削力的影响; Zhang 等^[13]提出了周铣直角圆切削力模型,根据时变的径向啮合角计算切削力; Li 等^[14]提出了圆角铣削动态切削力模型并进行了铣削稳定性分析。

切削加工稳定性建模与分析

有关切削颤振的研究最早可追溯到 20 世纪 60 年代, Tobias 等^[15]发现,再生作用是引起颤振的首因。稳定性叶瓣图被用来描述切削过程稳定性与切削参数之间关系,可通过对动力学模型进行分析得到。稳定性分析方法可归纳为频域法、时域法和切削试验法等。

1 频域法

频域法亦称解析法,它通过频域稳定性判据来确定临界稳定切削条件,可进一步细分为零阶近似(Zero-Order Approximation, ZOA)和多频域(Multi Frequency, MF)两种方法。前者最早由 Budak 等^[8]提出,采用傅里叶级数的直流分量来表示动态铣削因子,从而使问题线性化。该方法计算速度快,适合大多数铣削场合,但无法对小径向切深下的附加稳定叶瓣进行预测。在 ZOA 方法的基础上, Merdol 等^[16]提出了多频域法,它考虑了多次谐波的影响,能够对小径向切深下的附加稳定性叶瓣进行预测,不足之处是计算量更大。其具体分析流程如图 2 所示。

(1) 将铣削系统简化为二自由度振动系统,并建立相应的铣削动力学微分方程。

(2) 在时域内,推导出动态切削力与切削参数之间的关系式。

(3) 通过傅里叶级数展开,对时变方向力系数作近似处理,将时域稳

定性问题转化为频域稳定性问题。

(4) 利用频率稳定性判据确定临界稳定切削条件。

(5) 计算临界稳定切削条件下的轴向切削深度及其对应的主轴转速。

(6) 绘制稳定性叶瓣图。

在经典 ZOA 方法的基础上,众多学者对铣削稳定性分析方法进行了拓展研究,主要包括:

(1) 提出面向各种几何形状铣刀的改进 ZOA 模型。Engin 等^[17]通过构建镶齿铣刀通用几何模型,实现了镶齿铣刀切削稳定性预测; Li 等^[18]采用数值方法求取平均方向力系数,实现了 T 型槽铣削稳定性预测; Slavicek^[19]、Budak 等^[20]相继对变齿间角铣刀抑制颤振的机理进行研究,发现改变铣刀的齿间角和螺旋角可获得更大的轴向稳定切深。

(2) 提出面向非直线铣削的改进 ZOA 模型。Kardes 等^[21]通过计算时变的径向啮合角和方向力系数,实现了圆弧铣削稳定性叶瓣图预测; 李忠群等^[22]通过构建圆弧铣削几何模型及动力学模型,实现了任意角度圆弧铣削稳定性预测与工程应用; 基于螺旋铣孔几何、静力学与动力学建模, Li 等^[23]还提出了一种由轴向进给/径向进给和主轴转速表示稳定性叶瓣图。

(3) 将二维铣削稳定性模型拓展到三维甚至多维。针对弱刚性工件系统或弱刚性刀具系统, Bravo

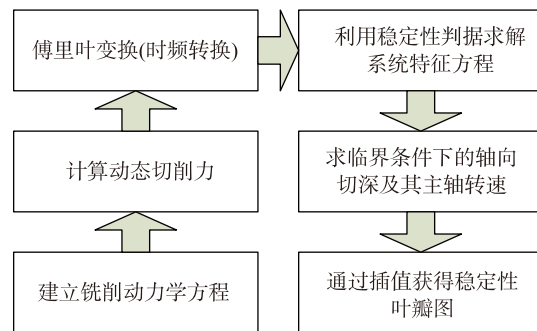


图2 频域铣削稳定性分析示意图

Fig.2 Schematic diagram of stability analysis for milling process in frequency domain

等^[24]根据刀具与工件的相对运动实现了三维稳定性叶瓣图预测。李忠群等^[18]在进行T型槽铣削稳定性预测时,通过改变径向切深进行仿真获得了如图3所示的三维稳定性叶瓣图。

(4)系统分析工艺系统动力学特性参数对铣削稳定性的影响,探索快速构建稳定性叶瓣图的方法,以方便实际工程应用^[25]。

2 时域法

时域法是指采用时域稳定性判据对铣削稳定性进行分析的方法,可细分为数值仿真法和离散求解两种方法。

2.1 数值仿真法

数值仿真法指在时域内对铣削动力学微分方程进行求解,进而实现对切削过程参数的预测,并根据某种时域稳定性判据判断给定切削条件下的铣削过程是否稳定,最后获得稳

定性叶瓣图的方法。如图4所示,时域数值仿真法的流程如下^[26]:

(1)建立铣削系统动力学微分方程。

(2)对连续时间进行离散化,用数值方法求解微分方程。

(3)根据求解结果更新刀具位置并修正动态切削厚度。

(4)计算当前时间步下的动态铣削力。

(5)判断仿真是否结束,若未结束跳到步骤(2)。

(6)根据某种时域稳定性判据,确定当前切削是否稳定。

(7)改变主轴转速与轴向切深,重复步骤(2)~(7)。

由于时域仿真可综合考虑各种非线性因素的影响,故预测精度较高^[27]。不足之处是缺乏特别有效的时域稳定性判据,且计算量大、预测时间长。

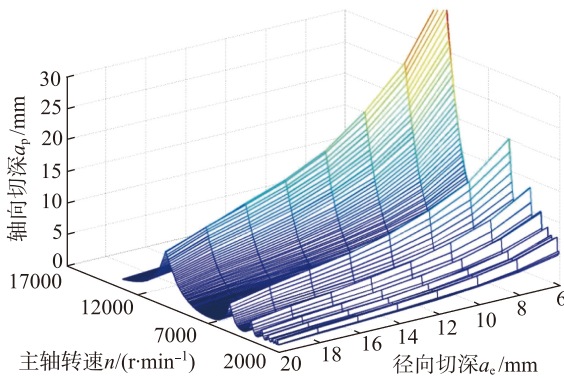


图3 三维颤振稳定性叶瓣图

Fig.3 3D chatter stability lobe diagram

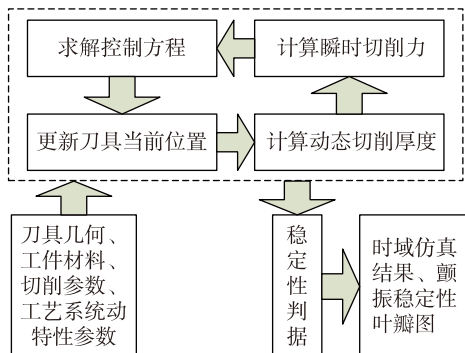


图4 颤振稳定域时域仿真流程

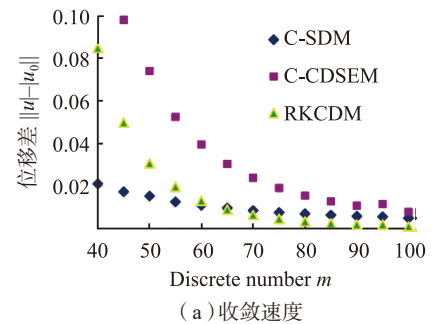
Fig.4 Flow chart of stability analysis in time domain

2.2 半解析求解方法

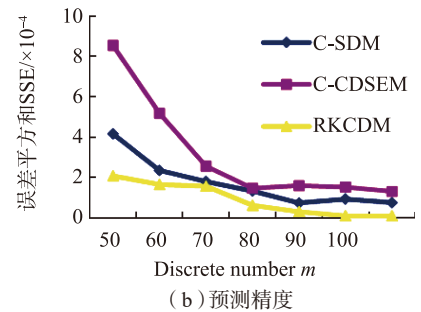
半解析求解方法主要有半离散法(Semi Discretization, SD)和全离散法(Full Discretization, FD)等。半离散法由Inspurger等^[28]最早提出,它可对任意转速下的稳定性极限进行预测,预测精度取决于离散间隔,计算量取决于离散间隔及工艺系统模态阶数。该方法尤其适合对小径向切深铣削稳定性预测。

全离散方法由Ding等^[29]提出,在每个小的时间间隔内,通过线性插值同时实现系统状态项、时间周期项和时延项的近似处理,在获得单个时间间隔状态变换离散图后,构建出系统变换矩阵的闭式表达式,根据Floquet理论对铣削稳定性进行预测。

在全离散法的基础上,Li等^[30]提出了一种基于四阶龙哥库塔法求解铣削稳定性的半解析方法(简称RKCDM)。与其他半离散与全离散方法相比,该方法具有收敛速度快、运算速度快等优点,如图5所示。



(a) 收敛速度



(b) 预测精度

图5 四阶龙哥库塔法与其他稳定性求解方法的对比

Fig.5 Comparison between 4th Runge-Kutta method with other methods for stability analysis

表面形貌预测

表面形貌预测是指以切屑形成机理为理论依据,根据刀具与工件的相对运动轨迹,综合考虑刀具几何参数、刀齿跳动、刀具磨损、加工变形、切削参数及系统动态特性等因素的影响,获得已加工表面的微观结构或表面粗糙度的过程。铣削加工表面形貌预测主要有以下两种方法:

一种是沿进给路径利用刀具所形成的包络面约束,计算工件表面最大材料残留高度,以实现已加工表面的形貌仿真,其特点是计算效率高。Chiou等^[31]以仿真得到的最大残留高度为指标,提出了基于最大势能场(Machining Potential Field, MPF)的刀具轨迹规划方法;Senatore等^[32]研究了曲面加工时如何选择刀具及规划刀轨间隔等问题;Gray等^[33]对五轴铣削中的刀具的

位置及姿态对已加工表面轮廓的影响进行了评估。

另一种是Z-map方法,它首先将工件坐标离散化,计算每个网格节点的z坐标值,并用x-y-z坐标来对已加工表面进行描述。使用Z-map方法,Zhu等^[34]实现了球头铣刀五轴铣削自由曲面的表面轮廓预测。Omar等^[35]以端铣为对象,采用Z-map模型研究了刀具回转误差对零件表面形貌的影响。Liu等^[36]则研究了刀具偏心及刀具磨损等对五轴铣削加工表面形貌的影响。然而,在Z-map模型中,模型的预测精度很大程度上取决于工件离散细化程度,亦即工件离散越细,预测精度越高,计算效率越低。

以上研究中,由于只考虑了静态力的作用,无法对铣削加工过程因复杂动力学现象而导致的表面形貌改变进行预测。为弥补这种缺陷,李忠

群等^[37]基于工件Z-map模型和考虑再生作用的铣削动力学模型,采用数值方法求解周铣动力学微分方程,在Matlab平台上实现了周铣加工三维表面形貌预测,如图6所示。基于改进的Z-map模型及螺旋铣孔运动学与动力学模型,Li等^[38]实现了螺旋铣孔表面形貌预测,并分析切削用量、刀具直径和待加工孔直径等对表面轮廓质量的影响。梁鑫光等^[39]提出了基于动力学响应的球头铣刀五轴铣削表面形貌预测模型,可有效地对颤振和稳定工况下的表面形貌与纹理特征等进行准确预测。

结论

本文结合国内外研究现状对铣削过程动力建模及稳定性分析等进行了深入分析对比,介绍了其实现原理与基本步骤,归纳了各自特点与应用场合。静态切削力建模原理简单、

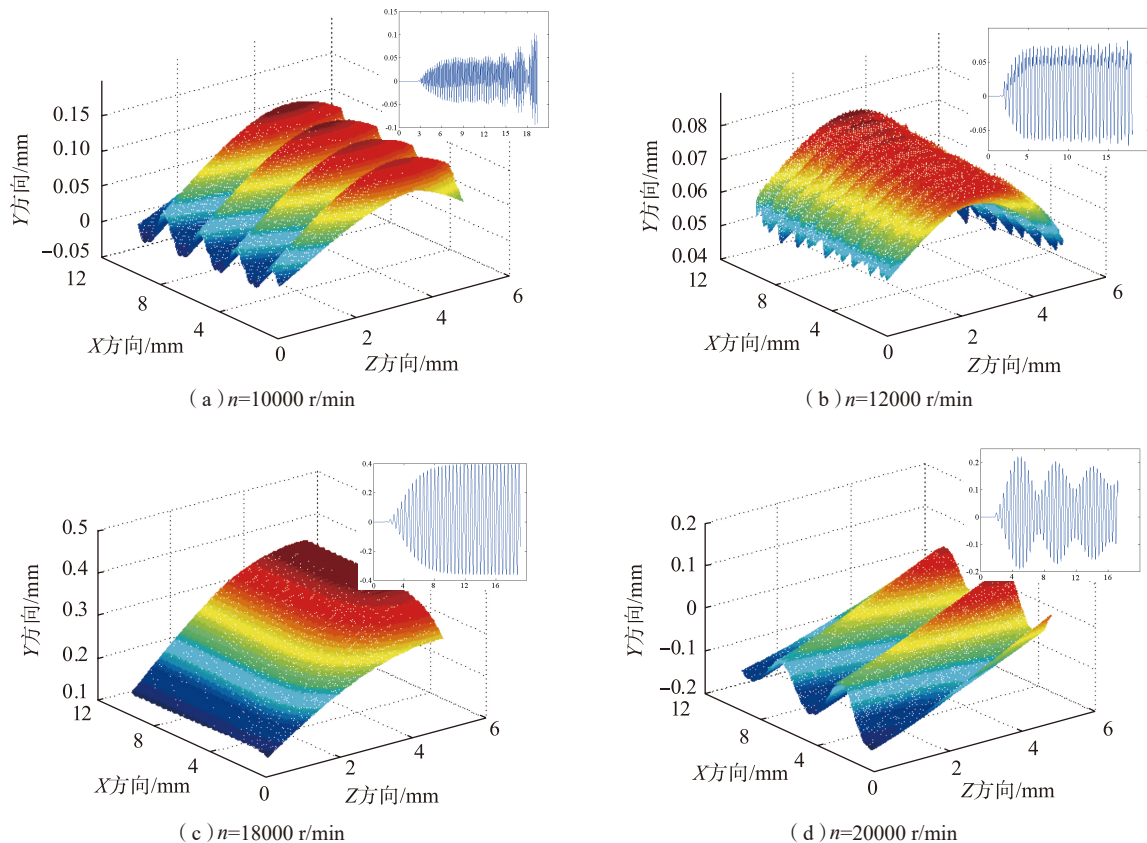


图6 主轴转速对周铣表面形貌及刀具振动量的影响

Fig.6 Effect of spindle speed on surface topography and tool vibration of peripheral milling

预测精度较高,但仅适用高刚性的工艺系统;动态切削力建模由于考虑工艺系统的弱刚性,不仅预测精度得以提升,而且还能揭示其中的颤振现象。以零阶近似法为代表的频域法,不仅预测速度快,而且在绝大部分场合其预测精度也能满足要求;时域法虽然预测时间较长,但它能揭示铣削过程中的各种非线性动力学现象。

虽然目前国内外已在铣削加工动力学建模与仿真分析领域取得了可喜进展,但尚有诸多问题有待解决,主要包括:(1)时变、非线性、迟滞铣削系统的精确建模与求解方法研究。(2)航空难加工材料切削速度普遍较低,由于低速时存在显著的过程阻尼现象,如何建立考虑非线性过程阻尼的铣削动力学模型并求解。(3)在建立铣削力模型时,如何通过必要的假设与近似在模型精度与模型复杂性之间取得平衡。

参考文献

- [1] TAYLOR F W. On the art of cutting metal[J]. Transactions of the ASME, 1907, 28-31(1): 100-110.
- [2] KOENIGSBERGER F, TLUSTY J. Machine tool structures[M]. London: Pergamon Press, 1970.
- [3] MERCHANT M E. Mechanics of the metal cutting process: plasticity conditions in orthogonal cutting[J]. Journal of Applied Physics, 1945, 16(1): 318-324.
- [4] OXLEY P L B. Introducing strain-rate dependent work material properties into the analysis of orthogonal cutting[J]. Annals of the CIRP, 1966, 13(1): 127-138.
- [5] SABBERWAAL A J. Chip section and cutting force during the milling operation[J]. Annals of the CIRP, 1961, 10(3): 197-203.
- [6] FU H J, DEVOR R E, KAPOOR S G. A mechanistic model for the prediction of the force system in face milling operations[J]. Journal of Engineering for Industry, 1984, 106: 81-88.
- [7] WATERS A J. Modeling and simulation of cutting forces during face milling operation[D]. West Lafayette: Purdue University, 1995.
- [8] BUDAK E, ALTINTAS Y, ARMAREGO E J A. Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1996, 118(2): 216-224.
- [9] ENGIN S, ALTINTAS Y. Mechanics and dynamics of general milling cutters Part I: helical end mills[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(15): 2195-2212.
- [10] LI Z Q, YUAN S M, HUANG K S. Prediction of dynamic cutting force and regenerative chatter stability in inserted cutters milling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(3): 555-563.
- [11] 刘敏,景璐璐,安庆龙,等. 4Cr-16Mo 模具钢立铣加工过程中的切削力系数[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(1): 25-29.
- LIU Min, JING Lulu, AN Qinglong, et al. Cutting force coefficient of die steel 4Cr16Mo under end milling process[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2009, 43(1): 25-29.
- [12] OZTURK E, TUNC L T, BUDAK E. Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(14): 1053-1062.
- [13] ZHANG L, ZHENG L. Prediction of cutting forces in milling of circular corner profiles[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44(2): 225-235.
- [14] LI Z Q, LIU Q. Modeling and simulation of chatter stability for circular Milling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(7): 181-186.
- [15] TOBIAS S A. Machine tool vibration[M]. Glasgow: Blackie and Sons Ltd., 1965.
- [16] MERDOL S D, ALTINTAS Y. Multi frequency solution of chatter stability for low immersion milling[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126: 459-466.
- [17] ENGIN S, ALTINTAS Y. Mechanics and dynamics of general milling cutters Part II: inserted cutters[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(15): 2213-2231.
- [18] LI Z Q, LIU Q. Modeling and analytical solution of chatter stability for T-slot milling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(1): 88-93.
- [19] SLAVICEK J. The effect of irregular tooth pitch on stability of milling[C]// Proceedings of the Sixth MTDR Conference. London: Pergamon Press, 1965: 15-22.
- [20] ALTINTAS Y, ENGIN S, BUDAK E. Analytical stability prediction and design of variable pitch cutters[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1999, 121(2): 173-178.
- [21] KARDES N, ALTINTAS Y. Mechanics and dynamics of the circular milling process[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129: 21-31.
- [22] 李忠群,刘强. 圆角铣削颤振稳定域建模与仿真研究[J]. 中国机械工程学报, 2010, 46(7): 181-186.
- LI Zhongqun, LIU Qiang. Modeling and simulation for stability of circular milling[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(7): 181-186.
- [23] LI Z Q, LIU Q, MING X Z, et al. Cutting force prediction and analytical solution of regenerative chatter stability for helical milling operation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(1-4): 433-442.
- [24] BRAVO U, ALTUZARRA O, LOPEZ DE LACALLE LN, et al. Stability limits of milling considering the flexibility of the work-piece and the machine[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(15): 1669-1680.
- [25] LI Z Q, WANG Z K, SHI X F. 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.
- [26] LI Z Q, LIU Q. Solution and analysis of chatter stability for end milling in the time-domain[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21(2): 169-178.
- [27] 刘强,李忠群. 数控铣削加工过程仿真与优化—建模、算法与工程应用[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.

LIU Qiang, LI Zhongqun. Simulation and optimization of CNC milling process-modeling, algorithm and engineering applications[M]. Beijing: Aeronautical Industry Press, 2011.

[28] INSPIERGER T, STEPAN G. Updated semi-discretization method for periodic delay-differential equations with discrete delay[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 61: 117-141.

[29] DING Y, ZHU L M, DING H, et al. A full-discretization method for prediction of milling stability [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50(5): 502-509.

[30] LI Z Q, WANG Z K, PENG Y R, et al. Prediction of chatter stability for milling process using Runge-Kutta-based complete discretization method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(1-4): 943-952.

[31] CHIOU C J, LEE Y S. A machining potential field approach to tool path generation for multi-axis sculptured surface machining[J]. Computer-Aided Design, 2002, 34(5): 357-371.

[32] SENATORE J, SEGONDS

S, RUBIO W, et al. Correlation between machining direction, cutter geometry and step-over distance in 3-axis milling: Application to milling by zones[J]. Computer-Aided Design, 2012, 44(12): 1151-1160.

[33] GRAY P J, ISMAIL F, BEDI S. Graphics-assisted rolling ball method for 5-axis surface machining[J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(7): 653-663.

[34] ZHU R, KAPOOR S G, DEVOR R E. Mechanistic modeling of the ball end milling process for multi-axis machining of free-form surfaces[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2001, 123(3): 369-379.

[35] OMAR OEEK, EI-WARDANY T, NG E, et al. An improved cutting force and surface topography prediction model in end milling[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47: 1263-1275.

[36] LIU X, SOSHIM, SAHASRABUDHE A, et al. A geometrical simulation system of ball end finish milling process and its application for the prediction of surface micro features[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2006, 128(1): 74-85.

[37] 李忠群, 刘强, 郑敏, 等. 基于 Z-map 的弱刚性系统高速周铣表面加工精度 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2012, 40(S2): 52-55.

LI Zhongqun, LIU Qiang, ZHENG Min, et al. Z-map based prediction of surface machining accuracy for peripheral milling with low rigidity system[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(S2): 52-55.

[38] LI Z Q, LIU Q. Surface topography and roughness in hole-making by helical milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9-12): 1415-1425.

[39] 梁鑫光, 姚振强. 基于动力学响应的球头刀五轴铣削表面形貌仿真 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 171-178.

LIANG Xinguang, YAO Zhenqiang. Surface topography simulation for 5-axis milling using ball end mill based on dynamic response[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 171-178.

通讯作者: 李忠群, E-mail: zhqunli@163.com。

Review and Prospect on Dynamic Modeling and Simulation for Milling Process

LI Zhongqun¹, SHI Xiaofang¹, DANG Jiantao¹, LI Wen²

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;

2. AECC South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412002, China)

[ABSTRACT] Accurate prediction of cutting process parameters is very important for achieving high-efficiency and chatter-free milling process. In this paper, the methods, principles, simulation algorithms and engineering applications of dynamic modeling for milling process are reviewed. First of all, the modeling methods of cutting process are classified into four categories: empirical method, analytical method, FEA method and mechanical method. And its characteristics are analyzed. Secondly, the static cutting force model and dynamic cutting force model are introduced in detail, and their respective application occasions are given. Thirdly, the principles, advantages and disadvantages, and application conditions of several typical stability analysis of milling process are compared, which can be used as theoretical basis for selecting suitable stability analysis method. Lastly, two common used surface topography prediction methods for milling process are introduced. Conclusions of above-mentioned analysis can be used as theoretical guidance for further researches or engineering applications in the field.

Keywords: Milling process; Dynamic simulation; Cutting force; Surface topography; Chatter stability

(责编 文竹)