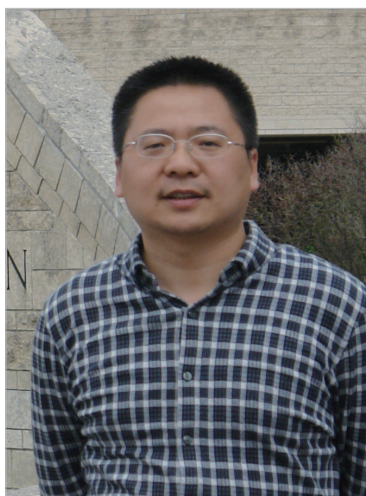


航空发动机薄壁件铣削加工动力学研究进展*

Research Progress on Milling Dynamics of Aeroengine Thin-Walled Parts

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 姚倡锋 田卫军 任军学
中航工业西安航空发动机(集团)有限公司 刘智武



姚倡锋

西北工业大学教授,硕士生导师,航空宇航制造工程学科博士。主要研究方向为难加工材料切削技术、高速加工工艺技术、表面完整性控制技术。主持973计划项目子专题、国家自然科学基金、国家数控机床重大专项等多项科研课题。获7项软件著作权,获专利授权4项,发表论文50余篇。

航空发动机薄壁零件(机匣、叶盘、叶环、叶片等)由于质量轻、结构强度高、强度高等诸多的优良特性,被广泛应用于航空航天领域。尤其随着航空工业的发展,航空整体薄壁件应用更

铣削过程中引起的加工变形和切削振动是影响航空发动机薄壁件加工精度与质量的主要因素,通过分析加工过程中工件的动态响应特性,从切削动力学角度,基于知识型数控加工过程仿真成为航空发动机薄壁件颤振抑制的一种灵活通用的物理仿真方法。目前,关于航空发动机薄壁件的力学物理仿真研究主要包括航空发动机薄壁件铣削力建模与试验方法研究、铣削动力学建模和铣削动力学模型仿真与工艺参数优化。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.22.042

加广泛和显著,现已成为现代航空领域广泛采用的承力结构件。航空发动机整体薄壁件结构复杂,虽然整体刚度很高,但是切削过程中局部刚度相对较低,BTF比(BUY-to-FLY,即制造一个零件的所需材料与最终零件所含材料比率)高;另外,数控铣削加工中极易产生工件变形和切削振动,造成整体薄壁零件加工效率和加工精度低,很难达到工件质量要求,该问题已成为影响与制约薄壁件加工质量的主要因素。因此,当前航空发动机整体薄壁零件的工艺制造技术水平高低,已成为评判各国航空制造业与基础工业水平的重要指标。

针对航空发动机薄壁件加工易

出现颤振与变形这一特点,通常的解决方案就是采用真空夹具、自适应夹具,或者采用低温合金、填充石膏、松香和石蜡等^[1]。但这类方法的缺点就是价格昂贵且不灵活,材料的收缩和膨胀效应很难控制;还有一种方法就是采用制动器在线补偿变形抑制振动^[2],这类方法的关键就是需要对每个零件安装与拆卸制动器,增加了操作者额外工作量,而且制动器一旦开始工作,什么时间出现故障都是不可预知的。铣削加工过程实际是工作母机机床与刀具系统,刀具与工件系统之间相互动态影响的结果;而切削动力学就是研究“机床-工艺系统”交互作用机理的,其通过

* 基金项目:国家数控机床重大专项课题(2014ZX04012013)。

加工过程动力学分析研究优化的工艺切削参数,是目前实现航空发动机薄壁件高性能加工的重要理论依据。因此,通过铣削工艺建模,通过分析加工过程中的工件的动态响应特性,从切削动力学角度,基于切削原理、控制工程、工程测试、计算有限元等知识型数控加工过程仿真成为航空发动机薄壁件颤振抑制的一种灵活通用的物理仿真方法。目前,关于数控加工过程仿真可分为几何仿真和物理仿真两个方面。其中,加工过程的力学/动力学仿真亦即物理仿真一类,是采用数学模型(包括有限元模型)描述切削过程中主要物理因素的变化及其相互关系。在实际加工之前分析和预测各切削参数变化以及干扰因素对加工过程的影响,其主要包括切削力仿真、切屑形态过程仿真、刀具磨损仿真、切削温度仿真、加工表面形貌及表面完整性仿真、加工稳定性仿真以及机床/刀具/零件变形仿真以及加工精度仿真等,仿真结果可作为实际切削加工过程调整和优化切削参数的依据。

航空薄壁件铣削加工振动抑制所开展的动力学研究体系如图1所示,其主要包括:铣削动态切削力建

模、铣削动力学稳定性建模、铣削加工切削参数优化。本文将从这3个方面对航空发动机薄壁件加工动力学研究进展情况进行阐述。

薄壁件铣削动态切削力建模

切削力建模方法目前主要分为4大类:(1)解析建模法。该方法以正交切削的剪切变形区理论和剪切面理论作为建模依据,形成二维正交切削模型,最终利用有限元数值模拟分析主剪切区的材料屈服流动特性或第二变形区摩擦行为,即可建立正交切削力解析预报模型。分析同时可以获取切削过程中切屑卷曲形态、切削温度、残余应力、刀具磨损以及实现切削工艺参数的优化。通过几何变换即可得到斜交切削的三维铣削切削力模型^[3]。此方法的缺陷就是预报的动态切削力准确性难以控制。(2)基于物理模型的数值方法。该类方法主要基于切屑形成机理为基础,建立力-热耦合偏微分方程,利用切削过程的边界和初始条件进行切削力的描述,最后,利用有限差分法、有限元法及边界元法等数值求解算法解算方程组,其求解过程与求解精度取决于材料本构模型描述、

模型参数标定和非线性边界条件。结果,理论上可以得到切削过程中的切削力、应力、温度等基本物理参数,但缺点就是预报结果计算量非常大,仿真计算时间长。(3)基于试验的半经验(Semi-empirical)建模法。该类方法通常以切削试验的数据为依据,切削力一般表达为切屑负载的非线性指数函数关系。半经验模型大体可以分为两类:考虑边缘效应和不考虑边缘效应的切削力建模。ENGIN等^[4]首先建立了单刃铣刀切削力微分模型,并对该模型进行了切削试验验证。李作丽、赵军等^[5]考虑了刃口效应影响,推导并建立刃口的空间曲线模型的刚性切削力模型。马万太等^[6]考虑刀具径向偏心影响,通过对铣刀的微元离散化,提出了球头刀的刚性铣削力模型。FENG和MENQ^[6-8]建立的刚性铣削力预测模型,其将切削力系数表达为三次多项式,通过槽铣试验求解切削力系数。倪齐民、李从心等^[9]用数值积分方法建立了实体刀具刚性三维铣削力模型。KIM和CHO等^[10]建立了考虑刀具倾角影响的刚性铣削力模型,并将刀具与工件的接触区域用Z-map模型进行表达。张臣等^[11]依据Z-map模型,提出了切削刃微元是否参与切削的判断方法,并建立了柔性铣削力模型。上述切削力建模结构简单明了,能够精确预测稳态切削过程中切削力大小,但该类模型难以据此深入探究加工过程的动力学机理。(4)基于力学模型(Mechanistic Model)的半解析法。其主要涉及切削力模型建立与切削力系数的辨识和标定。

根据建模的边界条件不同,切削力模型大体可以分为5种类型:(1)平均切削力静变形模型:其近似反映了切削力大小的变化情况,主要依赖材料去除率(MRR)与主轴平均功率间的函数关系而建立;(2)瞬态刚性力模型:该模型将刀具切削刃沿轴向离散成微元序列,并将微元受到

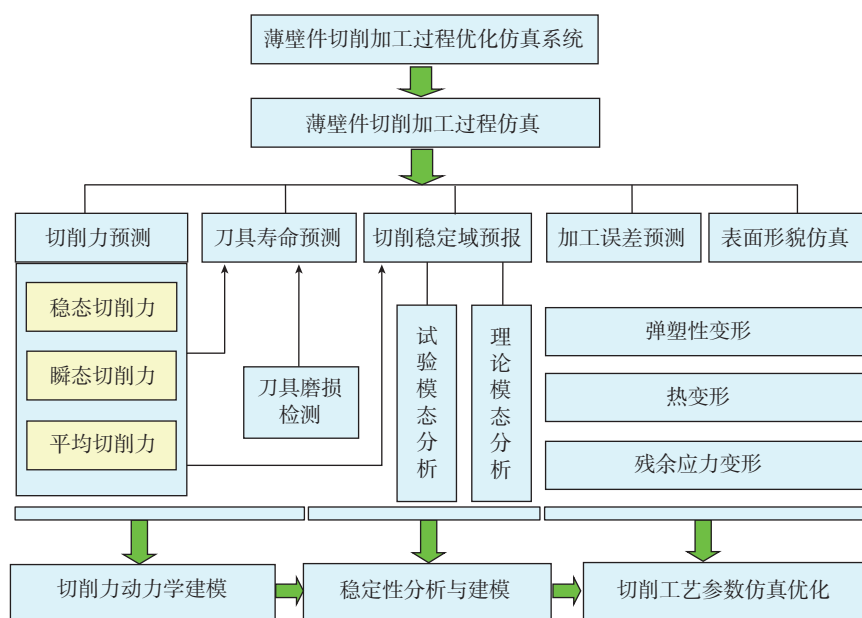


图1 航空薄壁件切削加工动力学研究体系

的切向与径向力大小表达成与瞬态切削厚度的线性关系,该模型需要判断轴向和刀齿是否参与切削,并且需要计算瞬时切削厚度;(3)瞬态刚性力静变形模型:该类模型考虑了柔性刀具在切削力作用下的变形量,但是没有考虑刀具变形量对刀具-工件浸入边界的影响;(4)再生型切削力动态模型:此类模型与实际情况比较接近,但结构上比较复杂,系数确定比较困难。模型将动态切削厚度表达成前一刀齿周期(再生效应)甚至多个刀齿周期(多重再生效应)前的刀具与工件的动态位移信息来进行求解;(5)人工智能型模型:该类模型主要基于人工神经网络技术和模糊逻辑控制技术建立模型。神经网络模型可以有效处理大量工艺参数之间复杂的非线性关系。模糊灰色理论模型主要是通过在线调整进给率维持切削力大小恒定,达到抑制颤振,改善刀具工作状态和提高薄壁件加工精度的目的。目前在铣削动力学领域中被广泛采用的铣削力模型是再生型动态切削力模型,其主要优点在于计算量较其他方法要小,并且能够准确反映加工过程的动力学机理。

上述切削力模型中切削力系数的辨识标定,目前主要基于切削试验与仿真手段获取。例如:基于切削试验系数标定方法^[12];基于正交切削试验数据的力学建模方法^[13-14];FEM有限元仿真方法^[15-16]。

薄壁件铣削动力学稳定性建模

薄壁件的动力学建模,根据薄壁件振动机理的不同,BUDAK将加工过程中的振动形式依次划分为模态交叉引起的耦合型颤振、位移延迟引起的再生型颤振、力-热型颤振^[17]及摩擦型颤振^[18]4大类。通过实际铣削对比发现,在上述4种颤振中,再生型颤振对切削稳定性的影响最为显著。到目前为止,针对再生颤振

模型,已经提出许多近似计算方法用于稳定性预报,大致可以分为3类:(1)直接数值计算法。SRIDHAR等^[19]关于铣削加工过程的稳定性,提出了一种全面描述的数学模型,并利用状态转移矩阵给出了数值求解方法。TLUSTY等^[20]提出了一种稳定性的预报方法,主要是基于直接时域计算动态响应的方法。随后SMITH等提出颤振发生的判据,即以仿真过程中的切削力最大幅值减去最小幅值(Peak-to-Peak, PTP)作为稳定性判断依据。MINIS等^[21]提出了2自由度铣削动力学模型,并通过奈氏判据求解稳定性的边界条件。DAVIES等^[22]提出了离散映射预报法,得到了小径向切深下的附加不稳定区域。LI等^[23]提出了基于时域稳定性数值解法,并给出了薄壁件大轴向切深铣削的稳定性判据。ALTINTAS^[3]提出了时域的一种改进计算方法,该方法以动态切厚与静态切厚的比值作为稳定性判断依据。北京航空航天大学LI等^[24]提出了基于龙格库塔法的时域铣削稳定性判据;(2)解析(半解析)法。TOBIAS等^[25]是在再生颤振和一维颤振机制研究的先驱。他们认为,切削力的方向以及沿切削厚度的振动是常量,像车削、镗削、拉削就属于这种单点切削。TLUSTY^[20]提出了最大切削深度、结构刚度和工艺过程的切削系数之间的简单关系,他认为,最大切削深度与动态刚度成正比,并且与切削系数成反比。较高的动态刚度和较低的材料切削系数(即硬度)将产生较高的材料去除率。TOBIAS提出了一个类似的模式,但他考虑了留在切屑表面内部和外部之间在切屑表面的相位移动影响,并且给出了稳定性叶瓣图,显示出在高速下可以提高合金材料的去除率。与直角单刃切削不同,铣削是多个刀齿同时参与的旋转进行切削。切削力的方向是随刀具旋转变化的,

并且当刀具具有相同的齿间距或者如果齿间距是变化的时候,系统是以刀具切削齿间隔为周期或者以主轴转速间隔为周期的,系统在刀齿通过的间隔就是周期性的,提出了铣削动力学数值模拟,包括浸入角,如刀具跳刀等。SRIDHAR^[26]等提出了动态铣削系统的封闭环模型,但其解决方案是由MINIS等首次成功完成的,他们用弗洛凯特理论对给定切削条件的稳定性进行评估。ALTINTAS和BUDAK提出了单频率零阶法(Zeroth Order Approximation, ZOA)该模型可以直接在频域的稳定叶瓣图进行预报,尽管零阶求解可以直接求解和解析,也已经被证明可以用于绝大多数铣削加工中。当径向切深比较小时,铣削工艺表现出高间歇方向因子,它将导致切削力中包含高频成分。在这种情况下,平均切削力方向因子很可能对于高转速小径向接触的切削预报不够充分。此时,ALTINTAS和BUDAK针对工艺过程以少量径向切入高阶断续切削过程时模型进行了预报模型的多频域求解(MFS法)。INSPERGER等^[27-28]提出了一种在离散时域颤振的解析方法。延时微分方程以离散时间间隔的方法被离散,对于给定的切削条件,切削系统稳定性预报时,允许线性、时域切削力和振动仿真。上海交通大学DING^[29]提出了一种稳定性预报方法,其主要是基于直接积分全离散的方法,该方法中涉及了铣刀螺旋角效应,可以同时进行加工的稳定性与加工表面误差(SLE)的预报。SEGUY等通过研究加工后的表面精度情况,间接判断薄壁工件不同模态下的铣削加工稳定性问题。BAYLY等^[30]提出的时域有限元分析方法(TFEA)基于加权残值法构造离散动态映射来逼近原系统,通过精确分离刀具自由振动和刀具-工件接触过程强迫振动分界时段进行稳定性预报,故计算精度高。MERDOL^[31]针对薄壁件

铣削加工的小径向切削深研究了铣削加工稳定性问题。CAMP A^[32]考虑了机床刀具和工件交互作用建立了三维切削稳定性模型,实现薄壁件的精加工。ARNAUD^[33]针对薄壁采用有限元方法建立了动力学模型,同时考虑了材料去除动态过程对工艺结构的影响;(3) 试验方法。SOLIS等^[34]通过颤振解析预报和试验模态分析的组合得到了铣削工艺过程稳定的边界条件。QUINTANA等^[35]通过采集加工过程的噪声信号来建立铣削稳定性边界条件。

薄壁件铣削加工切削参数优化

目前,关于铣削过程工艺参数的优化研究工作,主要集中在铣削过程运动学或静态切削力约束下的优化。WECK等最早通过建立轴向和径向切深的稳定性图谱得到了无振动刀位轨迹。目前,对于基于加工过程动力学模型的工艺参数优化的工作则相对较少。KURDI等^[36]基于有限差分法和时域有限元法提出了铣削稳定边界相对工艺参数灵敏度的分析法。MERDOL和ALTINTAS提出了最大材料去除率优化模型,其模型包

含了瞬时切厚、切削力、主轴功率、稳定性等约束条件。上海交通大学张小明^[37]在薄壁件的五轴加工中,以切削过程稳定无颤振为约束条件建立工艺系统鲁棒优化模型。将系统的主轴转速最大和振动最小化为优化目标,改善了薄壁件的加工表面质量。西北工业大学LUO等^[38-39]在航空发动机叶片薄壁件铣削中,考虑了动态切除过程模态变化对工艺刚度的影响,研究结果表明,通过优化材料的切除顺序可以得到高的材料去除率同时可以获得高的加工精度。目前关于薄壁件动力学铣削工艺参数优化方法,一般都是基于铣削加工过程参数优化流程,如图2所示。

同时,在工艺参数局部优化的基础上,国内外已开发了多个实用的数控加工过程动力学仿真优化加工系统,例如加拿大不列颠哥伦比亚大学制造自动化实验室的Cutpro、ShopPro和MACHpro仿真优化系统,软件集切削数据采集和分析、工艺系统传递函数测量、工艺系统的模态分析、切削力仿真等于一体,可实现铣削、车削等加工方式的无颤振切削。北京航空航天大学高效数控加

工技术研究应用中心在“千台数控机床增效工程”中自主研发开发的e-Cutting、X-Cut仿真优化系统,已在航空航天、电子、模具等制造行业零件加工和科研过程中得到了成功的应用。

结束语

航空发动机薄壁件的铣削加工过程中的加工变形和铣削颤振问题,对薄壁件的加工精度和表面质量的影响很大。因此,采用数控加工过程物理仿真技术对切削工艺过程和切削参数进行优化,对于提高航空零件的加工精度降低零件表面粗糙度,提高零件的加工效率,降低生产成本至关重要,该技术必将成为航空薄壁件精密数控加工的重要手段和后期发展趋势。

目前,航空发动机薄壁件的铣削方面仍有很多有待研究的问题,例如:(1) 动力学模型方面:面对航空发动机难加工材料的切削力建模;切削力-进给之间的非线性模型、切削负载-切削力之间的本构非线性模型;工艺系统的过程阻尼模型等;(2) 颤振抑制方面:加工过程的主动控制技术;工件变形和刀具-工件之间的相对振动抑制的控制器设计和弱刚性工件最优夹持方案等问题。上述这些工程问题仍然是后期航空发动机薄壁件以切削动力学为基础进行研究的热点和难点。

参考文献

- [1] AOYAMA T, KAKINUMA Y. Development of fixture devices for thin and compliant workpieces. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2005, 54(1): 325-328.
- [2] NEIL D S, ZHANG Y M. Piezoelectric active control for workpiece chatter reduction during milling. Smart Structures and Integrated Systems, 2004, 5390(6): 335-346.
- [3] ALTINTAS Y. Manufacturing Automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design.

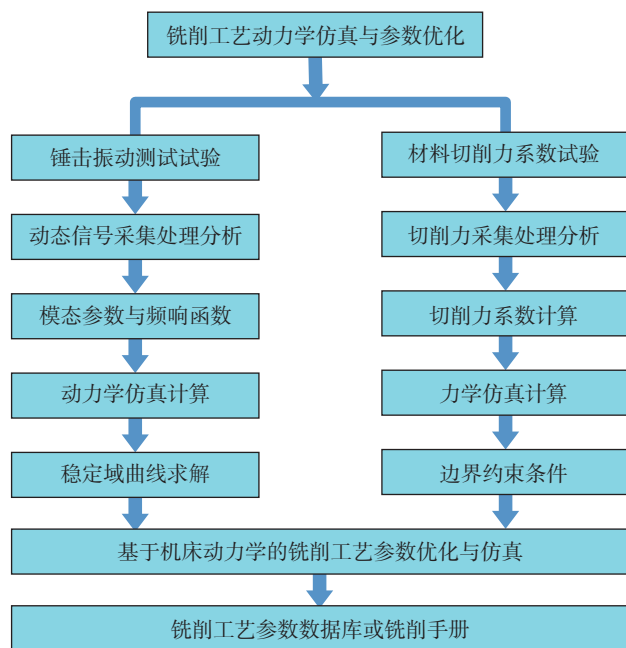


图2 航空薄壁件铣削加工过程参数优化流程

Cambridge:Cambridge University Press, 2000.

[4] ENGIN S, ALTINTAS Y. Mechanics and dynamics of general milling cutters.: Part I: helical end mills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, 41(15): 2195-2212.

[5] 李作丽,赵军,王素玉,等. 球头铣削切削力预测模型的解析计算. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 24(1): 76-78.

[6] 马万太,林志航,陈康宁. 刚性的球头铣刀切削力模型. *机械科学与技术*, 1998, 17(3): 422-424.

[7] ALTINTAS Y, SHAMOTO E, LEE P, et al. Analytical prediction of stability lobes in ball end milling. *Transactions of the ASME*, 1999, 34(5): 586-591.

[8] FENG H Y, MENQ C H. The prediction of cutting forces in the ball-end milling process—II. Cut geometry analysis and model verification. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1994, 34(5): 711-719.

[9] 倪其民,李从心,阮雪榆. 基于实体造型的球头铣刀三维铣削力仿真. *上海交通大学学报*, 2001, 7(7): 1003-1007.

[10] KIM G M, CHO P J, CHU C N. Cutting force prediction of sculptured surface ball-end milling using Z-map. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2000, 40(2): 277-291.

[11] 张臣,周儒荣,庄海军,等. 基于Z-map模型的球头铣刀铣削力建模与仿真. *航空学报*, 2006, 27(2): 347-352.

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

[13] BUDAK E, ALTINTAS Y, ARMAREGO E J A. Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 1996, 118(2): 216-224.

[14] BUDAK E, OZTURK E, TUNC L T. Modeling and simulation of 5-axis milling processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2009, 58(1): 347-350.

[15] GONZALO O, JAUREGI H, URIARTE L G, et al. Prediction of specific force coefficients from a FEM cutting model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 43(8): 348-356.

[16] ADETORO O B, WEN P H. Prediction of mechanistic cutting force coefficients using ALE formulation. *International Journal of Advanced*

Manufacturing Technology, 2010, 46(1-4): 79-90.

[17] DAVIES M A, BURNST J. Thermomechanical oscillations in material flow during high-speed machining. *Royal Society of London Philosophical Transactions*, 2001, 359(1781): 821-846.

[18] MARIAN W, ANTON M K. Frictional chatter in orthogonal metal cutting. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2001, 359(1781): 713-738.

[19] HOHN R E, SRIDHAR R, LONG G W. A stability algorithm for a special case of the milling process: contribution to machine tool chatter research. *Journal of Engineering for Industry*, 1968, 90(2): 325-329.

[20] TLUSTY J, ISMAIL F. Basic non-linearity in machining chatter. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1981, 30(1): 299-304.

[21] MINISI, YANUSHEVSKY R. A new theoretical approach for the prediction of machine tool chatter in milling. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 1993, 115(1): 1-8.

[22] DAVIES M A, PRATT J R, DUTTERER B S, et al. The stability of low radial immersion milling. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2000, 49(1): 37-40.

[23] LI H, SHIN Y C, LI H. A comprehensive dynamic end milling simulation model. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2006, 128(1): 86-95.

[24] LI Z Q, LIU Q. Solution and analysis of chatter stability for end milling in the time-domain. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2008, 2(2): 169-178.

[25] 托贝斯 S A. *机床振动学*. 北京: 机械工业出版社, 1997: 135-257.

[26] SRIDHAR R, HOHN R E, LONG G W. A stability algorithm for the general milling process: contribution to machine tool chatter research—7. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 1968, 90(1): 330-334.

[27] INSPERGER T, STÉPÁN G. Stability of the milling process. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 2000, 44(1): 47-57.

[28] INSPERGER T, STÉPÁN G. Updated semi-discretization method for periodic delay-differential equations with discrete delay. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 61(1): 117-141.

[29] DING Y, ZHU L M, ZHANG X J, et al. A full-discretization method for prediction of milling stability. *International Journal of Machine*

Tools and Manufacture, 2010, 50(5): 502-509.

[30] BAYLY P V, HALLEY J E, MANN B P, et al. Stability of interrupted cutting by temporal finite element analysis. *Transactions of ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2001, 120(6): 2361-2370.

[31] MERDOL S D, ALTINTAS Y. Virtual simulation and optimization of milling applications part II: optimization and feed rate scheduling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2008, 130(5): 0510051-05100510.

[32] ARIZMENDI M, CAMPA F J, FERNÁNDEZ J, et al. Model for surface topography prediction in peripheral milling considering tool vibration. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2009, 58(1): 93-96.

[33] SEGUY S, INSPERGER T, ARNAUD L, et al. On the stability of high-speed milling with spindle speed variation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 48(9): 883-895.

[34] SOLIS E, PERES C R, JIMÉNEZ J E, et al. A new analytical experimental method for the identification of stability lobes in high-speed milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44(15): 1591-1597.

[35] QUINTANA G, CIURANA J, FERRER I, et al. Sound mapping for identification of stability lobe diagrams in milling processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(3): 203-211.

[36] KURDI M H, HAFTKA R T, SCHMITZ T L, et al. A robust semi-analytical method for calculating the response sensitivity of a time delay system. *Journal of Vibration and Acoustics Transactions of the ASME*, 2008, 130(6): 64504-64510.

[37] 张小明. 五轴数控铣削加工几何-动力学建模与工艺参数优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.

[38] LUO M, ZHANG D H, WU B H, et al. Material removal process optimization for milling of flexible workpiece considering machining stability. *IMEchE, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2011, 225(8): 1263-1272.

[39] LUO M, ZHANG D H, WU B H, et al. Optimisation of spiral tool path for five-axis milling of freeform surface blade. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2010, 8(3): 266-282.

(责编 玲犀)