

基于航空结构件典型特征的数控加工方法优化探讨

Investigating on Optimization Techniques of NC Machining Process Based on Typical Characteristic of Aeronautical Components

成都飞机工业(集团)有限责任公司数控加工厂 韩 雄 汤立民
国防科技工业高效数控加工技术研究应用中心



韩 雄

成飞公司数控加工厂技术科副科长、高级工程师。长期从事大型航空结构件数控加工工艺技术研究工作,参与并组织完成了多项工艺攻关工作。参与完成的科研课题多次获得中航工业及成飞公司科技成果及管理创新奖。

近年来,国内航空制造业大量引入国际先进设备,整体硬件水平与国外相比已经不存在明显的差距,但是由于国内在高速加工、难加工材料切削机理等关键技术领域缺乏系统

数控加工效率低下已经成为一个普遍问题,不仅严重制约了我国航空工业的发展,而且造成了巨大的经济损失和资源浪费。本文从航空结构件的特点出发,提出了基于航空结构件典型特征的数控加工方法优化,在此基础上达到结构件加工的整体优化,以提高加工效率及质量。

的基础理论及应用研究,使得国内航空制造业在数控加工工艺方法及切削参数选择方面缺乏理论依据和系统工具,而主要依靠国外机床、工具厂商提供的通用数据或凭常规切削经验来选取相对保守的切削参数,未能充分地发挥先进设备应有的效能。数控加工效率低下已经成为一个普遍问题,不仅严重地制约了我国航空工业的发展,而且造成了巨大的经济损失和资源浪费。本文从航空结构件的特点出发,提出了基于航空结构件典型特征的数控加工方法优化,在此基础上达到结构件加工的整体优化,以提高加工效率和加工质量。

航空结构件典型特征

航空结构件是构成飞机机体骨架和气动外形的主要组成部分,从结构类型看,它主要包括框、梁、肋、接头等几类典型零件,虽然各类零件结构形式各不相同,但它们均由一些典型特征构成,对航空结构件的加工工艺方法研究可以转化为对各类基本特征的加工方法研究。

特征定义与其应用领域相关,不同领域所考虑的产品的基本元素不同,从加工的角度来看,特征被定义为与加工操作和工具有关的零部件形状、技术特性和工艺参数等。对于

飞机结构件典型加工特征,主要分为槽腔、筋和轮廓3大主要特征,每种主要特征又包含相应的子特征。

典型特征加工工艺方法研究

本文采用仿真及实验分析、工程应用相结合的方式对航空结构件典型特征的数控加工进行探讨,在归纳典型特征加工方法的基础之上,借助几何仿真、有限元分析、动力学仿真及已有理论进行分析,以规范加工方法、优选参数。

1 研究与实验平台的搭建

为开展系统的加工工艺方法研究,搭建了仿真及实验平台:选用VERICUT软件作为主要的几何仿真工具;选用北航自主开发的铣削动力学仿真系统SimuCut及商品化仿真软件Third Wave Systems(主要包括有限元切削仿真软件Advantedge FEM、工艺优化仿真软件Production Module等)实现物理仿真;搭建了铣削力测试平台;建立了模态实验测试系统。

2 典型特征加工工艺方法研究

对于各种典型特征的数控加工而言,加工方法(主要包括进退刀方式、走刀方式及切削参数)的合理选择,直接影响零件的加工质量和效率,同时对机床及刀具的使用寿命也产生很大的影响。

(1) 槽腔加工分析。

槽腔是航空结构件中最常见的一类加工特征,主要在粗加工过程中进行,而加工效率是其首要考虑的因素,因此,本文重点对槽腔加工中影响加工效率的进退刀、走刀方式进行探讨。

a. 进退刀方式。

槽腔加工主要采用直线、折线及螺旋3种进刀方式,退刀则主要采用直线和圆弧退刀2种方式。在选择进刀方式中,下刀角度是影响切削平稳性(受切削力及其方向的改变影响较大)及加工效率的主要因素,当

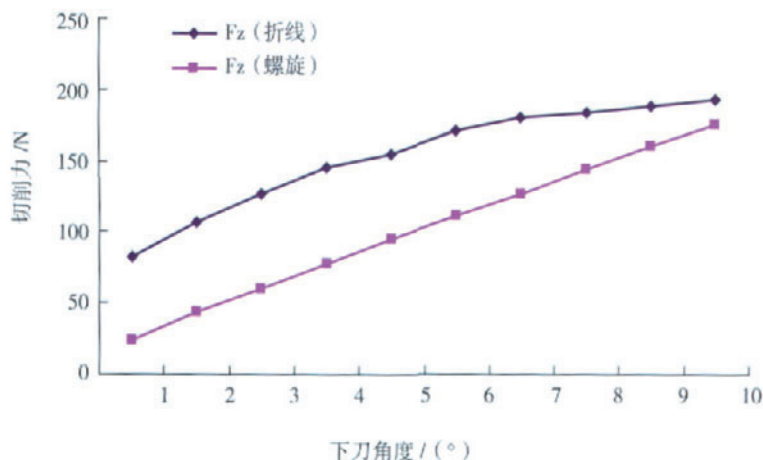


图1 折线下刀与螺旋下刀切削力对比

下刀角度较小时切削平稳但切削效率低,下刀角度较大时切削效率提高,但切削力增大、切削状态变差。

在Production Module平台下,采用不同的下刀角度对切削力进行仿真,如图1所示,由于进刀切削过程中X、Y方向分力受走刀轨迹方位的影响,反映工件受力变化趋势不显著,因此实验分析过程中主要对轴向分力(图1中 F_z)进行分析。其仿真条件为: $\phi 20\text{mm}$ 立铣刀(刀具螺旋角为 30°)切削材料为铝合金材料7050;转速 $20000\text{r}/\text{min}$,下刀速度 $2000\text{mm}/\text{min}$,轨迹区域为2倍刀具直径。

图1所示,对折线进刀与螺旋下刀进行切削力对比分析,下刀角度在

10° 以内时螺旋进刀切削力较折线进刀小(图中以轴向分力进行对比,合力情况类似),且目前西门子等控制系统支持螺旋插补,加工过程连续,没有受力突变,较折线进刀更为稳定。实验过程中对垂直进刀进行了仿真,在相同条件下其轴向分力 F_z 为 292N ,远远大于其它2种方式。

对比上述几种进刀方式可知,有一定切入角度的进刀方式对刀具载荷的影响比垂直进刀方式对刀具载荷的影响要小很多。相同下刀角度条件下,螺旋进刀时铣刀轴向载荷最小,所以在加工薄壁等对轴向载荷敏感的零件,应优先选择螺旋进刀;对于内部有足够走刀空间的封闭腔体,优先选择螺旋进刀方式;对于狭长

表1 加工仿真时间结果对比表

加工方式		行切加环切 仿真时间 /min	环切 仿真时间 /min	比值
无岛屿	$1000\text{mm} \times 500\text{mm} \times 22\text{mm}$	62.67	64.02	0.98
	$500\text{mm} \times 250\text{mm} \times 22\text{mm}$	17.71	17.89	0.99
	$250\text{mm} \times 125\text{mm} \times 22\text{mm}$	6.01	6.02	1.00
带岛屿	$1000\text{mm} \times 500\text{mm} \times 22\text{mm}$ 岛屿 $\phi 360\text{mm}$	56.94	54.38	1.05
	$500\text{mm} \times 250\text{mm} \times 22\text{mm}$ 岛屿 $\phi 120\text{mm}$	19.66	19.55	1.00
	$250\text{mm} \times 125\text{mm} \times 22\text{mm}$ 岛屿 $\phi 60\text{mm}$	7.80	8.52	0.92

空间可选用折线进刀；而当槽腔为开口槽腔时可在零件外部进刀，或零件已预钻进刀孔情况下，可选用垂直进刀，其效率更高。在退刀时主要保证刀具平缓离开工件以防止在已加工表面产生刀痕，影响加工表面质量。

b. 走刀方式。

对于走刀方式的分析，主要考虑加工余量的均匀性及加工效率的高低。目前，在航空结构件槽腔加工中，采用最多的是环切和行切加1圈环切（清除行切残留）2种走刀方式。为更准确地分析两种走刀方式的效率，在充分考虑机床加减速等特性参数基础上开发了加工时间仿真软件，将槽腔分为带岛屿和不带岛屿2种典型情况进行仿真分析。

仿真结果如表1所示，对于无岛屿槽腔，2种方式的效率大致相当，但槽腔较大时采用行切加1圈环切的方式效率较高，在开敞空间直接采用行切方式加工效率更高；对于带岛屿槽腔，在槽腔结构较小时，行切加环切方式效率更高，但槽腔尺寸增大时，2者差异逐步缩小。因此，在零件刚性较好的情况下，采用行切加

环切方式综合效率更高。

(2) 筋加工分析。

筋的加工指筋条及缘条顶面的加工，参与切削的部位主要为刀具底部圆角，其切削条件类似于端铣。而端铣分为对称铣、不对称逆铣、不对称顺铣3种铣削方式，所选方式不合理会使加工振动增大，甚至产生刀具崩齿现象，给产品带来质量隐患。

仿真比较3种铣削方式，设计出“一”字形筋，筋条宽度为3mm，长度为200mm，筋条最高高度为40mm，并设计平顶筋及带一定角度的3种斜顶筋，均按对称铣、不对称逆铣、不对称顺铣3种方式加工，采用Production Module平台进行仿真（仿真条件同前述一致），仿真结果如图2所示。

根据上述仿真分析并结合切削实验验证可知，加工筋顶应当在筋条刚性较好的情况下进行，并避免采用对称铣削方式；平顶筋加工应尽量采用不对称逆铣；在斜顶和曲顶筋加工过程中，优先选用不对称顺铣，当筋条坡度较大时应选择自下向上铣削。

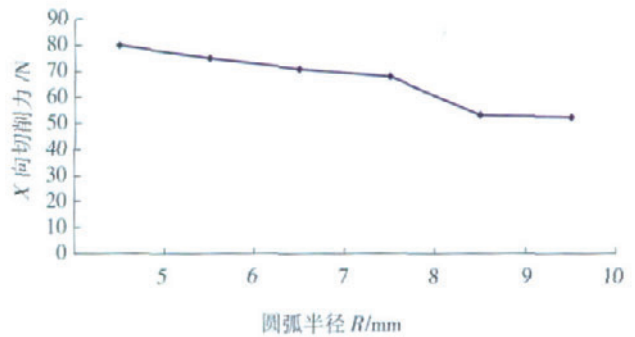


图3 进刀圆弧半径与切削力关系

变化越大，切削力越大，对零件侧壁表面质量影响越大，但圆弧半径过大会导致走刀路径过长，通常选择 $(0.3 \sim 0.5) \times D$ (D 为刀具直径)的圆弧半径。

几种典型难加工子特征加工艺方法探讨

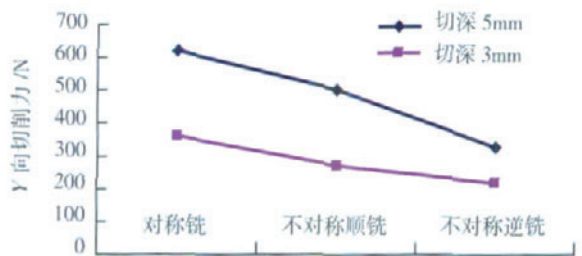
为满足飞机减重要求，航空结构件大量采用薄壁结构，加工过程中材料去除率非常高（通常超过90%），为典型的弱刚性、复杂结构零件。航空结构件的上述特点使其数控加工较为困难：拐角半径通常较小，精加工所使用刀具长径比较大，切削状态差；薄壁部位在加工过程中容易产生变形及颤振，尺寸精度及表面质量难于保证。拐角、薄壁等难加工部位作为航空结构件典型加工特征的附属特性，必须得到更为深入的研究，找出合理解决方案，以提高典型加工特征的加工质量及效率。

1 拐角加工工艺优化

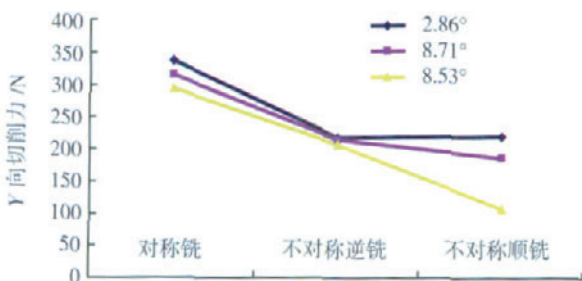
(1) 拐角加工分析。

在航空结构件加工中，不可避免地会遇到拐角区域的加工，如果在拐角处采用直线轨迹时，铣刀的切削弧长发生了突变，而每齿平均铣削力与切削弧长相关。因此，平均铣削力在拐角处也发生了突变。

此时，铣刀中心点位于轨迹线尖



(a) 平顶筋



(b) 斜顶筋

图2 筋加工仿真结果

角顶点的位置,瞬时的铣削力从最大跌至最小,但瞬间又降至拐角铣削前的平均铣削力。

实际加工过程中,为避免进给方向的突变,通常在拐角处采用圆弧过渡加工轨迹线的方式进行加工。铣刀切削弧长变化要小于尖角加工的方式,平均铣削力的变化也缓和很多。因此,通过改变轨迹线可以大大缓解拐角处铣削力对刀具和工件的冲击。

通过上述分析可知,改变拐角处的走刀轨迹可有效改善拐角加工的切削状态。由此国内外学者做了大量理论及实验研究,总结并研究出一些有效的加工方法,常见的拐角加工策略有靠刀法、留余量行切法、细化圆角法、单圆环加工法、双圆环加工法等,这些拐角加工优化方法在一定程度上提高了拐角加工的质量和效率,但当刀具长径比较大时(一般超过 5:1),上述方法就无法从根本上解决拐角加工的质量及效率问题。

(2) 拐角的插铣加工。

插铣(Plunge milling)又称为Z轴铣削,加工过程中刀具沿主轴方向做进给运动,利用底部的切削刃进行钻、铣组合切削。因插铣加工变径向进给为轴向进给,从而大幅度降低了刀具的径向切削力,并能保持切削力大小的稳定,从而减小加工中工件及刀具的变形,避免切削颤振的产生,对拐角及深腔加工具有重要意义。目前,部分航空制造企业已经引入插铣工艺方法,在零件精加工前进行拐角的插铣加工,一方面从根本上解决拐角加工难题,另一方面还可大大提高航空结构件精加工效率。

2 薄壁加工工艺优化

薄壁部位在加工过程中容易产生变形及颤振,加工质量难于保证,国内外学者根据不同零件结构及变形因素提出了多种工艺方法,如日本岩部洋育等人提出的平行双主轴加工方法,日本 Haruki OBARA 等人

提出了低熔点合金辅助切削方案, J. Flusty, S. Smith 等人提出了充分利用零件整体刚性的切削加工方案等。

为了对薄壁加工过程进行深入分析,设计“日”字形铝合金薄壁结构工件作为实验对象,工件长 360mm,宽 250mm,高 30mm,各处壁厚均为 1mm。首先采用传统方式进行加工,在粗加工过程中周边及底部均留有 3mm 余量,精加工过程中缘条侧面产生明显振纹,即使减小切削参数也无法完全避免。

在加工实验件所用翻板铣 AEROSTAR 机床上,对 $\phi 20\text{mm}$ 整体硬质合金铣刀进行锤击实验,在不考虑工件刚性的情况下得到颤振稳定域曲线,如图 4 所示。

再根据工件有限元仿真结果,选择工件刚性最薄弱的部位(各筋条及缘条靠近中间顶部)进行锤击实

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得到弱刚性情况下的颤振稳定域如图 5 所示(考虑工件动态特性),与图 4 对比,稳定域取值很低,非常容易发生颤振。

改变原有加工方法,根据基于“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高效率的切削参数(切宽 $a_e=20\text{mm}$; 切深 $a_p=4\text{mm}$; 进给速度 $f=10000\text{mm}/\text{min}$; 主轴转速 $n=21000\text{r}/\text{min}$)后,采用“层优先”方式加工。采用此方法可以保证刀具每次加工薄壁时均对薄壁的根部进行加工,可以看作刀具仅对工件的根部位置激振,此时形成的“机床-刀具-工件”系统基本可以视刀具接触的工件局部位置为刚性体,从而实现无颤振的高效加工,加工表面质量得到明显改

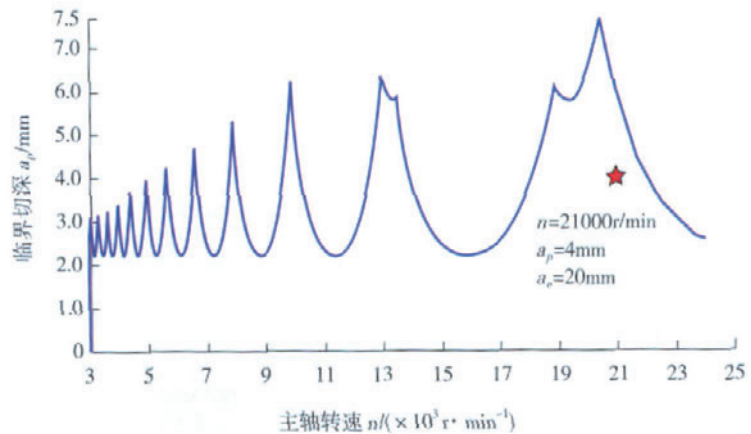


图4 “机床-刀具”系统颤振稳定域仿真

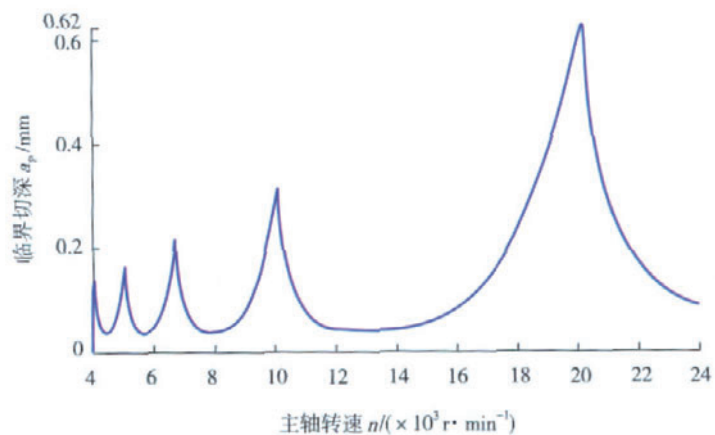


图5 “机床-刀具-工件”系统颤振稳定域仿真

善。

基于上述原理,保持铣削过程工艺系统刚性的加工方法还可推广到其它一些方式,如常见的“阶梯铣”、“错层铣”等,这些方法的本质都在于使加工过程中被加工区域具有足够刚性,以避免加工颤振及变形的产生。

工程应用验证

通过前述内容的研究,规范了典型特征的加工工艺方法,并提出了拐角、薄壁等难加工部位数控加工解决方案,结合成飞公司实际情况编制了规范,以指导实际生产,并选择转包项目的接头、壁板等典型航空结构件对前述研究内容进行了应用验证。

1 接头深腔零件工艺优化

接头类零件是连接主要承力部件的连接件,零件上分布有装配基准面及交点孔等,结构形式复杂、精度要求高,其中的窄槽深腔结构加工非常困难。如一项典型波音 787 金属接头,零件毛坯尺寸为 450mm×160mm×140mm,槽腔较深,因刀具刚性不足而产生振动时常导致零件加工故障,给产品带来严重质量隐患。

(1) 工艺方法优化。

该零件槽腔深约 100mm,转角半径 7mm,所使用刀具长径比超过 7 : 1,为典型深腔结构。当刀具长径比大于 4 时,刀具的切削状态急剧下降,为改善切削状态,在工程实际中通常采取降低切削参数的方式,但这种方式不但显著降低零件加工效率,且零件的拐角加工质量仍无法得到有效保证。

改善原有工艺方法,在精加工前对拐角进行插铣加工,经过插铣后的拐角余量很小,精加工时的切深比靠切方式加工切深可提高 4 倍,并避免了拉刀现象。

(2) 优化结果。

波音 787 金属接头零件共 12 项,自正式投产以来共加工零件 200 余件,其中发生故障零件 17 件,故障率高达 8%;经过工艺优化,投产 100 余件,故障零件仅 1 件,故障率降低至 1% 以内,同时加工效率提高 23%。

2 壁板类零件综合优化

壁板类零件长、宽方向结构尺寸较大,厚度方向尺寸较小,为典型的薄壁结构零件,加工中极易产生变形。如一项典型的空客机舱壁板,

零件毛坯尺寸为 2800mm×1200mm×60mm,壁板及筋条最薄处仅 1.5mm,材料去除率达到 96%。该类型零件由于定型较早,切削参数及走刀轨迹不合理,在质量及效率上均不能满足实际生产需求,急需得到优化。

(1) 工艺方法优化。

针对上述存在的加工问题,结合前述研究结论从 3 个主要方面对壁板的加工方法进行优化。

a. 工艺方案优化。优化筋顶加工方式:对筋顶走刀方式进行优化选择;采用插铣工艺:对部分深槽区采用插铣加工;精度孔大量使用钻铰刀;省略外形粗加工。

b. 切削参数优化。结合 DynaCut 动力学测试分析及 SimuCut 仿真系统,采用保持铣削过程工艺系统刚性的薄壁加工方法全面优化切削参数。

c. 轨迹优化。通过调整铣削行距以简化轨迹数量、减少拾刀次数以及优化轨迹减少机床加减速。

(2) 优化结果。





通过工艺方案、切削参数及加工轨迹的全面优化,采用现场 DNC 系统跟踪验证机舱左侧壁板加工全过程,机床切削平稳(动平衡值小于 1.7)、功率稳定(40%~60%)、扭矩较小(小于 9N·m),所有程序按 100% 加工、无人工干预。如表 2 所示,零件整体加工效率得到大幅提升,钳工打磨量大幅减少,达到了预期的优化效果。

结束语

本文从航空结构件的特点出发,结合仿真及实验分析对部分典型特征的加工方法进行优化探讨,并进行了工程化应用,取得了良好成效。但航空结构件数控加工方法研究所涉及的内容纷繁复杂,在基础理论和工程应用等方面还需要进一步展开深入研究。

(责编 泰山)

表2 优化结果表

零件图形	比较项	优化前	优化后	提高效率
	实际加工时间	19 H	12.5 H	52%
	钳工打磨量	大	不打磨	
	实际加工时间	19.5H	12.5H	56%
	钳工打磨量	大	不打磨	
	实际加工时间	20H	13.5H	48%
	钳工打磨量	一般	不打磨	
	实际加工时间	19H	11H	72.7%
	钳工打磨量	较大	不打磨	