

基于 5+1 轴的增减材混合加工验证平台设计与研制^{*}

李仲宇, 李迎光, 刘长青

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 叶轮、整体叶盘等航空发动机结构件的外形复杂、精度要求高,对传统加工方法提出了很大的挑战。增减材混合加工融合增材加工和减材加工的优势,是解决复杂结构零件加工的一种有效手段。为了验证混合加工工艺规划算法的可行性,搭建了基于 5+1 轴的增减材混合加工算法验证平台,以小型雕刻机为基体,以 X 、 Y 、 Z 为 3 个平动轴,以 B 、 C 摇篮摆为转动轴,实现五轴联动,附加一轴控制挤出机喷嘴送料,设计了机械装置。使用导轨机构将 3D 打印挤出机与雕刻机加工主轴集成为一体,减少了混合加工增减材加工操作切换时间,提高了混合加工效率,并使用 Mach3 六轴数控系统控制各轴运动,可完成增减材混合加工过程,实现了对混合加工工艺规划算法的验证。

关键词: 3D 打印; 减材加工; 增材加工; 六轴驱动; 混合加工

Design and Development of an Additive-Subtractive-Integrated Hybrid Machining Validation Platform Based on 5+1 Axes

LI Zhongyu, LI Yingguang, LIU Changqing

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] When using traditional subtractive machining method, the tool can not reach somewhere for some complex parts such as engine impellers, blisks. The machining process would be hard. Additive-subtractive hybrid machining method can be used to machine before obstacles formed, which is an effective way to machine complex parts. Therefore, a hybrid manufacturing process planning algorithm should be researched. In order to validate the feasibility of the algorithm, an additive-subtractive-integrated hybrid manufacturing validation platform based on 5+1 axes is built in this paper. A small engraving machine is used as the base of the platform. X , Y , Z are three translational axes and B , C in the cradle platform are rotation axes, which construct the five-axis system. An additional axis controls feeding of 3D printing extruder. A mechanical device is designed, in which a guide mechanism is used to integrate 3D printing extruder and spindle of the engraving machine. Mach3 six-axis CNC system is used to control the movement of each axis. By this way, an additive-subtractive-integrated hybrid manufacturing process can be realized.

Keywords: 3D printing; Subtractive manufacturing; Additive manufacturing; Six-axis drive; Hybrid manufacturing

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.08.097

在航空制造领域,产品性能的提高对制造方法提出了很大挑战。如叶轮、整体叶盘等航空发动机结构件,其外形复杂、精度要求高,若采用传统数控加工方法进行加工,一方面存在因刀具干涉原因难以满足零件加工要求的问题;另一方面由于刀具干涉引起的可加工性问题,限制了零件的结构设计,难以实现零件最佳性能。如航空发动机叶盘,一定的刀轨切削模式对发动机的气动性能具有重要影响,但是常常由于刀具干涉问题无法完成加工而影响设计。近年来,增减材混合加工的方式

逐渐成为研究和试制的热点技术。混合加工融合增材制造^[1-2]和减材制造过程,可以极大改善刀具干涉问题。由于通常是零件的一部分对刀具运动产生了干涉,若在障碍部分还未成形之前进行加工,则可以使刀具避免干涉,从而可以在无干涉的情况下完成零件的加工,既能得到较高的表面质量和加工精度,又可以避免刀具干涉带来的潜在危险。

目前常见的增材加工与减材加工结合的混合加工方法^[3-5]一般先使用增材加工的方法,当完成零件的整体制造后再使用减材加工方法对零件进行精加工^[6-7],以保证加工精度及表面质量,但此类加工方法无法避免

^{*} 基金项目: 2015 年国家重大专项(2015ZX04001002)。

减材加工时刀具碰撞问题。为了避免以上问题,有学者提出一种面向复杂零件的增材减材交替加工的混合加工方法^[3,8-13]。

现有的切削机床与3D打印机都不能满足增减材交替的混合加工要求。刘肖肖等^[14]设计了一种增减材混合制造的机构,但该机构是4轴系统,仅能实现工作台的回转,可进行钻孔等加工,对于一些需要加支撑的结构,无法实现无支撑结构下的多角度打印和多角度切削,对于复杂零件结构依旧无法实现打印加工。DMG MORI的Lasertec 65 3D机床集激光沉积技术与五轴铣削技术于一体,构成独特的混合加工机床^[15],但该机床造价高昂。为验证混合加工工艺规划研究的算法可行性,本文设计了一种基于5+1轴的增减材混合加工验证平台,以三轴雕刻机加上两轴分度盘转台实现五轴联动,再以一轴的3D打印挤出机送料,并设计了机械结构使用导轨机构将3D打印挤出机与雕刻机加工主轴集成为一体,可实现增材加工和减材加工的交替进行,并在不装卸的情况下进行加工模式切换,完成混合加工,为实现对混合加工工艺规划算法的验证奠定了基础。

1 增减材混合加工验证平台框架

本文构建的增减材混合加工验证平台以Mach3的控制系统为核心,上位机控制连接3个模块:电机控制、温度控制和主轴控制。电机控制是通过Mach3六轴信号接口与步进电机驱动器相连,通过驱动器驱动步进电机运动,在该系统中Mach3控制雕刻机的X、Y、Z3轴,分度盘的B、C两轴以及送料的A轴6个电机,可实现五轴打印;温度控制是上位机通过Arduino控制单片机

获取打印喷嘴温度信号并控制温度范围;主轴控制是通过Mach3变频信号接口与变频器相连,通过变频器调节主轴转速。该系统整体框架如图1所示。

1.1 上位机控制

上位机使用Mach3数控系统控制Mach3主板驱动六轴进行运动,同时使用热敏电阻与单片机对温度信号进行测量并控制。

1.2 六轴驱动

Mach3分别输出6个脉冲信号Step(步进)和Dir(方向),分别控制6个轴的步进与方向,将每个轴的这两个信号接到步进电机驱动器上可驱动步进电机运行,Mach3接口允许最大同时控制6个轴,在本文的混合加工验证平台中该六轴分别为:雕刻机的X、Y、Z轴移动控制;分度盘的B、C轴转动控制;3D打印喷嘴结构的送料速度控制。通过改装雕刻机对Z轴进行加高,在雕刻机平台上固定B、C摆台,并将A轴送料电机固定在雕刻机上,实现六轴机构。

1.3 切削平台

本文的混合加工验证平台是由切削平台和3D打印结构组成,主要是在切削平台(雕刻机)上进行打印结构的集成,因此切削平台是主体。Mach3控制切削平台的三轴雕刻机、两轴分度盘与主轴转速部分。其中主轴转速是通过Mach3主板的变频器端口驱动变频器(或直流调速器)对主轴电机进行调速,从而实现对主轴转速的控制。

1.4 打印结构

打印结构为一套挤出机控制系统,主要由打印喷嘴、远程送料管、热敏电阻与传感线、控制送料的步进电

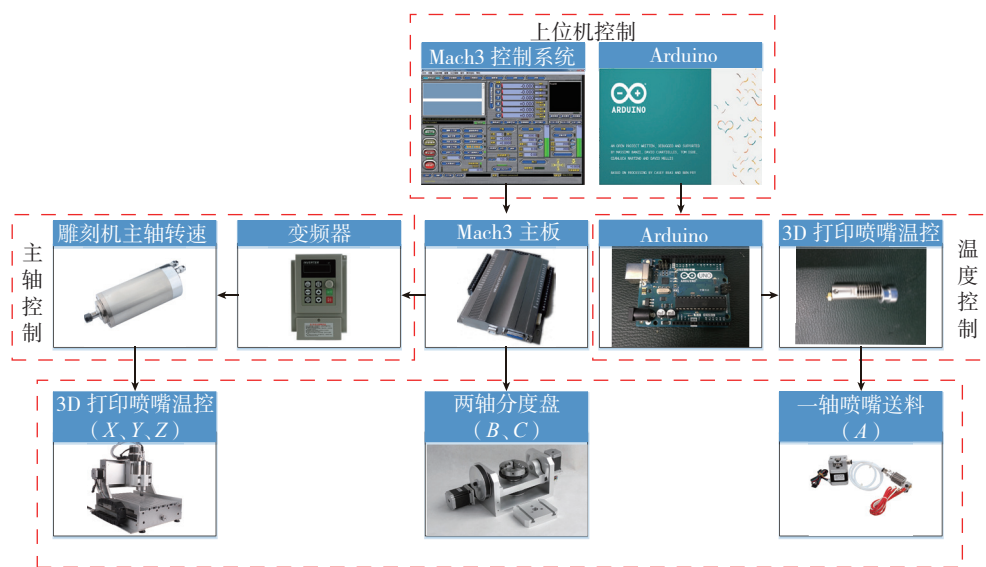


图1 混合加工验证平台框架

Fig.1 Hybrid machining validation platform frame

机和打印材料组成。由 Mach3 主板发出的信号控制步进电机运动,步进电机控制材料送入远程送料管中,并接到打印喷嘴上,由喷嘴上的加热块将打印材料加热至熔融状态并挤出进行打印。其中加热块的温控系统需要自行设计电路,通过加热块上的热敏电阻和传感线获取温度信号并对温度进行精确控制。该平台的核心控制硬件如图 2 所示。

2 六轴驱动装置

本文采用 Mach3 六轴数控系统作为该验证平台的上位机控制模块,使用 Mach3 控制主板连接 6 个轴进行工作。Mach3 是 windows 应用软件,通过并口线控制机器运行,输入信号是通过并口加在输入上的电压,输出信号是输出脚针上的电压,电压大小的测量是以电脑的 0 伏线为基准。Mach3 主板接受主机信号,通过以下两种类型控制该机构。

(1) 六轴控制: Mach3 支持六轴信号,输出的脉冲信号连接步进电机驱动器,最多可驱动 6 个步进电机同时转动。

(2) 变频器控制: 输出端提供信号驱动变频器(或直流调速器)进行调速。

这里的六轴是 5+1 模式: 雕刻机 X 、 Y 、 Z 3 轴的移动、两轴分度盘 B 轴和 C 轴的转动实现五轴联动,加上挤出机喷嘴的送料轴控制。

Mach3 数控系统与其他数控系统操作类似,提供手轮操作(键盘控制)、参数调节功能,并可自己通过修改 xml 界面文件来定制界面风格与显示模式。定制后的 Mach3 界面如图 3 所示。

Mach3 使用的数控程序为普通雕刻机数控程序风格,由 G 、 M 、 S 、 F 等指令控制。通过 Mach3 控制板,将并口信号转化为 6 个轴的脉冲信号输出,每个轴分别提供 Step 和 Dir 两个信号,通过步进电机驱动器则可直接驱动电机运作。

Mach3 控制板在控制六轴运动的同时,还可以通过变频器调节雕刻机主轴的速度,控制切削时的主轴转速。程序中的 S 指令可通过发送脉冲信号控制输出交流电压频率,从而调整三相电机 U 、 V 、 W 的通电切换速度,进而控制主轴电机的转速。

3 打印与切削集成机构设计

为避免刀具干涉,混合加工过程中增材与减材加工操作交替进行,增减材加工操作的交替过程需要对刀具和打印喷嘴进行装卸,而该过程往往耗费大量的时间,导致混合加工过程整体效率低下。为实现高效的混合加工,需要减少增减材加工操作交替的时间,为此设计

了打印与切削集成的机构。

由于刀具与打印喷嘴的装卸过程耗费了大量时间,本文设计的机构将打印结构集成在切削主轴上,使整个过程无需对刀具与打印喷嘴进行装卸,只需在切换加工模式时改变刀具与打印喷嘴的相对位置即可。为实现该功能,在实际混合加工过程中,打印喷嘴和切削刀具分别在另一个工艺进行时不能发生碰撞,即打印时切削刀具不能干涉,切削时打印喷嘴不能干涉,因此本文设计的机构打印喷嘴可上下调节,以避免各自工艺的刀具干涉情况。打印喷嘴与刀具的相对位置应满足 X 、 Y 不变, Z 轴可调节,设计的机构将打印喷嘴集成在主轴上,且实现上下位置可调节。图 4 为该机构的示意图,雕刻机主轴由主轴夹具固定,本文提出的集成机构即在主轴夹具上安装导轨和滑块,通过上下调节滑块位置实现打印模式与切削模式的互换。打印喷嘴通过配件由螺纹连接固定到滑块上,滑块可在导轨上上下移动,导轨上最底部安装有小螺栓,可控制滑块的滑行距离范围,而导轨与夹具通过一个垫块连接固定,其连接为螺纹紧固

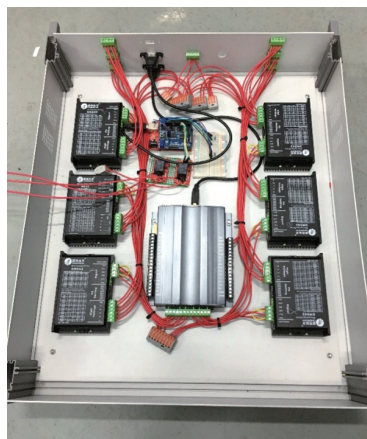


图2 混合加工验证平台控制箱

Fig.2 Control box of hybrid machining validation platform



图3 Mach3自开发界面

Fig.3 Mach3 self-developed interface

连接。

该机构当使用打印模式时,将滑块向下调节到最低点,使用小螺栓在导轨最下部作为挡块,滑块碰到螺栓即滑到最低点,将滑块锁紧即可进行打印工作,可保证多次调节时移动至同一位置,此时最低点处打印挤出机的头部比刀具稍低,而打印是由底向上的,因此切削刀具不会干涉零件;当使用切削模式时,将滑块调至最上端,并使用滑块侧方螺钉锁紧,由于最高点处打印挤出机与刀柄平齐,在最高点附近范围内打印头都不会干涉零件切削过程,无须定位只需使用滑块侧面的螺钉将其锁紧即可。

这种实现方法使打印与切削在同一工作空间内,切换加工模式时无须更换刀具和喷嘴,并且上下可移动模式避免了刀具与喷嘴的干涉。在增减材交替加工过程中使用该机构,进行频繁换刀工作,无须装卸,可减少混合加工时间,提高混合加工效率。

4 温控系统设计

打印挤出机结构需要加热材料,将材料加热至熔融状态后挤出,并在空气中迅速冷却成形。给加热块通电后,温度会持续升高,为使温度保持在合理范围之内,需要设计温控系统调节温度。

温控系统的电路如图5所示,在挤出机的加热块上安装一个热敏电阻,并与任意一个测量电阻串联,与继电器一起接为一个闭合电路,采用单片机测量信号并控制继电器开闭。温控过程如下:

(1)将 V_1 、 V_2 接到单片机信号上,通过信号口得到测量电阻两端的电压 U' 。

(2)计算得到热敏电阻两端的电压 U :

$$U = V - U' \quad (1)$$

式中, V 为电源电压, U' 为测量电阻两端的电压。

(3)通过比例关系得到热敏电阻阻值 R :

$$R = \frac{U}{U'} \times R' \quad (2)$$

式中, R' 是测量电阻的阻值。

(4)根据选用的热敏电阻的温度-阻值关系表,得到当前阻值下的温度 T 。对于适合打印的温度范围 $[T_1, T_2]$,当 $T > T_2$,则控制断开继电器,电路断开则停止升温,温度开始下降;当 $T < T_1$,则控制闭合继电器,电路连接则开始升温。通过此方法可保持温度在期望范围之内。

5 试验验证

该试验验证平台通过将打印结构集成在切削平台上,能实现打印-切削交替进行的加工工艺,该混合加工验证平台如图6所示。图6(a)为打印模式,将滑块

向下调节到最低点并锁紧即可进行打印工作;图6(b)为切削模式,将滑块调至最上端,可进行切削工作。

为验证该平台的可行性,选择了一个需进行混合加工的零件,设计编写了五轴打印-切削刀轨程序,进行了试验验证。验证零件如图7(a)所示,由于侧壁部分偏角需要支撑结构,故使用五轴联动形式进行打印与切削。图7(b)中以三轴打印底座,并在底座上对每层偏一定角度进行五轴打印。图7(c)显示了对底座上方五轴打印部分进行切削的结果,试验表明该装置可实现

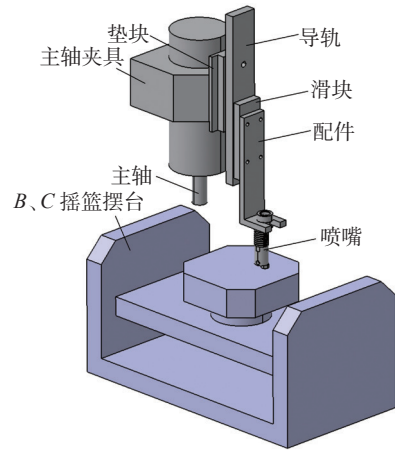


图4 打印-切削集成装置结构图
Fig.4 Structure of printing-cutting integrated device

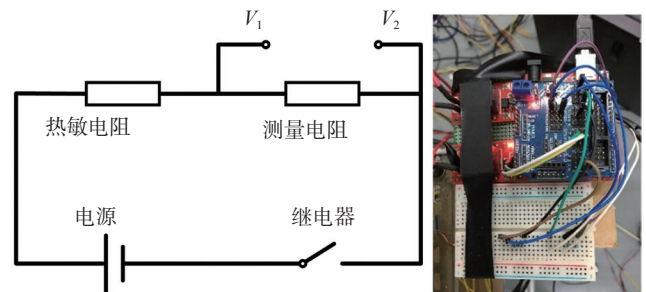
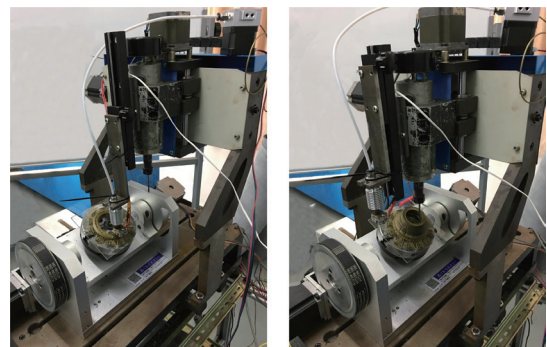


图5 温控电路
Fig.5 Temperature control circuit



(a) 打印模式 (b) 切削模式

图6 混合加工验证平台
Fig.6 Hybrid machining validation platform

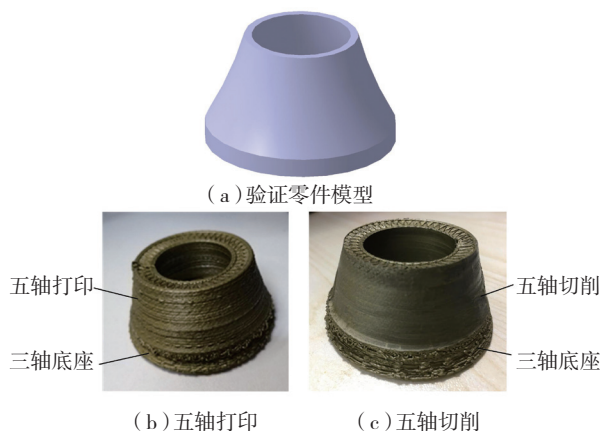


图7 混合加工平台试验验证

Fig.7 Experiment validation of hybrid machining platform

五轴联动打印-切削工作,为五轴联动混合加工工艺规划的算法研究提供了验证平台。

6 结论

混合加工方法可解决复杂结构件的难加工问题,为验证混合加工工艺规划算法的可行性,本文通过将3D打印挤出机结构集成在切削雕刻机上,设计了一种基于5+1轴的增减材混合加工验证平台。该平台使用导轨机构将3D打印挤出机与雕刻机加工主轴集成为一体,实现打印与切削在同一工作空间内,切换加工模式时无须更换刀具和喷嘴,使混合加工的增材与减材交替过程时间大幅减少,能够提高混合加工过程效率,并使用Mach3六轴数控系统控制各轴运动,完成五轴增材加工和减材加工的交替进行,可实现混合加工工艺规划算法的验证。

由于五轴混合加工工艺规划算法与后置处理复杂,目前使用的零件通过手动编程实现打印-切削工艺,进行混合加工平台验证,后续会针对发动机叶轮复杂零件研究其混合加工工艺规划算法和基于B-C摆的混合加工后置处理方法,实现复杂零件的混合加工工艺规划与数控程序自动生成,完成复杂零件的混合加工验证。

参考文献

- [1] 封会娟, 闫旭, 唐彦峰, 等. 3D打印技术综述[J]. 数字技术与应用, 2014(9): 202-203.
FENG Huijuan, YAN Xu, TANG Yanfeng, et al. The overview of 3D printing technology[J]. Digital Technology and Application, 2014(9): 202-203.
- [2] 张学军, 唐思熠, 肇恒跃, 等. 3D打印技术研究现状和关键技术[J]. 材料工程, 2016, 44(2): 122-128.
ZHANG Xuejun, TANG Siyi, ZHAO Hengyue, et al. Research status and key technologies of 3D printing technology[J]. Journal of Material

Engineering, 2016, 44(2): 122-128.

- [3] NEWMAN S T, ZHU Z, DHOKIA V, et al. Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2015, 64(1): 467-470.
- [4] 张曙. 混合加工, 挑战传统[J]. 现代制造, 2015(51): 10-12.
ZHANG Shu. Hybrid machining, tradition challenge[J]. Modern Manufacturing, 2015(51): 10-12.
- [5] 张曙. 增材制造和切削混合加工机床[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(6): 1-7.
ZHANG Shu. Hybrid machining with additive and cutting technologies[J]. Machine Building & Automation, 2015, 44(6): 1-7.
- [6] REN L, SPARKS T, RUAN J Z, et al. Integrated process planning for a multiaxis hybrid manufacturing system[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2010, 132(2): 237-247.
- [7] KARUNAKARAN K P, SURYAKUMAR S, PUSHPA V, et al. Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(5): 490-499.
- [8] CHEN L, XU K, TANG K. Optimized sequence planning for multi-axis hybrid machining of complex geometries[J]. Computers & Graphics, 2018, 70: 176-187.
- [9] 马立杰, 樊红丽, 卢继平, 等. 基于增减材制造的复合加工技术研究[J]. 装备制造技术, 2014(7): 57-62.
MA Lijie, FAN Hongli, LU Jiping, et al. The research based additive and subtractive hybrid manufacturing[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014(7): 57-62.
- [10] 董一巍, 赵奇, 李晓琳. 增减材复合加工的关键技术与发展[J]. 金属加工(冷加工), 2016(13): 7-12.
DONG Yiwei, ZHAO Qi, LI Xiaolin. The key technologies and development of additive and subtractive hybrid manufacturing[J]. Metal Working, 2016(13): 7-12.
- [11] XIONG X H, ZHANG H O, WANG G L. Metal direct prototyping by using hybrid plasma deposition and milling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(1): 124-130.
- [12] FLYNN J M, SHOKRANI A, NEWMAN S T, et al. Hybrid additive and subtractive machine tools - Research and industrial developments[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015, 101: 79-101.
- [13] ZHU Z, DHOKIA V, NEWMAN S T. The development of a novel process planning algorithm for an unconstrained hybrid manufacturing process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15(4): 404-413.
- [14] 刘肖肖, 吕福顺, 刘原勇, 等. 一种增材与减材复合制造机研究[J]. 制造技术与机床, 2017(6): 49-52.
LIU Xiaoxiao, LÜ Fushun, LIU Yuanyong, et al. Research on a composite machine for increasing material and reducing material[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2017(6): 49-52.
- [15] 张曙. 增材与切削混合五轴加工机床技术[J]. 金属加工(冷加工), 2016(5): 2-4.
ZHANG Shu. Five-axis hybrid machining with additive and cutting technologies[J]. Metal Working, 2016(5): 2-4.

通讯作者: 李迎光, 教授、博士生导师, 研究方向为航空航天复杂结构件数字化制造与智能制造, E-mail: liyingguang@nuaa.edu.cn.

(责编 逸飞)