

# 五轴增减材混合加工中心 集成开发技术研究

孔刘伟,王振忠,叶超,侯亮  
(厦门大学航空航天学院,厦门 361102)

**[摘要]** 以实现复杂零部件快速增材和高精度减材的复合加工为目的,开发了五轴联动增减材混合加工中心。在此基础上阐述机床增材与减材的设计开发过程及增减材集成控制原理,分析机床整体精度的控制方法,进行了相关增减材试验。采用航空发动机叶轮和五轴机床验收标准中的圆锥台试件做减材试切加工,针对叶轮叶片及 S 试件进行增材加工的工艺算法优化和对应的增材试验,初步得到了较符合预期的加工效果。

**关键词:** 五轴联动;增减材混合加工;增减材集成开发;增材工艺;精度控制

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.06.053



孔刘伟

硕士研究生,主要研究方向为智能制造与 3D 打印。

经过几十年飞速发展,航空航天和汽车制造业对于机械结构的优化已接近极限,如需进一步对性能进行改良则需要一体化、轻量化的设计及采用更高硬度和耐热性的材料,由此必然导致生产零件的结构和形状越来越复杂、材料愈发难以加工,对设

备的加工能力提出了更高的要求。五轴联动加工具有灵活性高、切削效率高等特点,是航空工业、精密模具制造等行业的常用技术。增材制造是一种新兴的加工技术,具有高度的柔性和工艺适应性,可以成形传统机床无法加工的复杂内腔结构,同时其特殊的加工方式又利于对零件进行轻量化、拓扑化的结构设计。两者相结合的方式可以交替进行激光堆焊与铣削加工、生产结构复杂的工件;修复破损零部件,降低设备维护和维修成本;也可使工件拥有全新的性能,如硬度梯度或多材质加工等。对于高硬度材料有很好的适应力,既能提高材料利用率,又能减少切削用量和加工时间,有较好的应用潜力。当前航空工业领域正越来越多地应用该技术制造飞机零部件,优化零件结构、减轻零件重量、缩短研发周期、降低研发成本。

近两年来,国外已有不少厂商基于增减材复合加工开发了商用设

备,如德国哈缪尔 HSTM 1000、德国哈默 MPA 40、德国 ELB 磨床、德国德玛吉 LASERTEC 65、日本山崎马扎克 INTEGRIX I-400AM<sup>[1]</sup>、日本松浦 Lumex Avance-25、日本沙迪克 OPM250L 等。国内发展起来的增材设备也较多,但基于五轴联动金属增减材复合的设备则很少,已见诸报道的仅有大连三垒的 SVW80C-3D。考虑其成本和技术持续发展,国内应更多做自主开发及推广应用。目前增减材复合机床存在以下发展趋势:(1)多种方式集成的增减材复合机床,不同的减材方式与增材方式组合;(2)向智能化、模块化方向进行发展;(3)开发出各具特色的集成控制软件系统;(4)采用闭环在机检测与实时反馈补偿。

本文主要介绍课题组所开发的五轴联动增减材复合加工中心,涉及机床设计开发、增减材集成、精度控制和算法优化等方面,并对典型零部件进行增减材试加工。整机的

减材加工精度满足 GB/T 34880.2—2017<sup>[2]</sup> 的验收要求,增材效率高、表面质量好,满足增材快速成型、减材高精度加工的设计要求。

### 五轴增减材复合加工中心的集成开发

增减材复合五轴加工中心开发的主要内容包括五轴联动减材机床的设计及其精度控制、增材模块开发、增减材复合与集成控制。后期的精度控制、算法优化与试验验证也是机床开发必不可少的环节。该增减材复合机床开发的总体流程如图 1 所示。

#### 1 五轴减材加工机床结构选型

常见的五轴联动机床的结构形式根据回转轴的布置方式分为 3 种:双摆头型、双转台型和混合型<sup>[3]</sup>。其中,双摆头型常见于大型机床,设计时优先考虑各移动部件的轻量化、各移动部件质量的均衡化。由于该类机床加工的工件质量大,为保证较高的加工速度、进给轴的高加速度及高加加速度,机床一般采用工作台固定不动的高架桥式龙门结构,如龙门五轴(包含 C 轴)、摆五轴机床(用于特殊结构的机床)等。中小型五轴机床及工件比较轻的机床一般采用摇篮式双转台的结构形式,该结构可以保证各移动部件质量与负载的合理分配、功能部件的模块化,可使回转中心接近切削区域。混合型五轴机床两个旋转轴分开布置,避免其中某一个轴负载过大,常见于高速机和超

高速机。本文机床采用双转台式五轴结构,如图 2 所示,可以满足中小尺寸零部件的增减材复合加工,同时直线轴运动与回转轴运动分开布置,可以保证较好的动态响应性能,提高联动精度。

#### 2 增材加工工具头设计选型

增材制造是复合机床的核心部分。增材的种类与形式繁多,通常分为激光选区熔化、激光直接沉积、电子束选区熔化、电子束熔丝沉积和电弧熔丝沉积,其技术特点如表 1 所示。

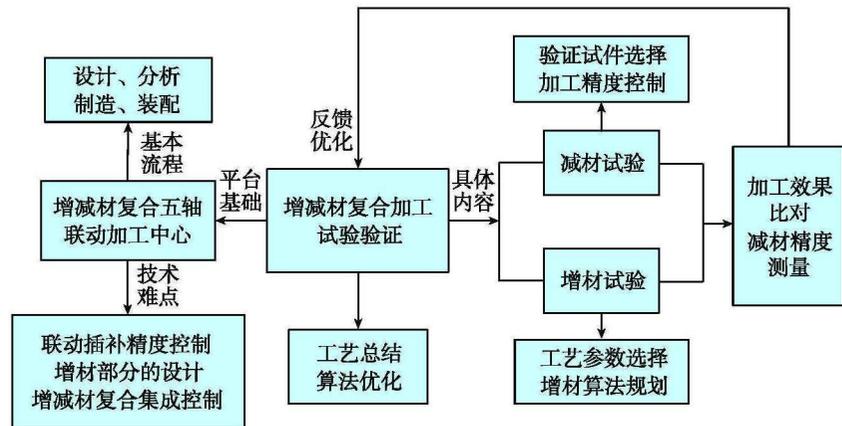


图1 五轴增减材复合加工中心开发技术内容

Fig.1 Technology details of developing five-axis additive-subtractive hybrid machining center

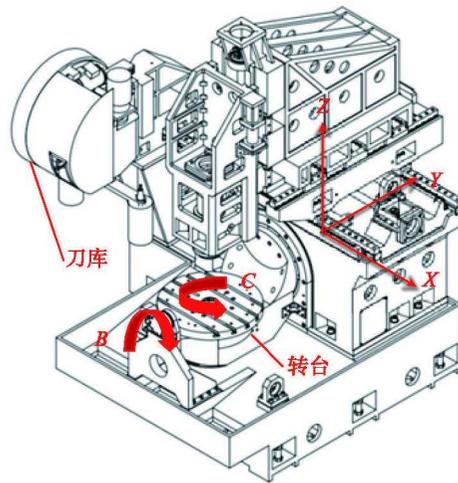


图2 双摇篮式五轴机床结构

Fig.2 Structure of double cradle five-axis machine tool

表1 增材制造工艺方法对比

Table 1 Contrast of additive manufacturing processes

工艺方法	力学性能	成形尺寸	表面粗糙度	适用范围
激光选区熔化	与铸件性能相当	受铺粉区域尺寸限制,一般较小	最好 $R_a 3.2 \sim 12.8 \mu\text{m}$	成形结构、形状复杂的非承力零部件
激光直接沉积	优于铸件,接近锻件	成形尺寸较大,可达 2000mm 以上	较粗糙	成形大尺寸承力结构件或零部件修复
电子束选区熔化	优于铸件,接近锻件	受真空室限制,尺寸一般较小	较好 $R_a 2.5 \sim 30 \mu\text{m}$	成形结构、形状复杂的非承力零部件
电子束熔丝沉积	与锻件性能相当	受真空室限制,最大尺寸在 2000mm 以内	粗糙	成形大尺寸承力结构件
电弧熔丝沉积	优于铸件,接近锻件	最大尺寸可达 2000mm 以上	粗糙	成形大尺寸承力结构件

对于中小尺寸零部件的增材,可采用激光直接沉积、电子束熔丝沉积、电弧熔丝沉积的方法。激光直接沉积与电弧熔丝沉积对加工环境的要求较低,但一般来说激光直接沉积的精度较高且更易与五轴联动的结构相适应,可配备具有同轴送粉能力的激光头,如图3所示,使增材的运动控制与减材相统一,简化整机控制过程。

同轴激光熔覆头送粉效果好、粉末利用率高,不同于旁路送粉,其粉末的堆积不具有方向性,被广泛运用于激光直接沉积的增材设备中,但该激光熔覆头设计较为复杂,需要考虑以下5个问题<sup>[4]</sup>:(1)激光熔覆头结构需紧凑,为增材加工预留充足的空间,增减材复合时紧凑型熔覆头能使增减材的行程保持一致,提高加工能力;(2)粉末束需要均匀稳定地喷出且各送粉管路需具有较好的聚焦能力,粉末汇聚差会导致粉材利用率大幅度降低,汇聚点如在熔池外则大量粉末在非熔池区域发生了低质量的熔覆,也会影响成形件的最终性能;(3)粉末焦点与激光焦点的相对位置应利于形成高质量熔覆层,为此,部分熔覆头可以实现送粉部分的上下移动或者送粉管角度的变化;(4)激光头的内部结构应有粉尘防护,避免增材时被扬起的金属粉末粘附在光学镜片上,影响出光、降低增材效率;(5)为避免增材输粉管堵塞,熔覆头的设计加工点应与熔覆头保持一定距离、送粉管路应采取水冷的方法降温,否则熔池中飞溅的液滴会粘附在出粉管路上,而出粉管路如温度过高亦会使未喷出的粉末熔化形成堵塞。

### 3 增减材加工工艺的集成

增材、减材技术的加工原理不同。减材通过材料的去除自上而下地完成工件的加工,加工过程中会产生大量切屑,刀具与材料接触的过程中短时间会产生过多的热量、需要切

削液配合冷却;增材同轴送粉的激光近净成形加工中,需要洁净的加工环境,避免油污、水渍以及灰尘等影响激光熔融的效果。二者复合加工需要考虑不同的加工环境要求,并可实现增减材的自由切换。机床左侧为刀库、右侧为激光熔覆头室,均与加工环境隔开,增材时从右侧取出熔覆头,减材时归还熔覆头并从左侧刀库取刀。增材通过G代码实现路径控制、M代码实现工艺参数控制,变量\$A\_OUTA[1]确定激光功率、M23开启激光、M24关闭激光、M56左路送粉开启、M57右路送粉开启、M58送粉机关闭、M59开启保护气、M60关闭保护气、M61开启导引激光、M62关闭导引激光、MM46取激光熔覆头、MM47还激光熔覆头,数控

系统读取指令后控制机床对应动作,总体原理如图4所示,增材单独界面如图5所示。

### 精度控制

精度控制主要是通过运动部件的精度检测并对精度不足的部分进行调整优化的过程,包括机械结构的调整和数控系统部分参数的匹配优化。机床精度检测按测量方法则可分为直接测量(也称静态精度测量)和间接测量(也称加工精度测量)。直接测量指的是用平尺、量块、千分表、分中棒、激光干涉仪、球杆仪、光栅传感器、角度多面体、圆光栅及平行光管(准直仪)等测量工具对机床的各轴误差(包括定位误差、重复定位误差、反向定位误差以及主轴的圆

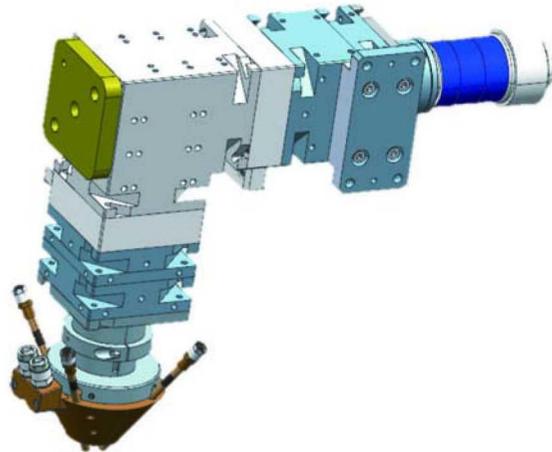


图3 同轴激光熔覆头

Fig.3 Coaxial laser cladding head

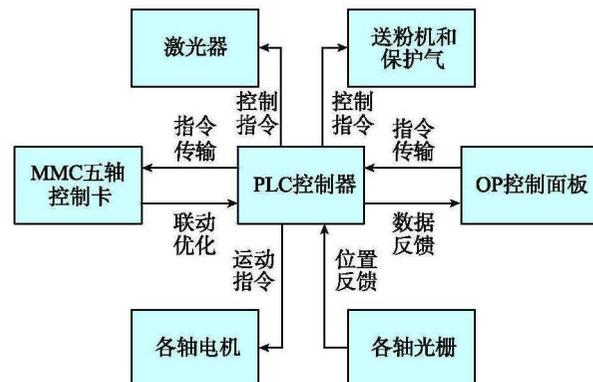


图4 增减材集成控制基本原理

Fig.4 Basic principles of integrated control for additive-subtractive machining

跳动误差、工作台的平面度误差、各轴间的相对位置误差等)分别进行测量,一般认为是单一运动的精度测量;间接误差测量指的是通过加工验收试件来测量联动插补运动的误差。GB/T 34880.2—2017 对以上精度测量方法作了详细的阐述。除此之外,对五轴联动加工中心,精度控制的重要一环为五轴标定,即精确测量各个旋转轴在直线轴坐标系中的位置和方向矢量,用以输入数控系统进行 RTCP 五轴联动补偿运算,标定数值的准确度将对最终的联动效果产生决定性影响。

### 1 静态精度检验

按照 GB/T 34880.2—2017 标准对所开发机床各部分的精度进行了单独的测量,检测结果表明机床的静态精度中,除了 X 轴和 Y 轴的定位与重复定位精度存在问题外,其他均满足标准的要求。

X 轴的定位与重复定位精度低于 Y 轴、Y 轴低于 Z 轴,但 Z 轴满足精度要求。存在该现象的原因在于 X 轴布置在 3 个线性轴的底部,负荷最大,精度也最差。最终通过对 X 轴、Y 轴进行丝杆螺距补偿使其满足精度要求,最终检测结果如表 2 所示。

五轴标定的主要环节为确定各个旋转轴在直线轴坐标系中的位置和方向矢量。本机床五轴零点位于转台中心的正上方,简化了标定工作量,但需要以更高的精度确定机床零点。如图 6 所示,机床零点位于转台回转中心正上方 620mm、倾斜轴轴线与转台平面相差 50.052mm。

### 2 加工精度检验

加工精度检验是通过加工典型零部件,测量最终成形件的形状精度和尺寸精度来确定机床的整体精度。国际上常见的标准试件有:成飞的 S 试件、GB/T 34880.2—2017 中的圆锥台试件、美国宇航局 1969 年提出的 NAS979 五轴圆锥台试件、德国 NCG 公司的 NCG2005 试件、

欧洲厂商的 Mercedes 试件、日本东京农工大学 Tsutsumi 提出的四角锥台检测试件等。机床最终采用 GB/T 34880.2—2017 中的圆锥台试件,可以检测五轴联动圆度误差。使用开发的机床(见图 7)加工圆锥台试件(见图 8),表面质量较好,满足国标精度要求,即圆锥各距离上下表面

5mm 处的圆度公差不得超过 0.08mm。

## 增减材复合加工机床的功能性验证

### 1 增材样件扫描路径规划

目前金属增材常见的填充轨迹生成算法有往复增材<sup>[5]</sup>、轮廓偏置增材<sup>[6]</sup>、曲面切片增材<sup>[7]</sup>、分特征增



图5 增材集成界面

Fig.5 Embedded additive manufacturing interface

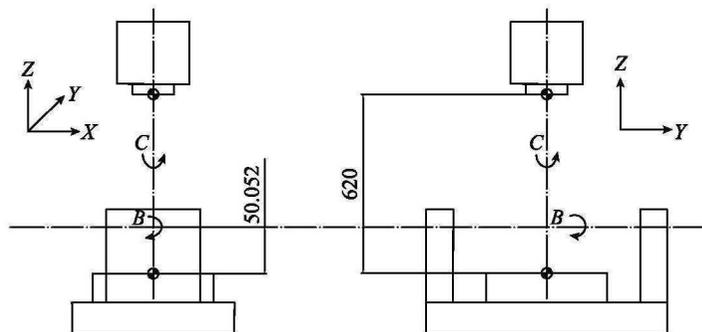


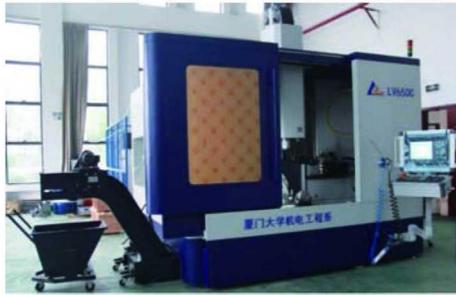
图6 五轴标定示意图

Fig.6 Five-axis calibration diagram

表2 线性轴精度测量结果

Table 2 Measurement results of linear axis accuracy

测量项目/mm	X 轴	Y 轴	Z 轴
平均双向位置偏差范围 M	0.001650	0.000920	0.001700
双向定位系统偏差 E	0.002580	0.001740	0.002320
单向重复定位精度 R↑	0.005621	0.004557	0.001081
单向重复定位精度 R↓	0.004830	0.003562	0.001507
反向差值 B	0.002160	0.001080	0.000680
单向定位精度 A↑	0.007108	0.004557	0.002538
单向定位精度 A↓	0.006347	0.004388	0.002801
双向定位精度 A	0.007297	0.005088	0.003319



(a) 机床正视图



(b) 机床左视图

图7 开发机床的外观图

Fig.7 External view of developed machine tool

材<sup>[8]</sup>、单层无往复增材<sup>[9]</sup>、特殊结构例如薄壁件的结构优化设计<sup>[10]</sup>等,多用于三轴,五轴则应对典型的零部件进行算法选择和优化。

加工试件采用成飞S件和叶轮。S试件侧面存在较大倾斜且倾角连续变化,可以综合检验机床的几何误差和动态误差,叶轮试件叶片360°均布,且极限位置时需要B轴90°左右倾斜,有助于测试极限行程内的加工效果。

S试件采用了两种增材算法,如图9所示。第1种为类似减材表面加工的路径规划算法,采用减材CAM软件生成相应的扫描算法,生成方式为外轮廓偏置,修改参数后可用于增材加工;第2种为分区域往复扫描算法,将整个截面分为5块区域,扫描方向基本保持与截面延伸方向相垂直,可实现特征快速成形、避免增材路径过多重叠。

叶轮试件的增材方法一般来说也有两种,如图10所示,包括沿叶片根部方向和垂直于叶片侧面方向增材,分别进行增材试验,比对最终成形强度、表面质量。

## 2 机床的功能性验证

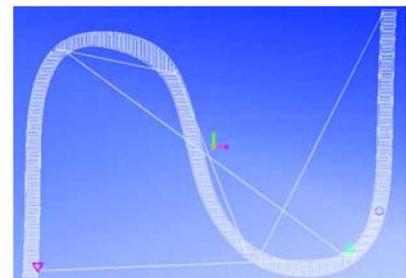
根据已规划的算法进行增材试验是验证算法优劣的唯一标准。基于316不锈钢,最终的增材参数为激光功率1200W、送粉速度为1.2r/min、扫描速度为600mm/min、熔覆的单道宽度为2mm、高度为0.6mm、搭接率为40%,进行增材试加工

试验,并且增材点距离熔覆头头部16mm。

S试件的第1种扫描算法由于单道重叠率高、最终加工有严重凸起,采用第2种增材算法后该现象有明显改善,但区域与区域之间结合处填充率低,并且由于是三轴加工,倾斜部分无法增材成形、有坍塌,需要联动增材加工改变成形角度,如图11所示。



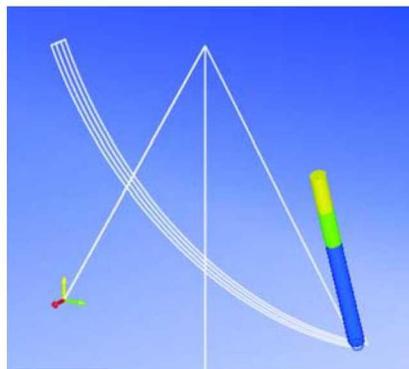
(a) 轮廓偏置算法



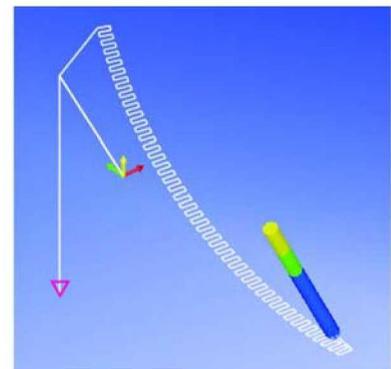
(b) 分区域往复扫描算法

图9 S试件增材填充轨迹生成算法

Fig.9 Algorithms of generating additive manufacturing path for S specimen



(a) 往复扫描算法方向1



(b) 往复扫描算法方向2

图10 叶轮增材填充轨迹生成算法

Fig.10 Algorithms of generating additive manufacturing path for impeller



图8 圆锥台件试切结果

Fig.8 Trail milling results of conical table specimen

叶轮叶片可通过五轴联动加工增材成形,如图12所示,面临的主要问题为机床的拐角减速以及联动减速,五轴联动进给时,如旋转轴或倾斜轴在某处存在角度较大的变化,则该处将发生较长时间的停顿,影响增



(a) 轮廓偏置算法试验结果 (b) 分区域往复扫描算法试验结果

图11 S试件增材制造结果

Fig.11 Results of additive manufacturing for S specimen



(a) 往复扫描算法方向1 试验结果 (b) 往复扫描算法方向2 试验结果

图12 叶轮试件增材制造结果

Fig.12 Results of additive manufacturing for impeller

材表面质量,该现象在沿叶片根部方向进给的扫描方法中较为明显,采用垂直于叶片侧面方向增材,表面质量明显改善。

整个叶轮叶片包括4片主叶片和4片分流叶片,尺寸约为直径200mm、高100mm,其中主叶片增材耗时20min,分流叶片增材耗时18min,整个叶片部分可以在3h内增材完成。

## 结论

本文介绍了五轴增减材混合加工中心集成开发主要技术内容,通过初步的加工试验验证所开发机床增减材加工功能的有效性,并且增材加工速度快,增材出的工件能直接进行减材精加工,可为后续具体的航空零部件增减材加工验证提供设备基础。增减材工艺和算法优化、增材工件质

量性能评价以及具体加工应用将是后续研究聚焦重点。

## 参考文献

- [1] YAMAZAKI T. Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining[J]. *Procedia Cirp*, 2016, 42: 81-86.
- [2] GB/T 34880.2 五轴联动加工中心检验条件(第2部分):立式机床精度检验[S].北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国标准化委员会,2017.
- [3] 夏向阳. 五轴联动数控机床的结构选型研究[J]. *装备机械*, 2018(4): 5-8, 14.

selection of five-axis CNC machine tool[J]. *The Magazine on Equipment Machinery*, 2018(4): 5-8, 14.

[4] 薛菲,王耀民,刘双宇. 激光熔覆同轴送粉喷嘴的研究状况[J]. *机械制造与自动化*, 2015, 44(3): 46-49.

XUE Fei, WANG Yaomin, LIU Shuangyu. Research status of coaxial powder feeding nozzle for laser cladding[J]. *Machine Building & Automation*, 2015, 44(3): 46-49.

[5] 强旭辉. 面向激光选区熔化的扫描路径优化算法研究[D]. 南京:南京理工大学, 2018.

QIANG Xuhui. Research on scanning path optimization for laser selective melting[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.

[6] ABDALKARIEM Hassan. 增材制造中激光扫描算法对倾斜薄壁件力学性能的影响研究[D]. 大连:大连理工大学, 2016.

ABDALKARIEM Hassan. Effect of laser scanning algorithms on mechanical properties of inclined thin-walled parts in additional manufacturing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.

[7] ISA M A, LAZOGLU I. Five-axis additive manufacturing of freeform models through buildup of transition layers[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2019, 50: 69-80.

[8] RUPAL B S, AHMAD R, QURESHI A J, et al. Feature-based methodology for design of geometric benchmark test artifacts for additive manufacturing processes[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 70: 84-89.

[9] JIN Y, HE Y, FU G, et al. A non-retraction path planning approach for extrusion-based additive manufacturing[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, 48: 132-144.

[10] JIN Y, HE Y, DU J. A novel path planning methodology for extrusion-based additive manufacturing of thin-walled parts[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2017, 30(12): 1301-1315.

通讯作者:王振忠,博士,副教授,主要研究方向为先进光学制造(精密 & 超精密磨削、抛光系统开发及工艺技术)和先进制造与自动化(机床数控技术、精密与特种加工技术), E-mail: wangzhenzhong@xmu.edu.cn.

## Research on Developing Technology of Five-Axis Additive-Subtractive Hybrid Machining Center

KONG Liuwei, WANG Zhenzhong, YE Chao, HOU Liang

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

**[ABSTRACT]** In order to realize the compound process of rapid forming and high precision milling for complex pieces, our assignment group developed a five-axis additive-subtractive hybrid machining center. Based on the five-axis additive-subtractive hybrid machining center, the developing process and integrating control principles are expounded, and the control method of total precision is analyzed. Furthermore, the relevant experiments were carried out. The tapered bench specimens in the acceptance criteria of aerospace engineering impeller and five-axis machine tool are used for material subtraction trial manufacturing. We carried out some additive manufacturing experiments for the impeller blades and S specimens, algorithms optimization of generating additive manufacturing path were also applied. The expected machining performance is preliminarily accomplished.

**Keywords:** Five-axis linkage; Additive-subtractive hybrid manufacturing; Integrated development of additive-subtractive manufacturing; Additive manufacturing technology; Precision control

(责编 古索)

(上接第46页)

## Measurement Point Optimization and Modeling Techniques of Spindle Thermal Error for CNC Machine Tool

WANG Jianchen<sup>1,2</sup>, LIN Siqu<sup>1</sup>, SHEN Yuxin<sup>1</sup>, XIE Changxiong<sup>1</sup>, DENG Xiaolei<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Air-driven Equipment Technology of Zhejiang Province, Quzhou University, Quzhou 324000, China;

2. Zhejiang Yonglida CNC Technology Co., Ltd., Quzhou 324000, China;

3. Key Laboratory of 3D Printing Process and Equipment of Zhejiang Province, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**[ABSTRACT]** In order to reduce the influence of thermal error on the machining accuracy of CNC machine tool, the position of temperature rise of machine tool was preliminarily found out by thermal imager, and then the collected temperature measurement point test data was optimized by using gray correlation theory to find out the measurement point with high correlation degree of thermal error. The selected temperature measurement point data and the measured Z-axis thermal error data were divided, and GM (1,*n*) grey prediction and BP neural network were used to establish the thermal error prediction model, which was verified on the test machine tool. The experimental results show that the difference between the predicted results of gray GM (1,*n*) model and the actual measurement is 10.17%, and the difference between the predicted results of BP neural network and the actual measurement results is 5.19%, which is better than the prediction of gray GM (1,*n*) model and can play a role in improving the accuracy of thermal error prediction.

**Keywords:** CNC machine tool; Grey theory; Optimization of temperature measurement point; Correlation; BP neural network; Thermal error prediction

(责编 古索)