



航空发动机风扇/压气机叶片 制造关键技术*

Key Technology of NC Machining for Aeroengine Fan/Compressor Blade

中航工业西安航空发动机(集团)有限公司
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

李海宁 赵赟
史耀耀 姚倡锋 谭靓



李海宁

机械制造及其自动化专业博士,研究员级高级工程师,中航工业西安航空动力股份有限公司副总经理、总工程师,国防科技工业难加工材料加工技术研究应用中心理事长,陕西省航空学会副理事长。

随着航空发动机涵道比、推重比及服役寿命的不断提高,叶片结构更趋复杂(如薄壁、宽弦、弯掠),且尺寸更大、材料更难加工、精度要求更高。新结构、新材料的采用对叶片制造技术提出了更为苛刻的要求。

风扇和压气机叶片是航空发动机的核心零件,其制造品质直接影响着发动机的服役性能和寿命。随着航空发动机涵道比、推重比及服役寿命的不断提高,叶片结构更趋复杂(如薄壁、宽弦、弯掠),且尺寸更大、材料更难加工、精度要求更高。新结构、新材料的采用对叶片制造技术提出了更为苛刻的要求。

目前世界各著名发动机制造公司都投入了大量的人力、财力和物力对叶片制造技术进行研究,寻求低成本、低污染、高效率、高质量的叶片先进制造技术,以满足航空发动机对叶

片制造的需求。我国航空发动机制造企业在叶片装夹手段、切削工艺、制造软件支撑、抛光工艺等方面存在一些亟待解决的问题。本文综合国内外航空发动机叶片制造中的主要问题,系统地对风扇/压气机叶片制造关键技术研究现状进行分析和论述。

风扇/压气机叶片制造的关键技术

1 叶片高效精密加工专用工装设计与制造

航空发动机叶片是典型的薄壁

* 国家科技重大专项(2013ZX04011031)资助。

结构,进行机械加工时装夹十分困难。如果装夹不合理,加工过程中易产生加工变形,表面加工质量将更加难以控制。传统夹具的稳定性不高,在刚度最弱的叶尖部位是顶尖式装夹方法,不能承受较大的切削力;而且传统夹具对叶片施加的是预紧压力,会加大叶片的“让刀”变形。针对薄壁叶片的结构特点,需对传统夹具进行结构优化设计,使优化后的专用夹具能够实现薄壁叶片精确定位,并提高切削系统的刚度,保证叶片加工精度。

薄壁叶片铣削夹具设计时应满足以下的基本要求:

(1)定位要准确:定位准确是叶片铣削夹具的基本准则,榫根处为叶片的定位面,因此夹持榫根处的部位精度和位置度要满足要求。

(2)夹具结构要尽量简单,以方便操作。

(3)稳定性要高,叶片在加工过程中,叶尖部位的刚度最弱,因此在叶尖处应该尽可能多的限制自由度,提高系统的可靠性。

(4)预紧拉力:在叶片两端施加合适的预紧拉力会在叶片内部产生内应力以阻止“让刀”变形。

在某型号叶片的专用夹具设计过程中,对叶片榫根部位进行过定位,叶尖采用凸台螺钉联接,通过偏心销轴的设置,利用偏心销轴的自锁来实现夹紧,使叶片加工的时候有一个预紧的拉力,这样可以有效减小加工中叶片在切削力的作用下产生加工振动和变形。该夹具结构简单,安装方便,定位精度高,可多次装拆而不影响定位精度,因此,不但可以提高薄壁叶片的加工精度和质量,而且可提高数控加工效率。

2 叶片加工过程颤振与变形控制技术

随着航空发动机向着大功率、高负荷、高性能发展,导致叶片长度不断增加和厚度不断减小,进而叶片的

刚性越来越小,叶片发生气动弹性不稳定性-颤振的可能性愈来愈大。颤振是困扰现代航空发动机叶片发展的主要障碍之一,很多叶片断裂事故都是由于颤振造成的。另一方面,由于叶片结构复杂、叶型厚度薄、刚性差、加工刀具切削力较大的特点,在加工过程中切削力的作用下极易发生弹性变形,这是导致加工误差的主要原因之一。同时在切削颤振、切削热、残余应力等因素的影响下,也会产生变形,使加工精度无法保证,严重时甚至造成零件的报废。因此颤振和变形控制技术是保证航空发动机叶片加工精度和加工质量的关键问题。

加工颤振的抑制方法目前主要包括在线预报控制和离线预测控制2种。在线预报控制通过监测加工系统的实际工作状态,及时提取颤振的特性信号,并通过预先设定的控制策略避免颤振的发生^[1]。这类方法弥补了对切削稳定性理论研究的不足,但对预测系统的容错能力、颤振控制策略和判断速度提出了较高的要求。颤振离线预测控制方法主要是通过调整切削工艺参数和改变切削系统结构来抑制颤振。其依据是系统的切削参数稳定性极限图。因此,获取切削参数稳定性极限图是颤振离线预测控制的关键所在,目前主要有三种方法,即时域仿真方法^[2]、半解析方法^[3]和解析方法^[4]。另外,在对再生颤振进行了比较全面的研究之后,一些学者提出采用主动振动阻尼方法进行加工过程中颤振的抑制^[5-6]。上述研究大多是在端铣等简单切削条件下对加工过程中的颤振进行抑制,并不涉及具体薄壁零件加工过程中的颤振问题。通过切削试验的方式对复杂薄壁曲面零件加工过程中的颤振抑制问题进行研究是解决该问题的另一种研究方法^[7-8]。

针对薄壁件数控加工变形的控制,目前国内外的研究多采用数值模

拟技术进行研究。Law^[9]根据悬臂梁理论分析计算刀具的加工挠曲规律,并建立了端铣型腔时的刀具变形误差补偿模型。Kim^[10]则将铣削刀具的刀杆和刀齿部分近似处理成具有不同直径的两段圆柱悬臂梁,以预测刀具变形量的大小。郑联语^[11]提出了通过数控加工前期的预防性仿真分析与减小工件变形的数控工艺设计过程范式。武凯^[12-14]等对不同切削参数下铣削力变化规律以及因铣削力引起的加工变形进行了理论分析与试验研究,并以此为基础提出了薄壁件高速铣削切削参数选择原则。余伟^[15]建立了薄壁件残余应力分布模型及变形分析模型,并进行了实验验证。胡创国^[16]、楼文明^[17]针对典型薄壁件的加工变形问题,采用有限元方法并结合悬臂梁理论,建立了刀具和工件变形的数值计算模型,通过该模型预测加工过程中的变形并进行优化切削参数的选择。

3 叶片高速切削技术

目前航空发动机叶片大多采用钛合金、高温合金等难加工材料,其具有轻质、高强、耐高温、抗疲劳等优异性能。据统计,在商用航空发动机和军用航空发动机中钛合金的含量分别占到其重量的30%和40%左右。由于叶片的薄壁结构,这常常要求把毛坯的绝大部分当作加工余量切除掉,从而要求很高的加工效率。对于钛合金这种典型的难加工材料而言,用传统的加工方法很难或者需要很高的成本才能达到上述要求,目前生产中采用高速钢刀具切削钛合金的切削速度一般不超过30m/min,硬质合金推荐的切削速度约在40~60m/min。因此,高速切削(High Speed Machining, HSM或High Speed Cutting, HSC)技术成为提高叶片加工效率和加工质量的有力武器,其切削速度可以提高到100~1000m/min。

叶片高速切削技术是以表面完整性控制为基础,通过对加工过程中

工艺参数、工艺方法、测试方法等的控制和优化,不仅提高叶片数控加工效率、缩短加工周期,同时还着重控制表面粗糙度、表层残余应力、表层显微硬度等表面完整性特征的叶片加工新技术和新方法。因此需充分发挥企业购置的高速铣削加工中心的加工能力,研究叶片高速铣削参数对刀具磨损、表面质量的影响规律,突破叶片高速铣削刀具结构设计、高速切削参数优化、加工余量优化设计、高速切削刀轨规划与优化等关键技术,进一步提高航空发动机制造企业的叶片数控加工效率和加工质量。

4 叶片的自适应加工技术

随着数控技术在现代制造业中的广泛应用,自适应加工的相关理论也获得了迅速发展。目前,广义的自适应加工按照控制时间的不同分为3种形式:一是数控编程时刀位轨迹的自适应规划^[18-24];二是与数字化检测相结合的自适应加工^[25-28];三是加工过程中数控系统的自适应控制^[29-32]。

以上3种自适应加工形式密不可分,互相关联。其中,刀位轨迹的规划是后2种自适应加工的基础;自适应数控系统则是将自适应控制技术应用于切削加工过程中,使得数控机床具有根据加工状况实时、自适应性地调整切削参数的能力,并在保证系统稳定运行的条件下,尽量发挥出它的加工潜力,提高切削效率,保护刀具;而与检测相结合的自适应加工也需要借助数控系统的若干功能模块,如机床坐标系设置、NC代码转换等。

自适应加工技术在航空发动机精锻/辊轧叶片中应用较为广泛。一方面,航空发动机精锻/辊轧叶片受工艺变形影响,其设计模型无法直接应用于数控加工编程。目前的方法大多采用逆向工程的建模方法,直接进行特征区域建模。然而,直接建模的精度往往无法满足要求。因此,

应合理利用设计模型,发展基于设计模型的工艺几何自适应建模方法,以精确描述特征区域的几何形状变化,使其满足数控加工的精度要求。另一方面,精锻/辊轧叶片毛坯的形状多样、余量分布也各有不同。目前采用普通的夹具往往难以保证带余量叶片毛坯的装夹和定位精度,而设计专用的夹具则成本高、周期长。基于数字化检测的叶片加工余量优化不失为一种有效的处理方法。通过典型叶片毛坯的余量分布特征分析,建立余量优化数学模型,并构建层次定位优化策略自适应地控制叶片定位及余量优化过程。

5 叶片加工的在机测量技术

叶片精密加工中心与在机测量结合,已经使得传统的叶片加工工艺有了质的飞跃。如今,可以通过在机测量对整个加工过程进行监控,得到大量的过程数据,可以对任何一个可能产生加工问题的工序段进行检验分析,使得工艺参数调整变得直观,对新产品的研发作用甚大,已成为此类加工的标准配置。如图1所示,机床加配自动工件交换单元,再配以大容量的刀库和高精度对刀仪,从叶片定位到加工成合格零件,“一个按钮模式”的加工模式已经在实际生产中实现。

在机测量与三坐标的最终检测在方法上存在许多区别。三坐标终

检一般是对所有叶片进行全检,检查叶片尺寸精度与轮廓精度,加工环境优越,自建坐标系,检测数据客观。而在机测量技术主要是应用于加工机床上的现场检测,具有以下几方面的优势^[33-38]:

(1)在叶片的测量过程中减少工序测量中拆卸、搬运和装夹等操作,简化了工艺流程,实现了叶片加工过程中的自动测量,降低经济和时间耗费,提高加工检测效率。

(2)为叶片的快速检测提供了一种很好的方法,为叶片现场加工质量的评定和测量误差的分析提供了方便。

(3)为加工工艺的制定提供实际依据,在叶片加工中可以分析在机测量的误差信息,从而为自适应加工打下了基础。

6 叶片表面完整性控制技术

随着对航空发动机叶片质量要求的不断提高,表面完整性的概念受到越来越多国内外学者的重视。叶片加工表面完整性控制技术主要包括两方面的内涵:一方面是针对航空发动机叶片的自由曲面特征、阻尼台多曲面特征、进排气边、榫头以及榫板等特征,通过控制加工的刀具参数、铣削方法和铣削参数等,实现叶片铣削表面完整性控制;另一方面,针对叶片的抛光,通过控制抛光磨具磨料以及抛光参数等,实现叶片抛光

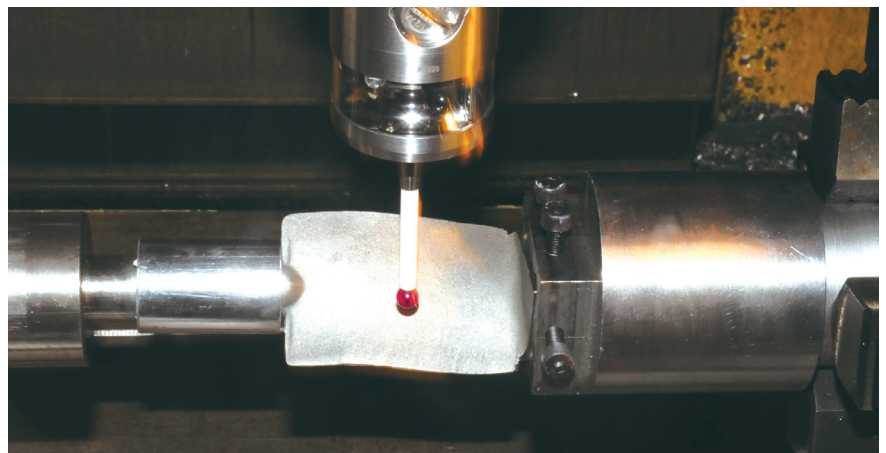


图1 叶片在机测量

的表面完整性控制。要实现叶片的表面完整性控制,需要从以下几方面进行深入研究:叶片多轴加工无干涉刀位轨迹生成、叶片曲面多轴加工运动学优化、叶片曲面多轴加工参数优化、叶片曲面多轴加工专用装备研发。

随着抗疲劳技术的不断发展,表面强化技术也逐渐应用到叶片的制造领域,其中喷丸强化和激光冲击强化的应用最为广泛。喷丸强化是借助金属弹丸或玻璃弹丸以很高的速度撞击金属表面的一种冷变形制造工艺;而激光冲击强化技术是利用强脉冲激光产生的冲击波,从部件表面引入残余压应力的一种革新且最热门的表面强化技术。激光冲击强化技术在部件表面形成的残余压应力深度比常规喷丸强化处理的深5~10倍。美国激光冲击强化技术公司针对F101-GE-102发动机风扇叶片进行了喷丸强化与激光冲击强化对叶片疲劳特性影响的比较研究。表面强化技术能够显著提高叶片的抗疲劳强度、延长疲劳寿命、抑制裂纹的形成与扩展、提高抗微动疲劳/抗磨损/抗应力腐蚀断裂特性等。

我国航空工业开展表面完整性控制技术的研究较晚,因此作为提高叶片服役中抗疲劳性能的一种非常有效的方法,应该完善叶片表面完整性控制工艺,使之能达到工程应用的要求,推动航空发动机叶片加工产生质的飞跃。

7 叶片高效精密数控加工专用工艺软件系统

多轴数控加工技术一直是航空发动机风扇、压气机叶片的主要制造手段。然而,目前我国航空发动机制造企业采用的编程系统、切削刀具、数控机床以及质量检测系统几乎完全依赖进口,国产软件及工艺装备几乎空白,这不仅严重阻碍了我国航空发动机的自主研发进程,更对我国的国防安全提出了严峻的挑战。因此

亟需开发一套国产航空发动机叶片高效精密多轴数控加工工艺软件系统,其中包括的关键内容主要有叶片高效精密加工工艺数据库和叶片多轴加工自动编程系统。

叶片高效精密加工工艺数据库存储和管理叶片类零件快速工艺准备所需的数据信息、图形信息和规则知识等基础数据。对叶片类零件特点及需求分析表明,叶片类零件虽然形状复杂,但其分类明确,同类零件间有较大的相似性,可在成组技术的基础上建立典型工艺子库(通过对典型工艺的编辑、修改,生成新的加工工艺)、含资源数据及资源状态的动态资源子库(动态的反映加工环境状况,合理选择资源)、适于描述图形信息的软件平台及工程数据库管理系统、资源管理系统(利用专家系统及动态资源状态库,进行资源选择的决策,给出突发事件的处理建议)。

随着微电子、自动控制 and 数控加工技术发展日益迅速,自动控制编程和加工技术向着集成化、智能化、并行化的方向发展。对于叶片类复杂曲面零件可利用CAPP/CAM技术进行自动编程系统开发,分别采用优先级分级检索策略和加工模板技术,对CAPP/CAM中的相似性进行挖掘与处理;并通过运用UG二次开发技术和SQL server数据库技术开发出数控自动编程系统,对从CAPP/CAM中挖掘出的相似性加以利用,实现UG平台上加工模板定制与CAPP工艺的匹配和数控自动编程。

8 叶片自动化、智能化生产线技术

在风扇和压气机叶片加工中,采用数字化、自动化和智能化控制技术可提高生产效率、缩短生产周期、稳定加工质量降低生产成本、提高经济效益,实现叶片制造的专业化、规模化生产。

国外GE公司发动机部GEAE在1998年制订实施了航空发动机异地协同设计和制造的增量式发展规

划,取得了显著的效益。罗·罗公司建立了发动机典型零件的自动化生产线和协同的计算机工作环境,实施了并行工程,从整体上增强航空发动机的研制能力。普惠公司采用集成产品开发团队的形式来管理发动机全生命周期内的计划、流程、技术、信息等经济技术活动,建立先进的数字化化工厂。

国内相关企业、部分科研院所、高校也正在积极开展叶片数字化精加工生产线、压气机叶片精密锻造生产线的研究工作,但是与国外先进企业相比还存在很大差距,必须突破以下主要关键技术:叶片加工的“硬”装夹技术,叶片自适应高速铣削技术,自动化数控抛光技术,叶片快速测量与精度评估技术,叶片生产线统一标准工装设计制造技术,物料机械手自动化运输与控制技术,叶片生产线监控、调度与过程控制技术。以上关键技术的突破能够实现叶片加工工艺技术水平质的提升,解决叶片的市场需求和实际产出能力的差距。

结束语

本文总结分析了航空发动机风扇/压气机叶片制造中的关键技术。综观航空发展的历史,发动机推重比的不断提高对发动机叶片提出了更高的要求。因此,在航空发动机预先研制和型号研制之前,应更加提前进行叶片加工新材料、新制造技术的基础研究和工程化应用研究,建立高水平的航空发动机叶片制造技术体系,以及与之配套的标准、规范、手册、工艺软件系统和数据库,才能为叶片先进制造工艺技术航空发动机研制中的应用和发展奠定坚实的技术基础。

本文共有参考文献38篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 小城)