

钛合金宽弦空心风扇叶片数控切削加工关键技术

徐九华¹ 赵正彩¹ 傅玉灿¹ 李志强² 邵杰² 韩晓宁² 袁士平²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016; 2. 北京航空制造工程研究所, 北京, 100024)

摘要: 数控切削加工是最终保证钛合金宽弦空心风扇叶片制造精度的重要技术手段。分析了采用超塑成形/扩散连接技术制作的钛合金宽弦空心风扇叶片结构特征以及毛坯状态, 指出了后续的数控切削加工应突破复杂曲面结构测量、加工变形控制以及切削加工误差补偿等关键技术。提出了开发集测量、分析和加工为一体的数控切削加工集成系统的研究思路, 可为实现钛合金宽弦空心风扇叶片加工精度的精确控制提供指导。

关键词: 宽弦空心叶片; 数控切削加工; 复杂曲面测量; 加工变形; 误差补偿

中图分类号: TG50 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2014)05-0659-08

Key Technologies of NC Machining of Titanium Wide Chord Hollow Fan Blade

Xu Jiuhua¹, Zhao Zhengcai¹, Fu Yucan¹,

Li Zhiqiang², Shao Jie², Han Xiaoning², Yuan Shiping²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics &

Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Beijing Aeronautics Manufacturing Technology Research Institute, Beijing, 100024, China)

Abstract: NC machining is considered as a vital way to finally ensure the machining accuracy of titanium wide chord hollow fan blade. Structure features and complicated dimension state of titanium hollow fan blade blanks formed by superplastic forming and diffusion bonding (SPF/DB) method are analyzed. Key technologies, including complex surface measuring, machining distortion controlling and error compensation in NC machining of titanium wide chord hollow fan blade are indicated. To precisely control the machining accuracy, a research approach that establishes an integrated system of measuring, analysis and machining in NC machining of titanium wide chord hollow fan blade is proposed.

Key words: wide chord hollow fan blade; numeric control machining; sculptured surface measurement; machining distortion; machining error compensation

航空涡轮风扇发动机(简称涡扇发动机)具有推力大、耗油低、噪音小及使用寿命长等特点,从 20 世纪 70 年代开始逐步取代航空涡轮喷气发动机(简称涡喷发动机),目前已成为军用三代、四代战机以及民用旅客机的主要动力装置^[1-2]。涡扇发

动机的推力产生于两路,燃气涡轮(内涵道)和风扇叶片(外涵道)。内涵道工作原理与涡喷发动机的热力过程相似;外涵道通过风扇叶片吸入空气,压缩后一部分空气流入外涵道膨胀加速产生外涵推力,另一部分空气流入内涵道经压缩—燃烧—膨胀

基金项目: 国家自然科学基金(51475233)资助项目。

收稿日期: 2014-05-10; **修订日期:** 2014-07-10

作者简介: 徐九华,男,1964 年 10 月生,博士,教授,博士生导师,享受政府特殊津贴专家。主要研究方向:难加工材料高性能切/磨削技术、超硬磨料工具技术、抗疲劳制造技术、超精密加工技术。发表论文 200 余篇,授权国家发明专利 10 项,获得国家科技进步二等奖 1 项。

通信作者: 徐九华, E-mail: xujh@nuaa.edu.cn。

驱动内涵压气机及外涵风扇叶片并产生内涵推力^[3-4]。伴随现代人们对发动机性能要求的不断提高,涡扇发动机及零部件设计、制造面临新的挑战。风扇叶片作为涡扇发动机核心部件之一,几何形状和制造精度是影响发动机涵道比以及推重比进一步提升的重要因素。

早期风扇叶片为窄弦实心结构,在叶身上距叶尖三分之一处有向两侧伸出的阻尼凸肩,存在质量大、气流损失严重以及制造工艺复杂等问题,不满足更大推重比涡扇发动机的发展需求^[5-8]。这些问题直到20世纪60年代宽弦空心叶片结构形式的出现才得以解决。经过近50年的研究,最具代表性的英国Rolls-Royce公司先后成功研制出三代钛合金宽弦空心风扇叶片(见图1)。1968~1984年,设计和研制了第一代蜂窝夹心宽弦空心风扇叶片,将两块加工好的钛合金叶盆和叶背面板采用活化或液态扩散连接法与钛合金蜂窝夹芯连接成为一个整体形成空心叶片。1984~1995年,为进一步减轻叶片结构重量,开展第二代超塑成形/扩散连接(Superplastic forming and diffusion bonding, SPF/DB)空心叶片研制,突破了钛合金面板及芯板加工、荫罩板扩散连接、初步扭形、叶片成形和加工等6项关键技术。1998年6月,完成第三代风扇叶片研制,该叶片同样采用SPF/DB技术,但叶型后掠,形同马刀的后掠叶型能够进一步提高风扇效率及抗外物损伤能力^[9]。Rolls-Royce公司RB-211系列民用航空发动机以及在此基础发展的Trent系列,包括早期的Trent500, Trent700, Trent800以及近期的Trent900, Trent1000和TrentXWB,风扇叶片均采用宽弦空心设计形式。

目前广泛服役于现代大涵道比涡扇发动机的第三代钛合金宽弦空心风扇叶片几何结构是空心桁架(叶身中部)和实体(榫头、叶尖和进排气边)组合而成的封闭结构(见图2)。由于SPF/DB工艺

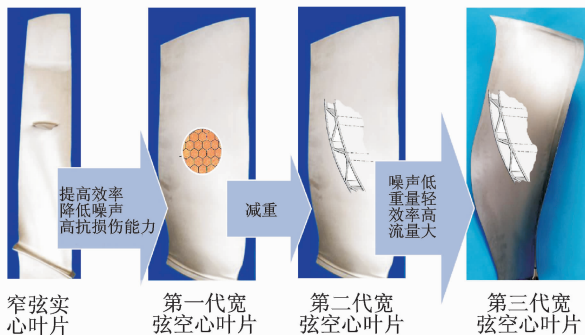


图1 风扇叶片发展历程

Fig. 1 Development of fan blade

伴随多重热循环,冷却过程中热应力的释放与重新分布导致叶片发生变形。目前SPF/DB工艺条件无法一次性成形出满足外形轮廓精度和空心壁厚分布精度要求的钛合金宽弦空心风扇叶片^[10]。因此除空心桁架结构一次成形外,榫头、叶尖及进排气边均留有加工余量且分布不均匀,需针对各加工部位分别辅以不同数控加工手段(切/磨削)才能最终满足精度要求。本文通过研究钛合金宽弦空心风扇叶片数控切削加工,分析面临的主要加工问题,指出研究中需突破的关键技术并综述其研究现状,最后为精确控制钛合金宽弦空心风扇叶片加工精度提出开发数控切削加工集成系统。

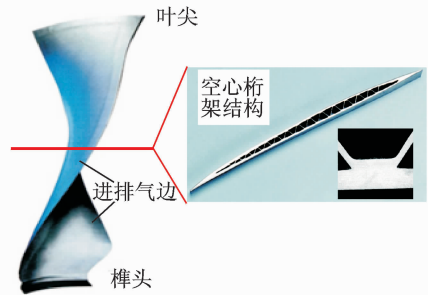


图2 钛合金宽弦空心风扇叶片

Fig. 2 Titanium wide chord hollow fan blade

1 数控切削加工面临的问题

SPF/DB工艺结合数控切削加工技术是当前解决钛合金宽弦空心风扇叶片制造问题最有效的方法组合。三层钛合金板经SPF/DB工艺多重高温热循环形成带有空心桁架结构的宽弦空心风扇叶片毛坯;采用切削、磨削等数控加工手段去除毛坯余量获得最终尺寸叶片零件。数控切削加工作为制造过程中以余量去除为目的最后一道工艺,是保障钛合金宽弦空心叶片制造精度重要技术手段。目前,国外主流发动机公司和数控机床生产商在这方面已开展相关工作并取得进展。负责向英国Rolls-Royce和美国Pratt & Whitney公司提供加工设备的Hamuel与BCT GmbH公司合作开发了钛合金宽弦空心叶片数控加工成套技术,并为STARRAG公司机床产品植入了专门的数控加工软件系统。同时Rolls-Royce公司在宽弦空心叶片加工与修理需求的推动下,与Delcom及TTL公司合作,花10年时间开发了包含多轴数控加工、六轴砂带磨削以及叶片快速测量的成套加工技术。研究成果已成功应用于Rolls-Royce公司全部Trent系列叶片以及OGV叶片的制造过程。

钛合金宽弦空心风扇叶片空心桁架与实体混

杂的结构特征以及 SPF/DB 后毛坯复杂尺寸状态决定数控切削加工过程较一般叶片复杂,主要面临以下问题:

(1) 毛坯尺寸差异大

由于 SPF/DB 应变速率和冷却参数等工艺条件难以精确控制,导致成形得到的钛合金宽弦空心风扇叶片毛坯尺寸状态相互间差异大。数控切削加工前必须分别对每一加工对象进行测量获得各自尺寸分布状态,并根据测量点云数据重构出反映叶片毛坯实际尺寸状态的 CAD 模型用于数控切削加工。

(2) 余量分布不均匀

SPF/DB 后钛合金宽弦空心风扇叶片毛坯各部位加工余量分布不均匀:榫头、叶根留有较大余量;进排气边余量较小;空心桁架结构外形几乎没有余量。加工部位结构特点及余量分布状态不同决定数控切削加工方法多样化,给数控切削加工带来了困难,尤以进排气边与叶盆、叶背过渡区域加工困难。进排气边数控切削加工需要在加工中心上采用多轴铣削手段实现,而空心桁架结构外形几乎没有加工余量,通常只在叶尖、叶根及进排气边加工后采用数控砂带磨削提高表面粗糙度。采用铣削和砂带磨削两种工艺方法先后加工进排气边和叶身,难以保证过渡区域光滑连续。

(3) 刚度特性强弱相间

钛合金宽弦空心风扇叶片空心桁架(叶身中部)和实体(榫头、叶尖和进排气边)组合而成的封闭混杂结构刚度特性强弱相间,数控切削加工过程中结构变形规律复杂,难以建立准确的加工变形预报模型以及采取有效的误差补偿手段。

(4) 外形轮廓加工受内形约束

钛合金宽弦空心风扇叶片空心桁架结构壁厚分布精度是影响使用性能的重要因素。与实芯叶片仅须控制外形轮廓精度不同,由于空心叶片空心区域的封闭性,内形轮廓在热成形工艺中一旦形成便无法通过机械加工手段加以修正。换言之,在现有 SPF/DB 工艺条件下,由于内形轮廓不可修正性,需要基于内形轮廓来数控切削加工外形轮廓,才能有效保证空心桁架结构壁厚分布精度。

2 关键技术及研究现状

钛合金宽弦空心风扇叶片数控切削加工时,首先快速测量 SPF/DB 工艺得到的叶片毛坯,获得全场点云数据;接着借助 CAD 技术重构毛坯数学模型,在此基础上结合 CAD 和 CAM 技术对零件

数学模型进行适应性调整并生成数控加工代码;最后基于数控加工中心并设计相应工装夹具,完成叶片数控切削加工。同时,钛合金宽弦空心风扇叶片为刚性强弱相间的薄壁空心结构件,需要有效控制切削加工变形并补偿加工误差。因此解决钛合金宽弦空心风扇叶片数控切削加工面临的问题,需要突破的关键技术包括复杂曲面结构测量技术、加工变形控制技术以及切削加工误差补偿技术等。

钛合金宽弦空心叶片测量技术包括叶片外形轮廓测量和空心夹层结构壁厚测量等技术。获得复杂自由曲面外形和空心结构壁厚全场点云数据,同时摄取定位基准和形位特征信息。结合计算机辅助设计手段,基于测量数据点云重构用于数控切削加工的钛合金宽弦空心叶片毛坯数学模型。加工变形控制技术主要是针对钛合金宽弦空心风扇叶片强弱相间的刚度特性,揭示切削加工变形规律,建立预报模型,在此基础上研究加工变形控制方法。切削加工误差补偿技术是研究数控切削加工过程中由于机床精度,刀具磨损,工件变形等因素造成的加工误差产生及规律,并形成误差补偿策略。国内外研究人员在这方面开展了大量的研究工作,并取得重要进展。

2.1 复杂曲面结构测量技术

复杂曲面测量技术历来是结构件几何量计测技术中的一项重要研究课题。近十年来,伴随着面向个性化加工对象新测量需求的出现,复杂曲面测量技术的研究在原先注重评定曲面质量的基础上增加了新内容——复杂曲面几何形状信息获取。迄今,国内外对复杂曲面测量技术的研究主要集中在数据获取、曲面重构以及误差评定等方面。

(1) 数据获取技术

随着现代科技的发展,三维表面信息获取的方法技术多样化(见图3),包括以三坐标测量机、测量机械手为代表的接触式和基于光学干涉、立体视觉、穆尔条纹、超声、工业 CT 及核磁共振等技术的非接触式^[11-12]。接触法测量精度高,但测量效率较低、获取点云数据有限;非接触法测量效率高,获得点云数据多,但受测量环境因素影响大,精度不高。测量方法特点决定各自的应用范围和场合,目前三坐标机测量法和立体视觉测量法在复杂曲面结构测量中应用最为广泛。

(2) 曲面重构技术

现代数控加工技术中针对复杂曲面外形构件需依据零件 CAD 模型建立刀位点,规划刀具运动路径并驱动数控机床完成切削运动。曲面重构是

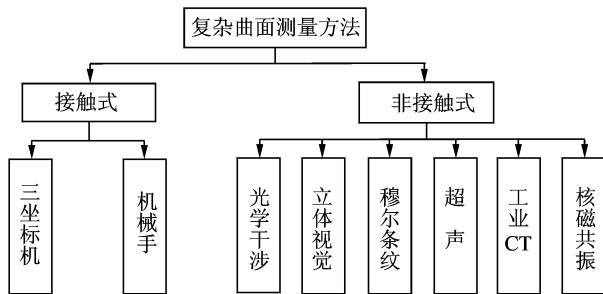


图3 复杂曲面测量方法

Fig. 3 Method of complex surface measuring

利用插值、拟合等方法对被加工对象测量数据点进行云处理,最终生成 CAD 模型的过程。对于复杂曲面外形构件,目前应用最为广泛的方法是通过外形曲面实现实物重构,即通过摄取构件外形轮廓数据信息建立片体并采用 CAD 技术转换为实体。测量数据点分为有序和无序,最具代表性的分别来自三坐标机测量法和双目视觉测量法。有序数据点是通过沿轮廓线或切片平面线扫描获得,拟合成曲面的方式较为简单,借助于 UG、CATIA 等三维造型软件即可实现;无序数据点是通过任意采样方式得到或海量测量数据经压缩和滤波等处理后形成,目前主要有 3 种曲面构造方法:(1)以 B-spline 或 NURBS 曲面为基础的四边域曲面构造;(2)以三角 Bezier 曲面为基础的三角域曲面构造;(3)径向基函数曲面重构技术^[13]。目前针对几何约束显著的复杂外形结构件迅速发展出一种基于结构特征的模型重构方法,能更加准确有效表达构件各分块重构曲面的特征几何关系。现有的研究多集中在离散数据点的识别以及结构几何特征的抽取,尚未形成较为完善的特征建模方法^[14]。

(3) 误差评定技术

最小二乘法和基于各种优化算法的最小区域法是复杂曲面测量常见的误差评定技术。随着测量技术的发展,最小向量范数评定法、包容评定方法以及基于“数据处理的小偏差假设”的形状误差评定理论^[15]等技术逐渐发展起来并取得重要应用。

钛合金宽弦空心风扇叶片测量技术要求获取点云数据的同时,获得定位基准和形位特征数据;合理规划测量点分布,提高测量效率;形成测量误差评定方法,保证测量精度;研究复杂曲面在机测量方法。最终实现基于结构特征的钛合金宽弦空心风扇叶片高效实时精确测量。

2.2 加工变形控制技术

数控加工技术研究中,通过数字化测量、模型

重构及自动数控编程等手段在几何方面精确获得形状轮廓的同时,需要有效控制切削加工变形才能最终保证被加工对象满足精度要求。国内外学者关于弱刚性结构件切削加工变形的研究主要集中在加工变形预测以及控制技术方面。

切削力是引发叶片类弱刚性结构件发生加工变形的重要因素。切削过程的复杂性导致切削力受工件刀具几何形状、材料属性和切削条件等诸多因素影响。因此,实现切削力作用下加工变形预测及控制的前提是准确获得切削力信息。图 4 所示为建立切削力预测模型的一般流程,借助于数值模拟技术,根据切削加工中刀具、工件以及切削参数等实际条件,建立切削力迭代预测模型并输出得到切削力信息。国内外研究学者在这方面开展了大量研究。LIM 等通过研究球头铣刀加工叶片时切屑形状、切削力、刀具偏差和几何表面偏差等因素对工件加工变形的影响,分别建立了刚性力预测模型和弹性力预测模型^[16]。Bouzakis 等采用等距分割工件几何模型来确定未变形切屑的几何形态,并基于初始工件几何形状、数控编程刀位轨迹以及刀具几何信息建立了铣削力预报模型^[17]。考虑结构件刚度特性对切削力重要影响,具有代表性的李阳等建立了薄壁框架零件端铣刀铣削力模型^[18]。同时,复杂曲面薄壁零件加工切削余量不均匀以及刀轴方向连续改变使得力学模型较为复杂,为此 Ratchev 等建立了适用于弱刚性薄壁零件静态加工误差补偿的柔性力学模型^[19]。建立切削力有效预报模型的基础上,又开展了薄壁弱刚性结构加工变形预报和控制研究。Ratchev 等研究了铣削薄壁零件加工变形预测和补偿方法,提出通过加工变形量实时修正刀具定位点减少加工误差的算法。Ismail 将工件分别划分成许多微小的单元体提取铣削加工自由曲面时瞬时接触区域的边界,建立了铣削加工变形预报模型^[20]。林立基于叶片薄壁结构件真实铣削力编写变形迭代算法,迭代计算出变形量补偿刀位点来提高叶片加工精度^[21]。赵明等基于叶片刚度的变形数学模型揭示叶片弹性变形规律,研究结果与实际加工中的变形很好地吻合^[22]。

切削刀具变形预测和控制对提高零件加工精度同样至关重要。Philippe 提出了针对叶片类薄壁弱刚性零件刀具变形预测模型^[23]。Law 揭示刀具加工挠曲变性规律,并建立端铣型腔时刀具变形误差预测模型^[24]。Liu 指出通过选择适当的刀具齿数、轴向切深、径向切深以及进给速度等工艺参

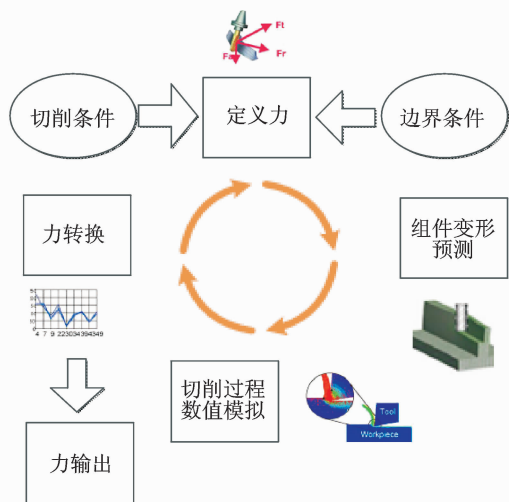
图 4 切削力预测模型建立^[16]

Fig. 4 Establishment of force prediction model

数,能够有效减小因刀具变形而引起的侧铣加工变形^[25]。

钛合金宽弦空心风扇叶片空心瓦楞和实体混杂的结构特征,使得数控加工过程中叶片和刀具变形规律较一般薄壁弱刚性结构件复杂。基于切削加工试验和数值模拟仿真技术,建立面向空心、刚性强弱相间特征结构的加工变形预报模型,在此基础上,结合高效切削加工和误差补偿技术,有效控制钛合金宽弦空心风扇叶片加工变形。

2.3 切削加工误差补偿技术

切削加工误差补偿的基本原理是根据加工过程存在的原始误差人为增加大小相等、方向相反的新误差,减少零件加工精度损失。原始误差主要是指机床误差,刀具磨损及被加工对象特殊结构特征造成的加工误差。迄今,国内外研究人员针对加工过程中的不同原始误差分别开展了相关补偿技术研究。

机床是获得零件加工精度的最根本保证,研究切削加工中机床误差补偿技术对提高零件精度至关重要。Veldhuis 等针对五轴数控机床温度变化和各坐标轴运动导致的加工误差,利用神经网络技术建立补偿模型,有效控制 Z 轴移动偏差小于 0.02 mm 和 X 轴转动偏差小于 0.002°^[26]。Yang 等综合运用传感、计量、建模及计算机控制等技术建立 T-10 数控加工中心实时误差补偿系统,有效降低 T-10 加工中心线性位移误差和主轴热变形跳动^[27]。王小平等基于多体系统运动学理论,建立了一种通用的数控机床几何误差模型,适用性广且易于编程^[28]。吴德林等将高速雕铣机丝杠的热变形误差值加入到执行数据中,通过修改 G 代码有

效实现了变形误差的补偿^[29]。

数控加工中刀具的磨损是影响加工精度的另一重要因素。刘强采用偏最小二乘法对车削加工过程中刀具后刀面磨损进行了研究,建立了刀具磨损量的回归模型^[30]。李锡文等以铣刀后刀面磨损带面积作为衡量刀具磨损的一个指标,建立了螺旋立铣刀后刀面瞬时铣削力和平均铣削力与后刀面磨损带面积间的数学模型,用于刀具磨损状态的监控^[31]。Yang 等提出一种在线数控加工误差的控制方法,应用刀具轨迹调节装置调整刀具的中心位置实现对加工误差的控制^[32]。Law 研究了基于刀杆变形的腔槽加工过程的离线误差补偿法^[33]。Rao 研究了带曲率工件铣削过程中刀具变形的补偿方法^[34]。李苏渊等研究一种考虑切屑厚度影响的切削力模型,建立了由切削力引起的刀具变形加工误差的分析模型,并提出一种针对切削力引起的刀具变形产生的切削误差循环迭代的误差补偿算法^[35]。张臣等研究球头刀具磨损模型,并提出离线仿真误差补偿算法,有效保证实际加工零件满足精度要求^[36]。

近年来,针对零件结构特征导致的加工误差补偿技术研究是又一热点。李桂华等建立由切削力、工件自重和切削热引起的细长轴加工误差数学模型,并运用误差补偿技术适时修正加工误差,有效地提高细长轴的加工精度^[37]。范开国等运用牛顿插值理论建立批量轴类零件加工误差数学模型,应用用户宏程序按工件序号及切削位置进行误差实时补偿,可使批量轴类零件最大加工误差由 60 μm 降低到 4 μm,加工效率提高 13%^[38]。郝炜等研究叶片前后缘加工误差分布规律,通过误差补偿方法对叶片模型进行修正^[39]。Chen 等针对薄壁件多层铣削加工,提出逐层误差补偿方法,显著地提高了零件的加工精度^[40]。

空心桁架和实体混杂的结构特征是研究钛合金宽弦空心风扇叶片切削加工误差补偿技术的关键。结合加工变形规律,基于叶片数控加工路线建立误差分析模型,研究基于结构特征的钛合金宽弦空心风扇叶片切削加工误差补偿技术。

3 数控切削加工集成系统

钛合金宽弦空心风扇叶片数控切削加工各项技术之间相互联系、依赖。复杂曲面测量技术需满足模型重构对数据点云的要求,同时刀具轨迹规划也要建立在重构模型的基础之上。此外,加工变形控制及误差补偿方案要依据实际切削加工路径制

定。把各项技术集成系统将有效提升数控切削加工能力,对解决钛合金宽弦空心风扇叶片数控切削加工问题有重要意义。

叶片维修与钛合金宽弦空心风扇叶片数控切削加工原理上相似。采用数字化测量方式获得破损叶片实际边缘形状和尺寸状态信息,借助 CAD 技术重构并优化叶片数学模型;在此基础上运用 CAM 技术规划修补加工路径,采用数控加工手段实现修复。国内外研究学者已开展了破损叶片维修系统相关研究工作,值得借鉴。Yilmaz 等基于逆向工程、CAD 造型和机械加工技术提出了一种针对复杂造型昂贵航空零件的维修系统,集三维非接触数字化测量、适应性自由曲面造型和多轴数控铣削为一体,实现了薄壁弱刚性零件高效精密修复^[41]。Piya 研究一种发动机叶片缺陷、破坏半自动虚拟修补系统。该系统基于局部高斯映射法,沿叶展方向建立特征截面,通过非损坏区域特征截面拟合得到损坏区域目标模型,比目标模型与实际所测模型之差即可得修补量^[42]。Gao 等提出一种

复杂曲面零件任意缺陷修补集成系统。基于逆向工程中测量技术手段获得的三维扫描点云数据快速重构受损零件模型,在此基础上,针对个性化修补对象分别准确定义并得出修补误差、修补体积及路径,并结合 CAM 技术产生刀具轨迹,最终实现数控修补加工^[43]。

借鉴叶片维修技术集成系统的研究成果,开发的钛合金宽弦空心风扇叶片数控切削加工集成系统应集测量、分析及加工功能为一体,主要包括测量机、软件系统(CAD、CAM)和数控机床三部分(见图5)。针对钛合金宽弦空心风扇叶片结构特征,制定全尺寸高效测量方案,导入软件系统驱动测量机获取叶片点云数据;软件系统读取点云数据,进行数据处理、模型重构、加工路方案制定以及加工仿真等分析处理工作,并根据叶片加工方案制定加工变形控制及误差补偿策略;生成数控切削加工代码,驱动数控机床完成加工。在数控切削加工过程中,采用在线测量方式将加工现场实际情况传递到软件系统,形成反馈监测加工过程。

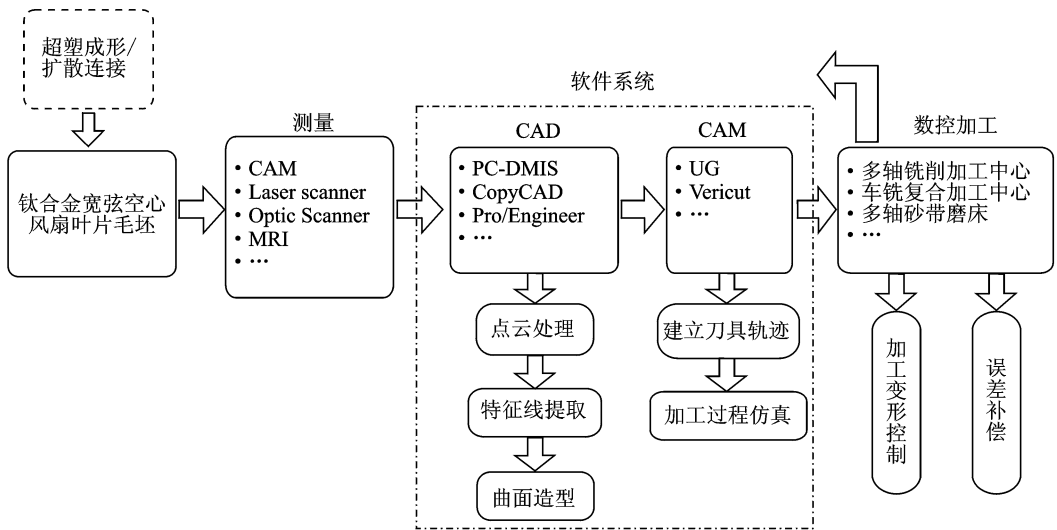


图5 数控切削加工集成系统

Fig. 5 Integrated system of NC machining

4 结束语

研究了基于结构特征的数字化全尺寸高效精确测量技术,获得满足模型重构要求所需的点云数据。重构毛坯及零件 CAD 模型,并研究基于切削加工变形控制与加工误差补偿的弱基准、强弱相间个性化结构切削加工技术。开发了集测量、分析和加工为一体的数控切削加工集成系统,为解决目前钛合金宽弦空心风扇叶片数控切削加工提供了一

种切实有效的手段。

参考文献:

- [1] 梁春华. 未来的航空涡扇发动机技术[J]. 航空发动机, 2005, 31(4): 54-58.
Liang Chunhua. Future aircraft turbofan engine technologies[J]. Aeroengine, 2005, 31(4): 54-58.
- [2] 张恩和. 大涵道比涡扇发动机的研制与设计特点[J]. 航空发动机, 2007, 33(3): 1-6.
Zhang Enhe. Development and design features of high

- bypass ratio turbofan engine[J]. *Aeroengine*, 2007, 33(3):1-6.
- [3] 陈光. 航空发动机结构设计分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006.
Chen Guang. Analysis of structure design for aero-engine[M]. Beijing:Beihang University Press, 2006.
- [4] 张逸民. 航空涡扇发动机[M]. 北京:国防工业出版社, 1985.
Zhang Yimin. Aircraft turbofan engine[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985.
- [5] 侯冠群. 宽弦空心风扇叶片制造工艺的发展[J]. *航空制造工程*, 1994(5):6-8.
Hou Guanqun. Development of manufacturing technology for wide chord hollow fan blade[J]. *Aviation Engineering & Maintenance*, 1994(5):6-8.
- [6] 梁春华, 杨锐. 航空发动机宽弦空心风扇叶片的发展及应用[J]. *航空发动机*, 1999(2):54-58.
Liang Chunhua, Yang Rui. Development and application of wide chord hollow fan blade in aeroengine[J]. *Aeroengine*, 1999(2):54-58.
- [7] David P. Method of forming a hollow blade[P]. US: 5063662, 1991.
- [8] Christopher M P. Hollow fan blade for gas turbine engine[P]. US:0160599, 2005.
- [9] 王乐安. 国外航空发动机风扇叶片及其成形技术[J]. *航空科学技术*, 1995(1):31-33.
Wang Yuean. Fan blade of turbofan and its forming technology in foreign[J]. *Aeronautical Science and Technology*, 1995(1):31-33.
- [10] 蒋少松. TC4 钛合金超塑成形精度控制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 2009.
Jiang Shaosong. Accuracy control of superplastic forming for TC4 titanium alloy[D]. Harbin: School of Materials Science and Engineer, Harbin Institute of Technology, 2009.
- [11] 石照耀, 谢华锬, 费业泰. 复杂曲面测量模式与关键技术[J]. *工具技术*, 2000, 34(11):31-34.
Shi Zhaoyao, Xie Huakun, Fei Yetai. Modes and key technologies of complex surface measurements[J]. *Tool Engineering*, 2000, 34(11):31-34.
- [12] 张凤林, 虞和剂, 虞钢. 空间自由曲面测量技术的动态与发展[J]. *现代计量测试*, 1998(5):3-6.
Zhang Fenglin, Yu Heji, Yu Gang. Review of the development of measuring techniques for 3-D compound free surface[J]. *Modern Measurement Test*, 1998(5):3-6.
- [13] 鞠华. 逆向工程中自由曲面的数据处理与误差补偿研究[D]. 杭州:浙江大学机械制造及其自动化系, 2003.
Ju Hua. Research of data processing and error correction for freeform surface of reverse engineering[D]. Hangzhou: Department of Mechanical Manufacturing and Automation of Zhejiang University, 2003.
- [14] 金涛, 陈建良, 童水光. 逆向工程技术研究进展[J]. *中国机械工程*, 2002, 13(16):1430-1436.
Jin Tao, Chen Jianliang, Tong Shuiguang. A review of reverse engineering technology[J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(16):1430-1436.
- [15] 熊有伦. 精密测量的数学方法[M]. 北京:中国计量出版社, 1989.
Xiong Youlun. Mathematical methods of precision measuring[M]. Beijing: China Metrology Press, 1989.
- [16] Lim E M, Feng H Y, Meng C H, et al. The prediction of dimensional error for sculptured surface productions using the ball-end milling process. Part 1: Chip geometry analysis and cutting force prediction[J]. *Int J Mach Tools Manuf*, 1999, 35(8):1149-1169.
- [17] Bouzakis K D, Aichouh P, Efstathiou K. Determination of the chip geometry, cutting force and roughness in free form surface finishing milling, with ball end tools[J]. *Int J Mach Tools Manuf*, 2003, 43(5):499-514.
- [18] 李阳. 薄壁零件铣削加工变形预测[D]. 大连:大连交通大学, 2008.
Li Yang. Deformation prediction for milling process of thin-walled parts[D]. Dalian: Department of Mechanical and Electrical Engineering of Dalian Jiaotong University, 2008.
- [19] Ratchev S, Liu S, Huang W, Becker A A. A flexible force model for end milling of low-rigidity parts[J]. *J Mater P T*, 2004, 153-154(1):134-138.
- [20] Ismail L. Sculpture surface machining: A generalized model of ball-end milling force system[J]. *Int J Mach Tools Manuf*, 2003, 43(5):453-462.
- [21] 林立. 复杂薄壁叶片加工误差分析与研究[D]. 北京:北京交通大学, 2011.
Lin Li. Analysis and research on error of manufacturing complex thin-walled blade surface[D]. Beijing: Department of Mechanical and Electrical Engineering of Beijing Jiaotong University, 2011.
- [22] 赵明, 刘维伟, 李杰光. 叶片精密加工弹性变形误差分析及规律研究[J]. *机械设计与制造*, 2009(6):106-108.
Zhao Ming, Liu Weiwei, Li Jieguang. Study on machining deformations error and rules analysis of thin-walled blades[J]. *Machinery Design and Manufacturing*, 2009(6):106-108.
- [23] Philippe D P, Hascoet J Y. Active integration of tool

- deflection effects in end milling, Part 1. Prediction of milled surfaces[J]. *Int J Mach Tools Manuf*, 2006, 46(9):937-944.
- [24] Law K M Y, Geddam A. Error compensation in the end milling of pockets: a methodology[J]. *J Mater P T*, 2003, 139(1/2/3):21-27.
- [25] Liu X W, Cheng K, Webb D, et al. Prediction of cutting force distribution and its influence on dimensional accuracy in peripheral milling[J]. *Int J Mach Tools Manuf*, 2002, 42(7):791-800.
- [26] Veldhuis S C, Elbestawi M A. A strategy for the compensation of errors in five-axial machining[J]. *Ann CIRP*, 1995, 44(1):373-377.
- [27] Yang S, Yuan J, Ni J. Accuracy enhancement of a horizontal machining center by real-time error compensation[J]. *J Manuf Sys*, 1996, 15(2):113-124.
- [28] 王小平, 姚英学, 荆怀靖. 数控机床几何误差建模及误差补偿的研究[J]. *数控技术*, 2005(9):14-16.
Wang Xiaoping, Yao Yingxue, Jing Huaijing. Investigation of geometric error modeling and error compensation of CNC machine tool[J]. *NC Technology*, 2005(9):14-16.
- [29] 吴德林, 牛得草. 雕铣机运动部件温度动态检测及误差补偿系统[J]. *机床与液压*, 2005, 35(10):202-203.
Wu Delin, Niu Decao. The dynamic detection of temperature of locomotor parts of carving and milling machine and error compensation system[J]. *Machine Tool and Hydraulics*, 2005, 35(10):202-203.
- [30] 刘强. 刀具磨损的偏最小二乘回归分析与建模[J]. *北京航空航天大学学报*, 2000, 26(4):457-460.
Liu Qiang. Partial least-squares regressive analysis and modeling for tool wear[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2000, 26(4):457-460.
- [31] 李锡文, 杜润生, 杨叔子. 基于后刀面磨损带面积的铣刀磨损模型的建立[J]. *华中科技大学学报*, 2001, 29(4):53-56.
Li Xiwen, Du Runsheng, Yang Shuzi. Tool wear modeling based on the area of the major flank wear land[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2001, 29(4):53-56.
- [32] Yang M Y, Choi J G. A tool deflection compensation system for end milling accuracy improvement[J]. *J Manuf Sci*, 1998, 120(2):222-229.
- [33] Law K M Y, Geddam A. Prediction of contour accuracy in the end milling of pockets[J]. *J Mater P M*, 2001, 113(1/2/3):399-405.
- [34] Rao V S, Rao P V M. Tool deflection compensation in peripheral milling of curved geometries[J]. *Int J Mach Tools Manuf*, 2006, 37(1):2036-2043.
- [35] 李苏渊, 杨貌奎, 杨川. 数控加工刀具变形误差补偿技术研究[J]. *计算机仿真*, 2011, 28(1):331-335.
Li Suyuan, Yang Maokui, Yang Chuan. Study on error compensation of tool deflection based on cutting force in NC machining[J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(1):331-335.
- [36] 张臣, 周来水, 安鲁凌. 球头铣刀刀具磨损建模与误差补偿[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(2):207-218.
Zhang Chen, Zhou Laishui, An Luling. Modeling and wear-induced error compensation of ball-end milling cutter wear[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(2):207-218.
- [37] 李桂华, 费业泰, 马修水. 细长轴加工误差补偿原理[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(6):131-133.
Li Guihua, Fei Yetai, Ma Xiushui. Principle of error compensation in long axis Cutting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(6):131-133.
- [38] 范开国, 杨建国, 姚晓栋, 等. 基于牛顿插值的批量轴类零件加工误差补偿[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(9):112-116.
Fan Kaiguo, Yang Jianguo, Yao Xiaodong, et al. Error compensation for shaft parts in batch manufacture based on Newton interpolation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(9):112-116.
- [39] 郝炜, 蔺小军, 单晨伟, 等. 薄壁叶片前后缘加工误差补偿技术研究[J]. *机械科学与技术*, 2011, 30(9):1446-1450.
Hao Wei, Lin Xiaojun, Shan Chenwei, et al. Research on the machining error compensation for the leading and trailing edges of thin-walled blades[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2011, 30(9):1446-1450.
- [40] Chen W F, Chen J B, Tang D B, et al. Deformation prediction and error compensation in multilayer milling processes for thin-walled parts[J]. *Int J Mach Tools Manuf*, 2009, 49(1):859-864.
- [41] Yilmaz O, Gindy N, Gao J. A repair and overhaul methodology for aeroengine components[J]. *Robot Cim-Int Manuf*, 2010, 26(2):190-201.
- [42] Piya C, Wilson J M, Murugappan S, et al. Virtual repair: Geometric reconstruction for remanufacture gas turbine blades[C] // *Proceedings of IDETC/CIE*. Washington, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2011:1-10.
- [43] Gao J, Chen X, Yilmaz O, et al. An integrated adaptive repair solution for complex aerospace components through geometry reconstruction[J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2008, 36(11/12):1170-1179.