

# 数控加工中插铣技术的 研究现状\*

## Research Status of Plunge Milling Technology In NC Machining

哈尔滨理工大学高效切削与刀具国家工程实验室 王 宇 王宝涛 许成阳 李海超 康学洋



王 宇

哈尔滨理工大学机械制造及其自动化系副教授,工学博士。主要从事难加工材料及其刀具的设计工作,参与国家科技数控重大专项、国家自然科学基金等多项科研工作。编写教材2部,发表论文10余篇。

现如今,随着制造技术的不断发展,航空航天、模具制造和汽车等行业最能反映我国切削加工水平,其中航空航天产品具有批量小、结构复杂、去除率大、加工精度高等特点。近年来,随着设计的不断发展和完

在大型异型曲面狭窄空间插铣加工时,需要进行刀具轨迹优化,根据异形曲面复杂的结构特点,将可行加工域与插铣刀位轨迹进行规划,使粗加工材料去除量达到最大化,并且需要进行异形曲面插铣过程稳定性研究,插铣刀具的悬伸长度过长,使得刀杆的刚度很难保证,从而使得受力的时候容易发生弯曲,可能引起插铣过程中的颤振现象

善,大量新技术、新材料(尤其是钛合金、难加工材料)被广泛应用,造成了航空零件材料出现加工难度大和加工效率低的现象,而新型航空产品中大量使用各类整体结构件,如整体叶盘、整体叶环、整体涡轮等能省去零部件之间的连接,使零件数量大为减少,重量显著减轻,工件寿命和安全性都大为提高,但是这也大大增加了这类零件数控加工的余量,使加工效率进一步降低。以往广泛应用于产品制造中的面铣加工、球头刀铣削加工技术已经不能满足生产周期的需求,因此,研究高效的数控加工方法具有重要的意义。插铣铣削作为一种新型的高效铣削方式,在我国制造业中发挥着重要的作用,已被工业加工界,尤其是航空工业、模具制造业所认可并得到广泛应用。

### 插铣的特点

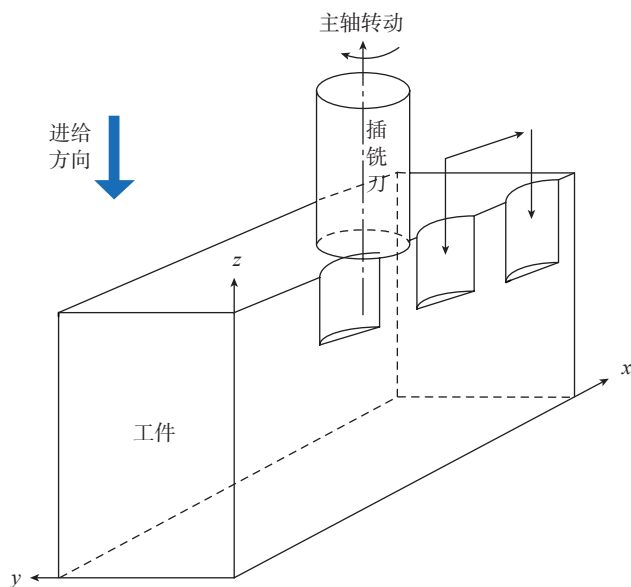
#### 1 插铣原理

插铣加工又称为Z轴铣削法,即在数控加工过程中,刀具沿刀轴方向直线进给,利用底部的切削刃进行钻、铣组合切削<sup>[1]</sup>。插铣加工能降低刀具的径向切削力,使切削力保持稳定,刀具振动小<sup>[2]</sup>。图1为插铣工艺原理示意图。

插铣加工法是对复杂曲面金属切削实现高效切除最有效的加工方法之一。对难加工材料的曲面加工、切槽加工以及刀具悬伸长度较大的加工,插铣法的加工效率远远高于其他一些常规的铣削方法。在需要快速切除大量金属材料时,采用插铣法可大幅度缩短加工时间。

#### 2 插铣的优点

\* 国家自然科学基金“狭长勾型结构件高效插铣加工稳定性预测与刀具设计”(51375127)资助。



插铣加工的加工方式比较特殊,与其他加工方式相比,它具有以下优点:

(1)加工效率高,能够快速切除大量金属,相对于普通铣削来说可以节省一半以上的时间。

(2)可以减小工件变形。

(3)可降低作用于铣床的径向切削力,这意味着轴系已磨损的主轴仍可用于插铣加工,而不会影响工件加工质量。

(4)刀具的悬伸长度比较大,特别适用于一些模具型腔的粗加工,并被推荐用于航空零部件的高效加工。

(5)可以对钛合金等难加工材料进行曲面加工或切槽加工。

(6)可用于各种加工环境,可以用于单件小批量的一次性原型零件加工,也适合大批量零件制造。

基于插铣加工具有以上优点,因此插铣正逐渐用于航空航天结构件整体叶盘的开粗加工,通过优化插铣的加工工艺,可实现整体叶盘的高效加工,相对提高了整体叶盘的加工效率。

### 3 插铣刀的设计

目前,国外许多厂商致力于插铣刀的开发设计研究,如欧洲的山特维

克、山高、伊斯卡,日本的三菱公司和美国的肯纳等各大刀具生产商纷纷推出了自己品牌的插铣刀,如图2所示。这些厂商有比较成熟的插铣刀设计开发系统,并以插铣切削理论和生产实践为基础,再通过对刀具的参数化设计,所以能够在短时间内开发出高性能的插铣刀。例如图

3所示的山高公司开发出的型号为R217/220.79-12A的用于粗加工的插铣刀,适合加工所有工件材料,切削速度可达到1000m/min。伊斯卡开发的新型TANG PLUNGE蝴蝶插铣刀,其型号为HTP LNHT 0604,直径范围分别有16、20、25mm的规格立装夹持刀片,用于铣刀顶端,刀槽具有高耐用性。插铣刀带有内冷却孔,可有效冷却切削区域,有助于排屑。

而国内刀具厂商对插铣刀的开发技术起步研究相对较晚,虽然对插铣机理有一定的研究开发,但很难形成具有说服力的插铣刀产品,而且一

般设计的插铣刀主要由经验进行定性设计,缺乏理论和参数设计,这样研发时间又比较长,直接导致其生产的刀具的切削性能、加工质量、刀具寿命和经济性满足不了市场的需要。

### 4 插铣编程软件

作为一种新型加工方法,编程成为插铣加工中的主要问题。目前,一些CAM软件已经具有插铣功能模块,但是大部分CAM软件中缺少适合用户的选项,包括适应各种工件形状的能力和适应各种类型铣刀的能力,因此插铣应用领域中刀具路径的生成是一个比较漫长的过程。

UG公司在NX 4.0中开始开发插铣加工功能<sup>[3]</sup>,在NX的CAM模块中,通过对插铣的设置可以实现环切,Zig-Zag型等走刀模式,能够实现插铣加工的基本功能。在UG中进行插铣操作时,可以由编程人员手动输入一系列参数,如最大切宽、切削速度等,使得符合加工的需求,也可以根据选择的刀具和其他参数,由系统自动从参数库中调用切削速度、切削用量等,具有较好的可操作性。同时,在预工艺设计方面,例如预钻孔的定位等,则要操作人员手动选择确定,对编程人员有较高的加工经验要求。

其他相关软件,如WorkNC<sup>[4]</sup>,利用插铣技术可以实现对大深度的工



件的快速切削,并可大大降低机床的损耗。Solidedge 等也相继都开发了符合各自用户习惯的插铣功能模块。

## 插铣国内外研究现状

### 1 插铣动力学研究现状

国外 Wakaoka<sup>[2]</sup> 等人从刀具几何参数和运动方面研究了断续插铣工件竖直外壁过程; Li<sup>[5]</sup> 在忽略系统的动态结构情况下,研究并提出了一种插铣复杂型面的方法并且预测了铣削力的大小; Jeong Hoon Ko<sup>[6]</sup> 对插铣铣削力进行试验建模的研究; Damir.A<sup>[7]</sup> 就柔性和刚性工件系统的条件下研究插铣力和插铣振动。任军学<sup>[8]</sup>、韩雄<sup>[9]</sup> 优化 TC11 钛合金插铣加工的切削参数,建立了插铣过程中切削力和切削温度的经验公式。田静云<sup>[10]</sup>、齐文国<sup>[11]</sup> 等通过对钛合金插铣铣削力的试验对插铣过程中铣削力随切削参数的变化规律进行了系统研究。崔立强<sup>[12]</sup> 等分析了切削用量对插铣铣削力的影响,实现了对插铣铣削力的预报。杨振朝<sup>[13]</sup> 分析了三向铣削力对铣削速度、每齿进给量和铣削深度的绝对灵敏度和相对灵敏度,研究了铣削参数对铣削力的影响规律。天津大学秦旭达<sup>[14]</sup> 研究钛合金插铣过程插铣过程动力学,建立了钛合金插铣的铣削力模型,并进行钛合金插铣温度场和刀具磨损机理等方面研究。刘献礼教授<sup>[15]</sup> 等考虑高速插铣过程高温和高应力耦合作用,进行插铣加工过程切削有限元分析,研究铣削力、温度和变形区应力应变分布。李晓宇<sup>[16]</sup> 针对难加工材料钛合金插铣加工中的切削区温度场分布进行了研究。刘伟成<sup>[17]</sup> 对钛合金插铣过程中温度场的分布进行研究,建立了有限元分析的理论模型。上海交通大学陈明<sup>[18]</sup> 等针对叶轮流道插铣过程刀具弱刚性特点,建立大圆角插铣刀非对称插铣切削力模型与切削动力学方程,结合插铣模态试验获得基于振动微位移与“让

刀”位移的插铣切削力,对插铣切削参数进行优化。

### 2 插铣工艺技术研究现状

任军学<sup>[19-21]</sup> 等针对钛合金整体结构件粗加工过程中,插铣和侧铣加工工艺进行了研究并提出了在整体叶盘粗加工过程中,提高通道开槽切削效率是实现叶盘高效加工的关键。分析了插铣铣削工艺参数对试件表面质量和加工刀具磨损的影响。胡创国<sup>[22]</sup> 等人针对整体叶盘等复杂结构件,提出了一种开式整体叶盘通道的五坐标插铣粗加工方法。杨振朝<sup>[23]</sup> 分析了三向铣削力对铣削速度、每齿进给量和铣削深度的绝对灵敏度和相对灵敏度,研究了铣削参数对铣削力的影响规律。赵剑波<sup>[24]</sup> 对插铣切削性能进行了初步研究,为刀具结构设计和切削参数优化提供理论基础。赵伟<sup>[25]</sup> 分析了高速插铣加工的稳定性,并从理论粗糙度、切削速度和切削振动的角度分析加工表面粗糙度,从而建立插铣加工的表面粗糙度模型。张剑刚<sup>[26]</sup> 综合考虑切削温度、切削力、磨损、振动因素的影响,运用模糊数学理论建立铣刀片切削性能模糊综合评价模型。

### 3 插铣加工稳定性研究状况

国外 Ko, Jeong Hoon Altintas, Yusuf<sup>[1]</sup> 对插铣加工过程进行了时域建模,研究插铣的动力学和插铣的稳定性。Altintas<sup>[27]</sup> 研究了插铣加工过程的动力学与稳定性,建立插铣加工时域仿真模型,改模型在考虑刀具的切削误差和时间变量参数的影响的基础上,对切削力、扭矩、振动做出预测,并且建立颤振稳定性图。Shunsuke 和 Wakaoka<sup>[2]</sup> 对钛合金高速插铣过程中的表面粗糙度的加工精度和加工效率方面进行试验研究。Ahmed Damir<sup>[5]</sup> 对刚性和柔性工件插铣加工过程建立了时域仿真模型,预报切削力、扭矩、系统振动等。MAHDI EYNIAN<sup>[28]</sup> 研究了低转速下,过程阻尼系数的测量与建模,

预测车削、铣削产生颤振稳定性的临界切深。Yusuke KURATA<sup>[29]</sup> 通过切削试验确定过程阻尼系数,构建出了切削过程稳定域。Martin Witty<sup>[30]</sup> 研究了插铣性能与稳定性,利用切削参数和刀具的微观几何结构来分析刀具的稳态切削条件。Y. Altintas<sup>[31]</sup> 针对插铣阐述了频域和颤振稳定性的预测理论,描述了插铣的稳定性。

### 4 插铣加工刀具轨迹规划研究

Matthieu Rauch<sup>[32]</sup> 以刀具路径、机床动力学、加工特征属性为依据,通过对材料的有效去除率计算得到新方法改善插铣刀具路径。Hamdy Tawfik<sup>[33]</sup> 提出了多把插铣刀对型腔进行整体插铣的算法。该方法根据型腔轮廓作为边界,计算出插铣时的最优走刀方向,并由该方向控制型腔加工区域的离散化,用多把插铣刀对加工离散化区域实现填充,实现型腔整体加工的走刀路线规划和刀位轨迹计算。胡俊志<sup>[34]</sup> 等根据型腔转角面的几何特性及转角面几何信息,提出型腔转角插铣加工的刀位轨迹计算方法,此类方法适合各类型腔的转角粗加工。任军学<sup>[20]</sup> 针对封闭式整体叶盘通道开槽工艺问题,研究了叶盘通道五坐标开槽插铣加工方法,给出了闭式整体叶盘五坐标插铣刀位轨迹,该方法可有效实现闭式整体叶盘的五坐标开槽粗加工。王波<sup>[35]</sup> 针对冲击式水轮机整体转轮数控加工效率低等问题,提出用插铣的方法对转轮内表面进行高效开粗加工,并初步的解决了插铣刀超长刀柄的振动抑制,规划出避免干涉的刀位轨迹。

以上分别从动力学、加工工艺、切削稳定性、刀具轨迹规划方面对插铣加工进行研究,并取得了很好的成果,但都缺少对异型曲面高效插铣粗加工的研究。在大型异型曲面狭窄空间插铣加工时,需要进行刀具轨迹优化,根据异形曲面复杂的结构特点,将可行加工域与插铣刀位轨迹进

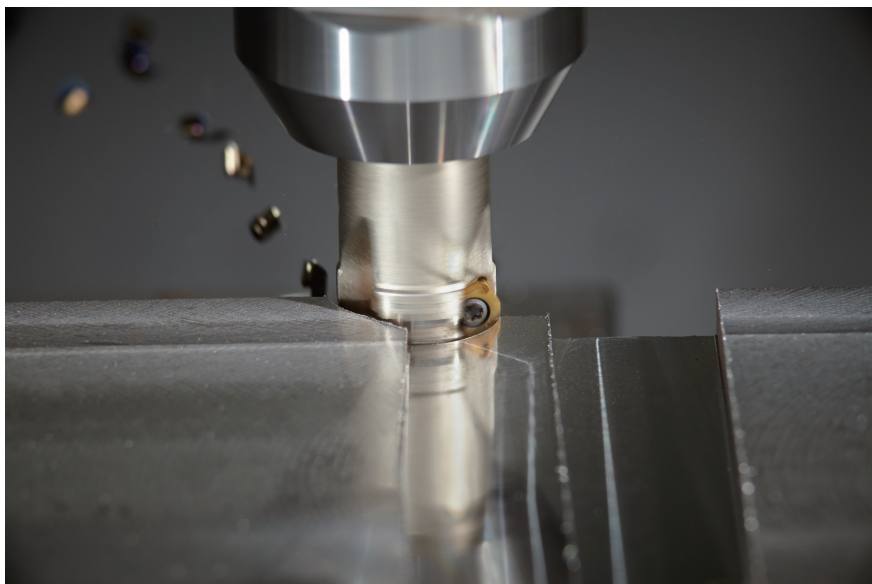


图3 山高公司R217/220.79-12A插铣刀

行规划,使粗加工材料去除量达到最大化,并且需要进行异形曲面插铣过程稳定性研究,插铣刀具的悬伸长度过长,使得刀杆的刚度很难保证,从而使得受力时容易发生弯曲,可能引起插铣过程中的颤振现象。因此对大型异型曲面插铣加工的研究还有很多工作要做。

### 结束语

回顾近年来插铣技术的研究进展,存在的不足及发展方向归纳如下。

(1) 对插铣过程主要集中在的铣削力、铣削温度的研究,刀具磨损方面的研究很少。通过控制铣削力、铣削温度等方面来减小刀具磨损,确定较好的加工工艺参数仍然很难实现。

(2) 插铣刀具的悬伸长度过长,刀杆的刚度很难保证,很多插铣刀具刃型刃口设计未考虑抑制强力插铣切削颤振对加工的影响,适用于复杂曲面插铣稳定性切削控制的理论尚未建立,因此插铣加工过程中会产生振动,影响加工效率和加工质量。

(3) 由于插铣加工编程软件自身模块的不完善和加工人员对插铣

加工的经验比较少,如何进行插铣加工刀具轨迹和插补算法等刀位轨迹优化技术的研究来选择最优化刀具路径的问题仍没有解决,这大大限制了插铣在数控加工领域的应用,阻碍了插铣技术的发展。

(4) 大多数计算机 CAD/CAM 编程软件中的插铣功能还不太成熟,插铣参数积累较少,无法计算出铣削过程中刀具的振动,不能解决稳定性的问题,具有高柔性、能够适应不同加工任务的适用软件开发方面还有很多工作要做。

(5) 缺少对大型异型曲面插铣加工方面的研究。应该在面向大型异型曲面插铣加工中,开展刀位轨迹规划与刀具轨迹优化研究,并进行异形曲面狭窄空间插铣稳定域的研究。

### 参考文献

- [1] Ko J, Altintas Y. Time domain model of plunge milling operation. *Int J Mach Tools and Manuf*, 2007(47):1351-1361.
- [2] Wakaoka S, Yamaneb Y, Sekiya K, et al. High-speed and high accuracy plunge cutting for vertical walls. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002(127): 246-250.
- [3] 唐国良. *Cimatron 系列一*

*CimatronCAD/CAM 范例入门*. 北京: 北京大学出版社, 2003.

[4] WorkNC 的使用经验, <http://bbs.nuguo.com/p16134p1>, 2009.

[5] Li Y. Force modelling for cylindrical plunge cutting. *Int J Adv Manuf Technol*, 2004, (16):863-870.

[6] Hoon J. Plunge milling force model using instantaneous cutting force coefficients. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2006, 7(3):8-13.

[7] Damir A, Ng E G. Force prediction and stability analysis of plunge milling of systems with rigid and flexible workpiece. *Int J Adv Manuf Technol*, 2010:1-25.

[8] 任军学, 刘博. Ti11 钛合金插铣工艺切削参数选择方法研究. *机械科学与技术*, 2010(5):634-641.

[9] 韩雄, 刘强. PH13-8Mo 插铣铣削力建模与分析. *航空制造技术*, 2010, 5:72-75.

[10] 田静云, 田卫军, 李郁. 钛合金 TC11 插铣铣削力建模与分析. *制造技术与机床*. 2009, 1: 98-101.

[11] Qi W G, Sun J J, Zhao J H, et al. A mathematical model and analysis of plunge milling force on aluminum alloy. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2007(1):32-34.

[12] 崔立强, 牛兴华. Cr12 插铣铣削力分析与建模. *天津理工大学学报*. 2012, 28(6):5-8.

[13] 杨振朝, 张定华. Ti11 钛合金插铣加工铣削力影响参数的灵敏度分析. *航空学报*. 2009, (09):1176-1181.

[14] 秦旭达, 赵剑波, 张剑刚, 等. 基于回归法的钛合金 (Ti-6Al-4V) 插铣铣削力建模分析. *北京工业大学学报*. 2006, 32(8):737-740.

[15] Huang J H, Liu X L. Tool path planning of 5-Axis finishing milling machining for closed blisk. *Materials Science Forum, High Speed Machining V*, 2012:153-158.

[16] 李晓宇. 钛合金插铣过程切削区温度分布研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008.

[17] 刘伟成. 基于有限元的钛合金插铣过程温度场研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009.

本文有参考文献 35 篇, 因篇幅所限, 未能全部列出, 读者如有需要, 请向本刊编辑部索取。

(责编 小城)