

引文格式: 段嘉奇, 郝明晖, 秦若森, 等. 五轴连续纤维 3D 打印机及其数控系统开发[J]. 航空制造技术, 2022, 65(6): 68-75.

DUAN Jiaqi, HAO Minghui, QIN Ruosen, et al. Development of 5-axis continuous fiber 3D printer and its numerical control system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(6): 68-75.

五轴连续纤维3D打印机及其数控系统开发*

段嘉奇, 郝明晖, 秦若森, 张 鹏, 富宏亚

(哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

[摘要] 为了解决传统三轴连续纤维 3D 打印复杂轨迹精确成型困难的问题,设计搭建了五轴连续纤维 3D 打印机,该 3D 打印机具有 5 个联动轴(XYZBC)以及 1 个树脂螺杆挤出装置辅助轴。针对典型的 3D 打印控制方案存在可联动轴数少、可扩展性差、实时性差等问题,对全软件型开放式数控系统进行了研究,并将其应用于连续纤维增材制造领域。基于开源数控平台 LinuxCNC 及 EtherCAT 工业以太网设计开发了面向五轴连续纤维 3D 打印机的全软件型开放式数控系统。通过优化 RT-Preempt 实时内核、开发集成 IgH-EtherCAT 的 HAL 模块,完成五轴联动控制,并将螺杆挤出轴作为主轴以实现其转速的精准控制。经测试,用户层与内核层调度最大抖动控制在 5 μ s 以内,集成 EtherCAT 的数控系统最大抖动 < 50 μ s,实时性较好。最后通过标准拉伸性能试验和空间点阵结构的成型试验验证了五轴连续纤维 3D 打印系统方案的可行性。

关键词: 连续纤维增强; 树脂基复合材料; 3D 打印; LinuxCNC; EtherCAT; RT-Preempt

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2022.06.068



段嘉奇

博士研究生,研究方向为开放式智能数控系统。

3D 打印作为一种增材制造技术,直接以数字模型为基础,通过

“自下而上”的逐层堆叠方式实现对复杂构件的自由制造,由于其具有材料利用率高、成型能力强及自动化程度高等优势,目前已在航空航天、医疗产业、汽车工业等领域广泛应用。连续纤维增强热塑性复合材料 3D 打印技术凭借其产品比重小、可原位固化及可回收等优点,目前已成为 3D 打印技术的研究热点^[1]。俄罗斯 Anisoprint 公司开发了复合纤维共挤技术并推出 Composer 系列 3D 打印机^[2]。美国 Arevo 公司开发出基于激光直接能量沉积的专利连续纤维 3D 打印工艺并已实现复合材料自行车车架的制造。美国 Markforged 公司推出双喷头结构的 3D 打印机 Mark One 和 Mark Two,实现对连续纤维增强树脂复合材料 3D 打印技术商业化推广^[3]。国内学者在该领域的研究起步较早,西安交通大学田

小永课题组研发出国内首款基于“共挤出”工艺连续纤维 3D 打印机并在工艺参数优化、在线高压浸渍、功能化打印及产品的回收再利用方面开展了系列研究^[4-8];北京机科国创轻量化科学研究院有限公司申请了采用压辊装置提高打印层结合强度的专利^[9]。同济大学的发明专利使用超声振动器提高熔融树脂与连续纤维的浸渍程度^[10]。

目前的连续纤维 3D 打印机多为三轴系统,无法充分发挥连续纤维轴向力学性能优势、打印模式单一和交互性差等问题严重制约了复杂结构产品的成型质量及应用范围^[11],而提高 3D 打印机的运动自由度,增设纤维剪断装置、送丝装置、压辊等后处理装置可以很好地解决这些问题。然而 PC+MCU+ 硬件控制卡等形式的传统三轴 3D 打印机控制系

*基金项目: 国家自然科学基金(51875134)。

统存在支持轴数较少、可扩展性差、实时性差等问题^[12]。此外,西门子等厂商开发的五轴数控系统存在成本高、非开放的缺点。因此,利用开放式数控系统开发具有良好可扩展性及实时性的五轴连续纤维 3D 打印机控制系统将会推动该领域的进一步发展。

当前,以 PC 机为硬件平台,在实时 Linux 或 Windows 环境下开发全软件型开放式数控系统,是数控领域的前沿性工作,国内外对全软件型开放式数控系统做了许多深入的研究与探索。2013 年山东大学 Wang 等^[13]基于实时以太网 EtherMAC 和 Windows NT 设计了全软件型数控系统,提高了中断服务程序的优先级,大大提高了实时性能。2016 年厦门大学 Huang 等^[14]基于 Linux 系统和 RT-Linux 内核完成了五轴电火花加工(EDM)数控系统 EDM CNC 的开发,实现了对涡轮叶片的加工。2018 年哈尔滨理工大学 Meng 等^[15]提出了一种基于软集成通信模块的新型开放架构数控系统——OACNC,提供了一种通过判断访问号来完成定期实时通信的新方法。

国外研究人员基于开源数控架构软件 LinuxCNC 开展了系列研究工作。2015 年德国机械与安拉根堡研究所利用 PC 板卡 CIFX50-RE 在 LinuxCNC 上集成了 SercosIII、EtherCAT 和 PROFINET 等多种工业实时以太网协议^[16]。2016 年捷克布尔诺工业大学的 Arm 等^[17]基于 Debian3.4 发行版的 LinuxCNC 2.7 上完成了 Linux RTAI 的性能测量,分别在用户空间及内核空间实现了软实时及硬实时功能。

国内外学者的工作表明,全软件型开放式数控系统具有实时性好、可扩展性强的特点,但其在增材制造领域的研究较少。为提高 3D 打印机运动自由度,实现对辅助机构的集成控制,解决传统 3D 打印机控制方案

可扩展性差、实时性差等问题,本研究首先搭建基于熔融沉积原理的摆头转台式五轴连续纤维 3D 打印机,在此基础上开发全软件型开放式数控系统以实现五轴联动控制;增设螺杆挤出装置并将其作为主轴以实现转速的精准控制;最后通过打印试件对所开发全软件型开放式数控系统的可行性进行评价。

1 连续纤维 3D 打印机构成

为了实现复杂构件的 3D 打印成型,连续纤维复合材料的增材制造路径不仅要实现面内的连续,还要有空间的连续性,这就需要 3D 打印设备具有高度的灵活性。因此,本研究基于上述要求设计了连续纤维 3D 打印机的机床运动系统、核心部件和控制系统,3D 打印机床的整体结构组成如图 1 所示。

1.1 连续纤维 3D 打印机运动系统

3D 打印机运动系统是由 3 个被动轴 X 、 Y 、 Z 和 2 个旋转轴 B 、 C 构成的摆头转台式五轴运动系统,并配有螺杆挤出辅助轴(S),机床整体采用一体化基座床身,使得机床本身具有良好的结构刚度,机床运动系统结构如图 2 所示。

为了满足连续纤维 3D 打印最小层间打印厚度 0.1mm 的成型精度要求与运动平稳性要求, X 、 Y 、 Z 三轴采用滚珠丝杠精密传动,且 Y 轴设计为龙门双驱形式,具有较强的承载能力和运动平稳性。 X 、 Y 轴有效行程为 500mm, Z 轴有效行程为 300mm; B 轴为可绕 Y 轴旋转的摆头,其上安装有打印头,运动范围 $\pm 180^\circ$; C 轴为可绕 Z 轴旋转的转台,固定在机床基座上,运动范围为无限旋转,在该机床的有效运动范围内可以实现打印喷嘴的任意位姿。

1.2 连续纤维 3D 打印机核心部件

连续纤维 3D 打印机的打印喷头和打印热床是实现连续纤维 3D 打印成型的核心部件。为提高打印

头内树脂的浸渍压力,改善纤维的浸润质量,采用螺杆挤出的方式作为打印装置的进料方式。打印基本流程为颗粒状树脂原料进入树脂料筒,在螺杆挤出的过程中,树脂在螺杆挤出剪切和加热线圈的作用下,由固相软化变为熔融态,经过持续的挤压作用,排出了树脂熔体内部的空气和水汽,得到均匀高压的树脂熔体,熔融树脂被挤出至树脂-纤维共混喷头处,实现树脂对纤维的主动浸渍,而后在纤维的作用下,通过细长喷嘴将纤维增强树脂材料送出至打印热床实现预成型打印,最后通过外加冷风实现树脂的迅速固化成型定位,下面分别介绍连续纤维 3D 打印喷头和打印热床。

连续纤维 3D 打印喷头由伺服电机、挤出螺杆、螺旋加热管、树脂料筒、树脂-纤维共混喷头与挤出嘴组成,具有熔融树脂、共混树脂与纤维、送出共混料等功能。螺杆挤出装置由伺服电机控制,构成了一个辅助轴,与五轴运动系统一起构成“5+1”

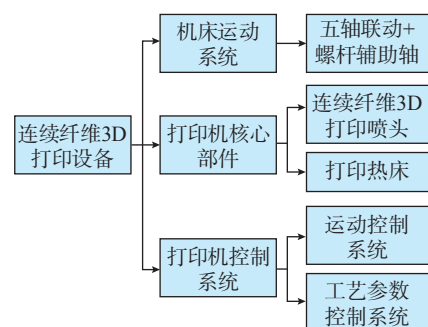


图1 3D打印机床的整体结构组成

Fig.1 Structure of 3D printing machine tool

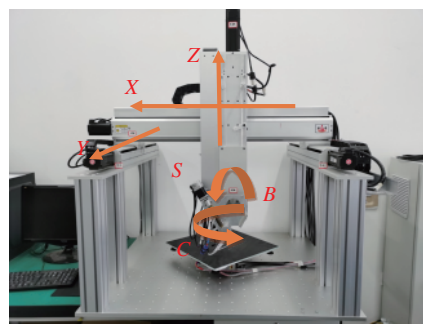


图2 3D打印机的五轴运动系统结构

Fig.2 5-axis motion structure of 3D printer

轴的运动形式。打印喷头重 5kg,打印速度为 0~500mm/min,最高加热温度 500℃,出丝直径 2~4mm。螺杆挤出装置参数为螺杆直径 8mm、长度 82mm、挤出嘴直径 1mm,经计算,在 1rad/s 的转速下,可以推动熔融树脂在挤出嘴中以 15.2mm/s 的均匀速度挤出。打印头整体与机加工铝板上的定位孔以螺栓形式连接,再由中间连接板实现打印头与机床的连接固定,其结构示意如图 3 所示。

打印热床尺寸为 230mm × 230mm,最大加热温度 100℃,具有调平功能以及加热保温功能,在保证打印试件平稳性的同时,也能防止打印薄边结构发生翘曲。热床的 4 个顶点分别安装弹簧螺旋调节器用以调节平面度,通过热床铝板内的电阻丝实现加热,同时配备了贴片式热电偶进行测温,由温控表控制打印热床的温度。打印热床通过中间连接板

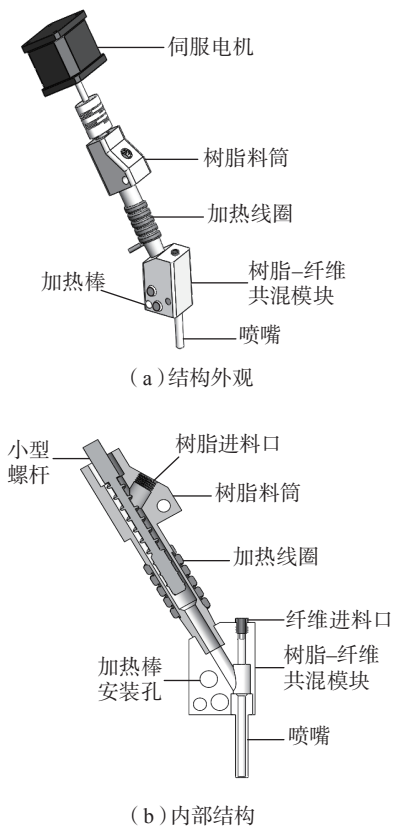


图3 连续纤维3D打印喷头的结构示意图
Fig.3 Structural sketch of continuous fiber 3D printing nozzle

与转台相连,转台再固定连接到机座上,其结构形式如图 4 所示。除了打印热床,为了热塑性树脂的快速冷却固化,打印辅助工具还有功率 20W 的风扇,其目的在于提供流动冷风,快速带走热量,促进树脂固化。

1.3 连续纤维3D打印机控制系统

为了完成对连续纤维 3D 打印机各硬件设备的控制,设计了打印机控制系统,具体分为运动控制系统和工艺参数控制系统。

1.3.1 运动控制系统

3D 打印机的 6 个轴均采用伺服驱动器和电机进行半闭环控制。为了平稳驱动重量约 5kg 的连续纤维 3D 打印喷头,确保打印精度,X、Y、Z 轴作为 3 个直线轴,其中 Y 轴为双电机驱动,涉及的 4 个电机功率为 400W,输出扭矩为 1.27N·m;旋转轴 B 轴功率 200W,输出扭矩为 0.64N·m;考虑到体积与重量,转台 C 轴与螺杆挤出装

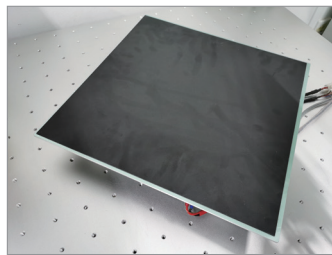


图4 打印热床图
Fig.4 3D printer heat build plate

置所需的旋转轴电机选用了 100W 的电机。上位机为安装了 Linux 系统的 PC 机,仅通过网线直连的方式建立与伺服系统的通信,无任何中间耦合模块,构成的运动控制系统如图 5 所示。

1.3.2 工艺参数控制系统

工艺参数控制系统主要由 3 个温度控制部分组成:打印热床温度控制、螺杆料筒温度控制以及树脂-纤维共混模块温度控制。3 个部分分别承担打印工艺关键点的温度控制,确保树脂的熔融状态,为多工艺参数的探究提供条件。

首先,树脂在螺杆料筒中需要实现由玻璃态到高弹态,最后达到黏流态的转变,其中玻璃态到高弹态的转变要求的温度差最高,需要较大的热能,因此采用加热范围广、功率大的线圈加热方式,通过 PID 实现对加热温度 ±1℃ 的控制,温度控制范围为:室温 ~350℃,稳定性和均匀性较好。其次,相较于熔融树脂,树脂-纤维共混所需要的温度变化范围更小,确保树脂熔化后与纤维浸润结合,工艺窗口范围更小,因此选用棒式加热,可实现 ±0.5℃ 的温度调节,主要起到保温作用,防止温度过低导致树脂流动性变差以及温度过高导致树脂高温变性。最后,打印热床的预热与保温是为了保证成型质量,防止单丝

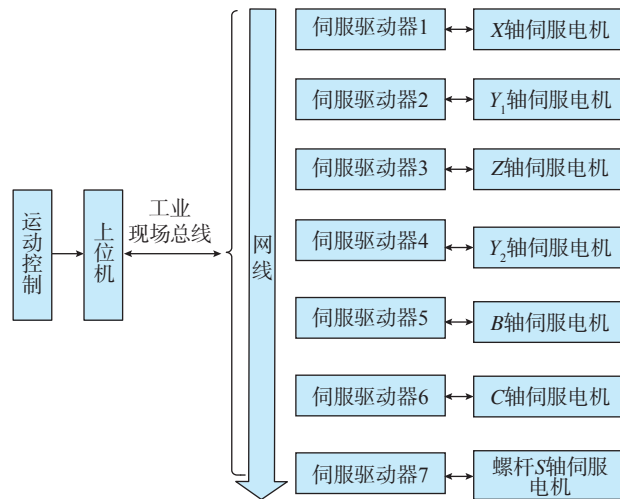


图5 打印机运动控制系统组成
Fig.5 Composition of printer motion control system

打印件发生翘曲,因此选用了与熔融树脂线圈加热相同的温度控制方案,其温度范围为室温~100℃,工艺参数控制系统组成如图6所示。

2 全软件式数控系统总体框架设计与搭建

基于LinuxCNC开源数控平台进行了全软件式数控系统的设计与搭建, LinuxCNC由美国标准与技术研究院研制,可用于实现机器人与机床的运动控制。由于LinuxCNC不支持EtherCAT协议,需要利用硬件抽象层技术将EtherCAT开发为HAL模块并封装集成进LinuxCNC。连续纤维3D打印机全软件式数控

系统的整体框架如图7所示,搭建的过程包括Linux系统实时内核的优化以及IgH-EtherCAT HAL模块的开发与封装。

2.1 Linux系统实时内核的优化

在开发过程中,测试发现在PC机及实时内核默认设置下,实时线程Latency可达几百μs,严重影响总线通信同步精度,造成机床伺服系统抖动和异响。因此对实时内核进行调优,将实时线程的周期抖动和延迟降低到一个可以接受的范围十分必要(<10μs)。RT-Preempt不需要专用线程控制API,完全兼容POSIX线程API,而且RT-Preempt的实时性能较好,本研究选择RT-Preempt作

为实时内核调优方案。

在PC机安装了Linux Mint系统的LMDE3 Cindy版本并进行了内核实时调优,主要有4个方面的操作:PC机BIOS设置、内核配置选项、内核启动选项和中断绑定处理器核心。由于Linux系统出于负载均衡的考虑,会将系统中断均匀分布到各个处理器核心上,导致实时任务被中断抢占,带来延迟,所以需要将该机制禁用,并利用Linux系统Irq Affinity机制,将所有中断绑定到一个非实时处理器上。

2.2 IgH-EtherCAT的HAL模块

开发

为了实现对从站的实时控制,将IgH-EtherCAT封装为HAL模块实现EtherCAT主站与LinuxCNC的双向数据流通,既能将LinuxCNC的控制指令通过EtherCAT主站下达到各轴也即从站设备,又能将从站设备反馈回来的数据上传至LinuxCNC从而完成闭环控制。硬件抽象层(HAL)采用模块化的方法表示数控系统的各个硬件资源,HAL模块从设计开发到使用的整体流程如图8所示。

IgH-EtherCAT的HAL模块功能包括实现EtherCAT主从站功能,并暴露所需要的Pins, LinuxCNC的控制指令通过该HAL模块下达到从站设备,也可将各从站设备采集上来的数据经过各引脚传输至LinuxCNC内部,主要实现过程如下。

(1)完成主函数框架搭建。主函数实现的功能为HAL模块的创建、HAL引脚的声明与暴露,以及EtherCAT函数的调用,代码框架如图9所示。

(2)在完成主函数框架搭建后需要具体实现IgH-EtherCAT功能,其中ecat_master_init、ecat_master_exit、ecat_master_update这3个函数是实现IgH-EtherCAT具体功能的函数。图10为具体的代码框架:主从站的配置流程、访问过程数据、执行周期性任务。将XYZBC 5个联动

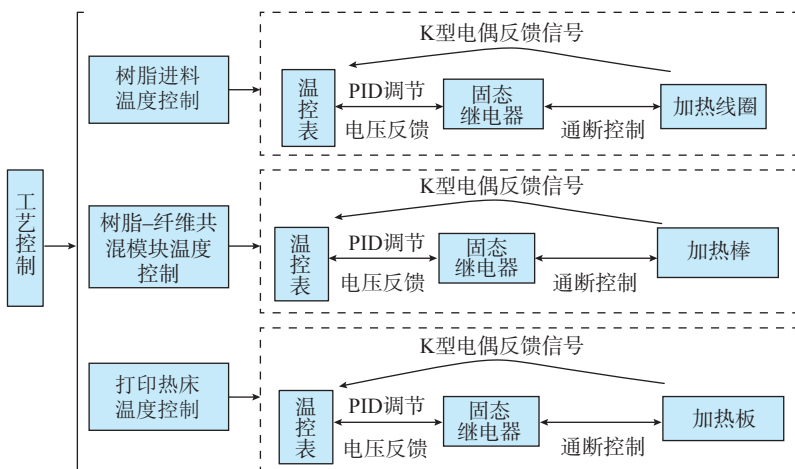


图6 工艺参数控制系统组成

Fig.6 Composition of process parameter control system

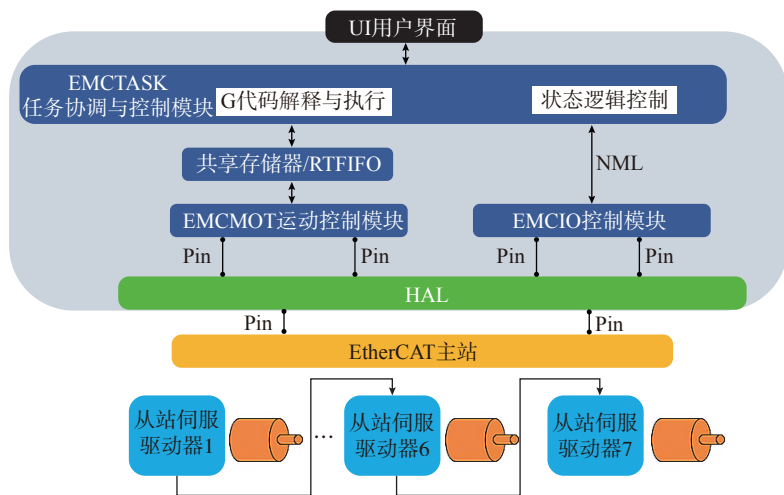


图7 全软件式数控系统整体框架

Fig.7 Overall framework of soft-CNC system

轴配置为周期同步位置(CSP)模式,将螺杆辅助轴配置为周期同步速度(CSV)模式。尤其需要注意的是,必须启用EtherCAT的分布式时钟,才能保证总线通信同步精度。

2.3 数控系统实时性测试

在完成全软件式数控系统的搭建以及IgH-EtherCAT HAL模块的开发后,需要对该数控系统进行实时性分析。首先采用LinuxCNC自带的Latency-Plot工具对用户层与内核层调度进行实时性测试,测试图横

标为测试时长,s;纵坐标为Latency时间,μs。如图11(a)和(b)为Base-thread、Servo-thread在未安装以及未优化实时内核的最大抖动,分别达到15000μs和150μs。在完成实时内核优化后,Latency测试结果如图12所示,最大抖动控制在5μs以内。广州数控设备有限公司在文献[18]采用了Linux+Xenomai的双内核改造方案,其内核层实时任务调度延迟绝大部分集中在10μs以下,平均延迟不超过10μs。本研究所搭建数控系统内核层的最大抖动在5μs,优于其延迟水平。图13为集成EtherCAT的数控系统抓包测试,横坐标是抓包个数,纵坐标是相邻报文的间隔时间,s;最大抖动<50μs,满足数控系统响应在1ms及以下的实时性要求^[19]。

2.4 连续纤维3D打印试验

利用搭建好的数控系统完成连续纤维3D打印试验。首先完成标准拉伸测试件的3D打印,基体材料为易生公司的PLA,增强体材料为光威拓展碳纤维公司的TZ300-3K碳纤维,单丝直径7μm,图14为制备的平板测试件,采用单束合股6K(2×3K)碳纤维和线材剪断制成的树脂颗粒,长宽厚尺寸分别为

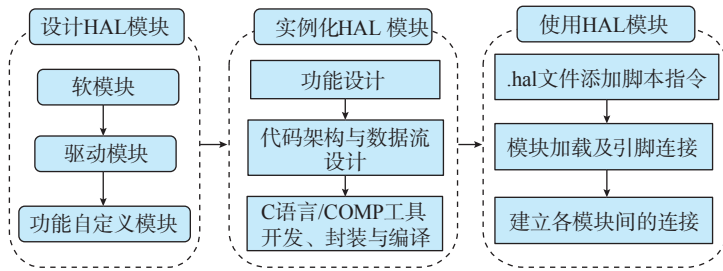


图8 HAL模块的设计开发及使用流程

Fig.8 Design, development and application process of HAL module

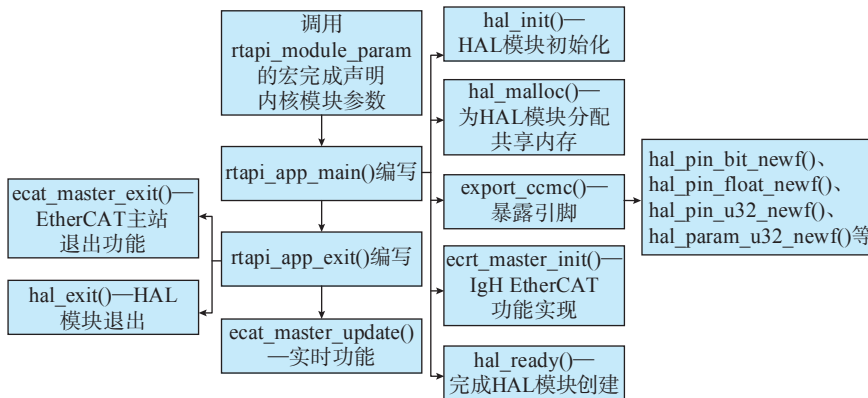


图9 主函数代码框架

Fig.9 Framework for main function code

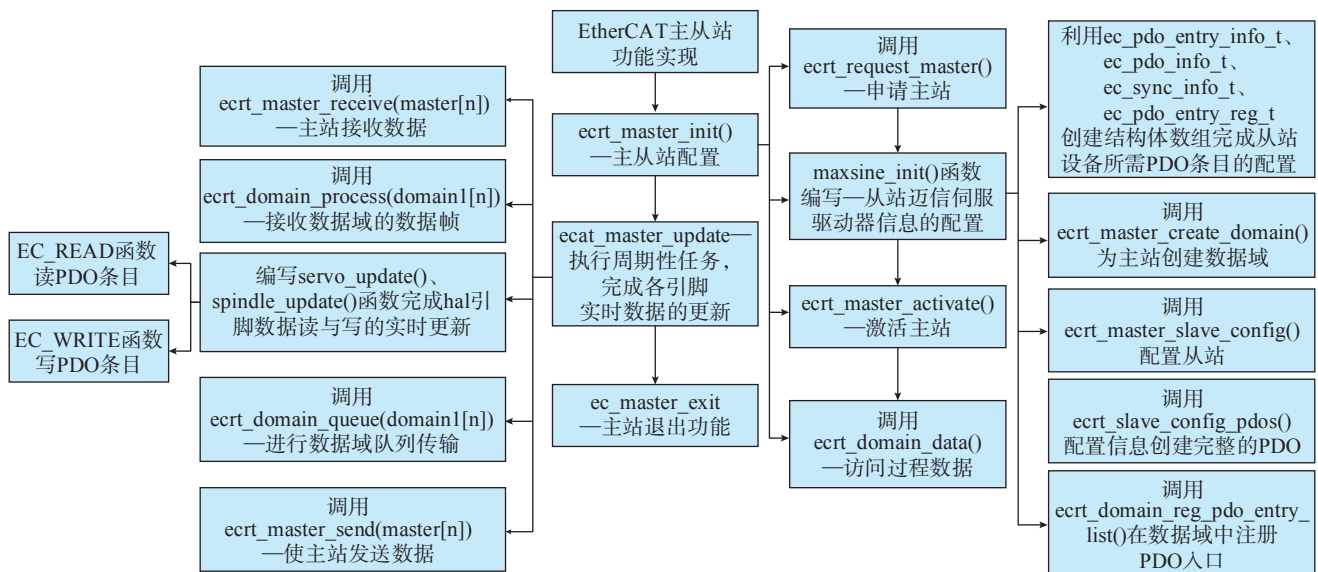


图10 IgH-EtherCAT主从站功能实现代码框架

Fig.10 Code framework for realization of host-slave station function in IgH-EtherCAT

200mm × 30mm × 3.5mm。图 15 为从测试件上取样进行试样截面形貌观测,从截面形貌上可以分为树脂分布区、浸润区和纤维分布区。可以看出,孔隙主要集中在纤维束的中心部分。并参照 GB/T 1447—2005 标准,对该平板件进行拉伸性能测试,测试结果打印试件拉伸强度为 136.79MPa,拉伸模量为 26.3GPa,其拉伸强度是纯树脂样件的 1.9 倍。

为了验证数控系统复杂结构的打印能力,进行空间点阵结构的 3D

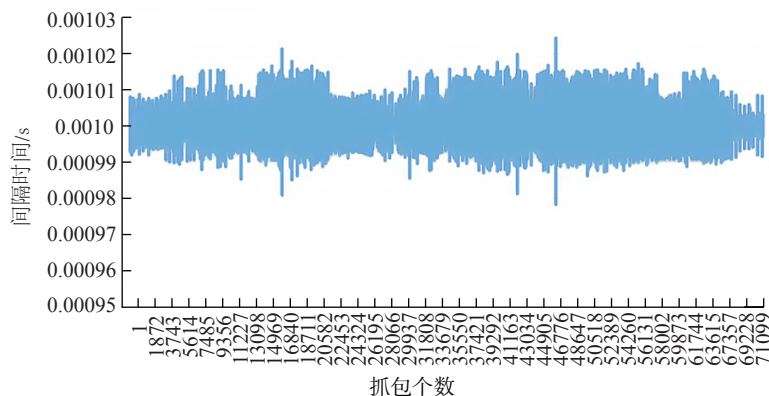
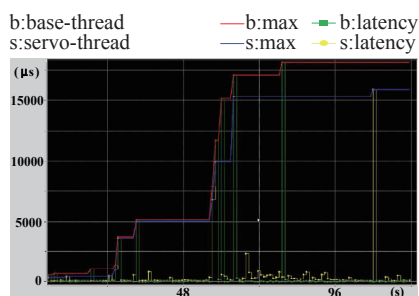
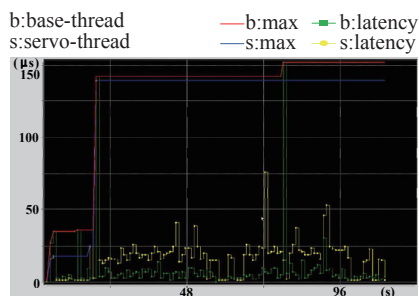


图13 优化实时内核后的EtherCAT抓包测试
Fig.13 Capture test of EtherCAT after optimizing real-time kernel



(a) 未安装实时内核的最大抖动



(b) 未优化实时内核的最大抖动

图11 未安装和未优化实时内核情况下的内核实时性测试

Fig.11 Kernel real-time performance test without installing and optimizing real-time kernel

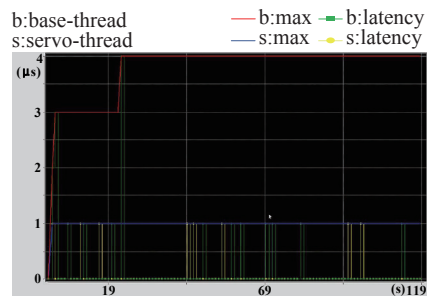


图12 优化实时内核后的内核实时性测试
Fig.12 Kernel real-time performance test after optimizing real-time kernel

打印试验。图 16 为打印过程中利用 B 轴偏摆可使喷嘴时刻保持与打印路径成一定角度,尽量减小喷嘴与纤维路径的夹角,从而减小线材拉出阻力,保证打印空间轨迹的准确性。同时利用 C 轴旋转实现纤维路径的转向,完成阵列结构打印。图 17 为打印的 PLA/碳纤维复合材料空间点阵结构,图 17 (a)、(b)、(c) 分别为金字塔、六棱柱和四面体点阵结构。

3 结论

本研究对连续纤维 3D 打印机及



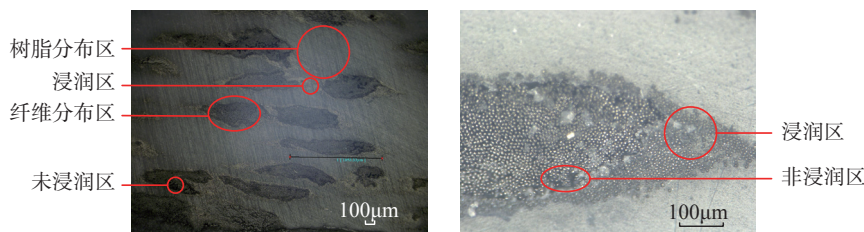
图14 连续纤维3D打印平板样件
Fig.14 Flat panel of continuous-fiber 3D printing

其数控系统进行了研究,结论如下。

(1) 针对三轴 3D 打印机精确成型复杂轨迹困难的问题,搭建了摆头转台式的五轴连续纤维 3D 打印机,设计了螺杆挤出式连续纤维 3D 打印喷头结构。

(2) 基于 LinuxCNC 和 EtherCAT 完成连续纤维 3D 打印的全软件型开放式数控系统开发,实现了五轴联动并扩展了螺杆挤出辅助轴,优化了 RT-Preempt 实时内核,经测试内核层的最大抖动控制在 5μs 以内,集成 EtherCAT 的数控系统最大抖动 < 50μs,实时性良好。解决了传统 3D 打印控制方案中联动轴数少、可扩展性差、实时性差的问题。

(3) 进行了标准拉伸样件和空间点阵结构的连续纤维 3D 打印试验,并测试了平板样件的拉伸性能,拉伸强度为 136.79MPa,拉伸模量为 26.3GPa。完成了五轴连续纤维 3D 打印机及其数控系统的功能验证。



(a) 纤维束截面分布观测图 (b) 树脂浸润情况观测图

图15 纤维含量6K试样截面形貌观测图

Fig.15 Observation of section morphology of 6K fiber content sample

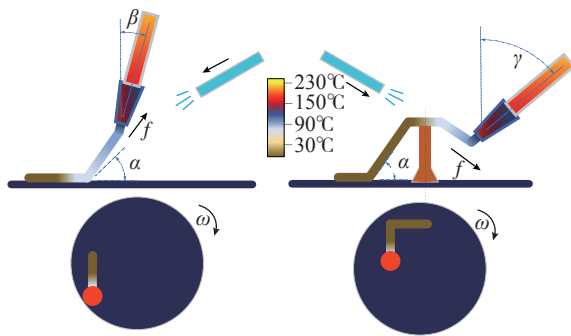
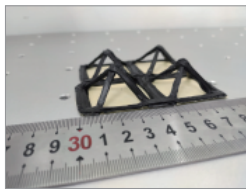
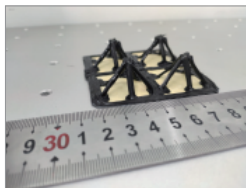


图16 点阵结构打印过程示意图

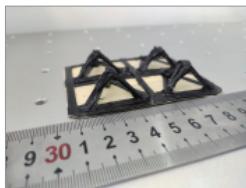
Fig.16 Diagram of dot matrix structure printing process



(a) 金字塔



(b) 六棱柱



(c) 四面体

图17 连续纤维3D打印点阵结构

Fig.17 Lattice structure of continuous-fiber 3D printing

参考文献

[1] 秦若森, 孙守政, 韩振宇, 等. 3D 打印连续纤维增强热塑性复合材料成型质量的研究进展[J/OL]. 材料导报, 2022(17): 1-16. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20211114.1426.010.html>.

QIN Ruosen, SUN Shouzheng, HAN Zhenyu, et al. 3D printing for continuous fiber-reinforced thermoplastic composites: A review on molding quality[J/OL]. Materials Reports, 2022(17): 1-16. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20211114.1426.010.html>.

[2] ANISOPRINT. Product-composer[EB/OL]. [2019-11-19]. <https://anisoprint.com/product-composer>.

[3] MARKFORGED. Mark-two[EB/OL]. [2016-02-02]. <https://markforged.com/mark-two/>.

[4] 田小永, 刘腾飞, 杨春成, 等. 高性能纤维增强树脂基复合材料3D打印及其应用探索[J]. 航空制造技术, 2016, 59(15): 26-31.

TIAN Xiaoyong, LIU Tengfei, YANG Chuncheng, et al. 3D printing for high performance fiber reinforced polymer composites and exploration on its applications[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(15): 26-31.

[5] TIAN X Y, LIU T F, YANG C C, et al. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 88: 198-205.

[6] LIU T F, TIAN X Y, ZHANG Y Y, et al. High-pressure interfacial impregnation by micro-screw in situ extrusion for 3D printed continuous carbon fiber reinforced nylon composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 130: 105770.

[7] 田小永, 尚振涛, 尹丽仙, 等. 石墨烯超材料吸波结构3D打印[J]. 航空制造技术, 2019, 62(5): 14-22.

TIAN Xiaoyong, SHANG Zhentao, YIN Lixian, et al. 3D printing of graphene metamaterial absorbing structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(5): 14-22.

[8] 刘腾飞, 田小永, 朱伟军, 等. 连续碳纤维增强聚乳酸复合材料3D打印及回收再利用机理与性能[J]. 机械工程学报, 2019, 55(7): 128-134.

LIU Tengfei, TIAN Xiaoyong, ZHU Weijun, et al. Mechanism and performance of 3D printing and recycling for continuous carbon fiber reinforced PLA composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(7): 128-134.

[9] 单忠德, 刘晓军, 战丽, 等. 一种连续纤维复材3D打印机头及其万向层压装置: CN110901051A[P]. 2020-03-24.

SHAN Zhongde, LIU Xiaojun, ZHAN Li, et al. Continuous fiber composite material 3D printer head and its universal lamination device: CN110901051A[P]. 2020-03-24.

[10] 章中森, 李岩, 付昆昆. 超声辅助浸渍的复合材料3D打印装置: CN110328843B[P].

2021-06-18.

ZHANG Zhongsen, LI Yan, FU Kunkun. Ultrasonic auxiliary impregnation composite material 3D printing device: CN110328843B[P]. 2021-06-18.

[11] 吴陈铭, 戴澄恺, 王昌凌, 等. 多自由度3D打印技术研究进展综述[J]. 计算机学报, 2019, 42(9): 1918-1938.

WU Chenming, DAI Chengkai, WANG Changling, et al. Recent progress on multi-DOF 3D printing: A survey[J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(9): 1918-1938.

[12] 王天伦. 3D打印机控制系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.

WANG Tianlun. The design of 3D printer control system[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.

[13] WANG K, ZHANG C R, XU X, et al. A CNC system based on real-time Ethernet and Windows NT[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(9-12): 1383-1395.

[14] HUANG H P, CHI G X, WANG Z L. Development and application of software for open and soft multi-axis EDM CNC systems[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(9-12): 2689-2700.

[15] MENG B Y, LI M Y, LIU X L, et al. Open architecture CNC system based on soft-integrated communication[J]. Procedia CIRP, 2018, 72: 671-676.

[16] WINGS E, MÜLLER M, ROCHLER M. Integration of real-time Ethernet in LinuxCNC[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(9-12): 1837-1846.

[17] ARM J, BRADAC Z, KACZMARCZYK V. Real-time capabilities of Linux RTAI[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(25): 401-406.

[18] 蒋旭辉. 基于Xenomai的嵌入式数控系统实时性实现探究[J]. 电子测试, 2019(16): 68-69, 102.

JIANG Xuhui. Research on real-time implementation of embedded CNC system based on xenomai[J]. Electronic Test, 2019(16): 68-69, 102.

[19] 张克华, 马佳航, 田林晓, 等. 开源IgH EtherCAT主站在LinuxCNC开放式数控系统中的应用研究[J]. 制造技术与机床, 2018(6): 191-195.

ZHANG Kehua, MA Jiahang, TIAN Linxiao, et al. Application research on the open source IgH EtherCAT master in open numerical control system LinuxCNC[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018(6): 191-195.

通讯作者: 富宏亚, 教授, 博士, 研究方向为数控技术。

Development of 5-Axis Continuous Fiber 3D Printer and Its Numerical Control System

DUAN Jiaqi, HAO Minghui, QIN Ruosen, ZHANG Peng, FU Hongya
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

[ABSTRACT] In order to solve the difficult problem of precisely forming complex trajectory in 3D printing of traditional 3-axle continuous fiber, a 5-axis continuous fiber 3D printer with 5 linkage shafts (*XYZBC*) and 1 auxiliary shaft of resin screw extruder was designed and built. Aiming at the problems of typical 3D printing control scheme, such as small number of linkable shafts, poor expandability and poor real-time performance, the full-software open CNC system was studied and applied in continuous fiber material increment manufacturing. Based on open-source CNC platform LinuxCNC and EtherCAT industrial Ethernet, a full-software open CNC system for 5-axis continuous fiber 3D printer is designed and developed. By optimizing the RT-Preempt real-time core, the HAL module integrated with IgH-EtherCAT was developed to complete the 5-axis linkage control, and the screw extruding shaft was used as the spindle to achieve the accurate control of its speed. The maximum dither control of user-level and core-level scheduling is tested within 5 μ s, the maximum dither of CNC system with integrated EtherCAT is less than 50 μ s, which prove that the CNC has good real-time performance. Finally, the feasibility of the 5-axis continuous fiber 3D printing system scheme is verified by standard tensile property test and forming experiment of space lattice structure.

Keywords: Continuous fiber reinforcement; Resin matrix composite; 3D printing; LinuxCNC; EtherCAT; RT-Preempt
(责编 古系)

(上接第67页)

Structural Stiffness General Optimization Technology of Machine Tools Based on Modal Analysis

SUN Yewang^{1,2}, CAO Ye², SUN Songtao³, YANG Qiujuan⁴, YANG Luwei¹

- (1. Beijing Key Laboratory of Thermal Energy Technology of Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing 100190, China;
2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. PLA 32368, Beijing 100190, China;
4. Beijing BSD Science Development Co., Ltd., Beijing 100028, China)

[ABSTRACT] Aiming at the stiffness optimization key problems of machine tools, due to insufficient analysis of numerical iterative optimization algorithm and high cost of optimization machining test caused by complex structure and large size of machine tool, this paper provided the method of combining finite element modal analysis and experimental modal analysis to optimize the dynamic stiffness of machine tools including the vertical and gantry boring-milling CNC machine tools. Combined with the modal test analysis and FEM, the results show that without considering the stiffness and damping of moving pairs of machine tools, the simplified FEM modal analysis of the machine tool could better reveal the dynamic characteristics of the machine tool structure. According to the weak area of the dynamic stiffness of the structure, the low-order frequencies of the machine tools are increased by more than 10% and 40% respectively. Importantly, it is showed that the optimization analysis method could be applied to the analysis process of structural general optimization design.

Keywords: Modal analysis; Structural stiffness; Optimization design; FEM; Machine tool

(责编 古系)