

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.050

3D 打印装备 NC 系统现状与发展

赵宇星, 赵鹏

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 211106)

摘 要:3D 打印技术是一种依托数字模型、借助数控系统实现快速成型的创新技术,被誉为“第三次工业革命”,凭借其周期短、一体化成型、高效制造等独特的技术优势,已经被广泛应用于航空航天、交通运输、教育、医疗等行业,随着数控系统技术不断更新进步,其潜力还将得到进一步释放。全面阐述 3D 打印技术的原理,剖析当前存在的技术瓶颈,针对这些挑战开展的研究方向,深入分析 3D 打印技术的未来发展趋势,展望其在推动制造业创新升级中的前景。

关键词:3D 打印;数控系统;打印设备

中图分类号:TP39 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)03-0258-08

The Current Situation and Development of NC Systems for 3D Printing Equipment

ZHAO Yuxing, ZHAO Peng

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: 3D printing technology is an innovative rapid prototyping technology that relies on digital models and is enabled by numerical control systems. It is hailed as the "third industrial revolution." Thanks to its unique technical advantages, such as short production cycles, integrated molding, and high - efficiency manufacturing, it has been widely applied in industries including aerospace, transportation, education, and healthcare. As the numerical control system technology continues to evolve, its potential will be further unleashed. This paper comprehensively expounds on the principles of 3D printing technology, analyzes the current technical bottlenecks, and explores the research directions aimed at addressing these challenges. Moreover, it conducts an in - depth study and analysis of the future development trends of 3D printing technology and envisions its prospects in promoting the innovation and upgrading of the manufacturing industry.

Keywords: 3D printing; numerical control systems; print device

0 引言

在制造业日益全球化与数字化浪潮的推动下,我国制造业迫切需要变革,为此国家相继提出了《中国制造 2025》、“工业 4.0”等战略计划,其中 3D 打印技术作为新一轮科技革命和产业变革的核心技术,已成为我国工业重点的发展方向,将有助于推动我国由“制造业大国”向“制造业强国”的转变^[1]。数控系统作为 3D 打印控制核心技术,其控制性能与可靠性将直接影响 3D 打印的精度、平滑度等。因此,提升数控系统的性能,是提升 3D 打印技术整体水平的核心与关键所在。

1 3D 打印装备 NC 系统现状

1.1 3D 打印原理与技术

3D 打印技术的基本原理是增材制造^[2],通过逐层叠加材料来构建三维物体。在打印过程中先

采用计算机辅助设计软件 AutoCAD 构造出需要打印物体的三维模型,将三维模型导入切片软件,将模型分解成多个二维横截面薄片,并生成每一层的打印路径和打印指令等信息,最终 3D 打印机按照切片软件生成的指令,将材料一层一层地堆积在打印平台上,直至形成完整的三维物体。

常见的 3D 打印技术包括熔融沉积成型(FDM)、立体光固化成型(SLA)、选择性激光烧结成型(SLS)等^[3]。其中 FDM 是目前应用最广的 3D 打印技术,其通过加热塑性材料,由喷头沿着 x 轴规定轨迹来回移动,工作台沿着 y 轴移动,待一个沉积面薄片成型后,工作台再沿着 z 轴调整到上一层截面薄片,重复上述步骤直至模型完成。此工艺具有成本低廉、操作简单、原料利用率高等特点。

1.2 3D 打印技术的缺陷与不足

1) 生产成本低、生产效率低

第一作者简介: 赵宇星(2004—),女,四川南充人,本科,研究方向为自动化、通信、电子信息, zhaoyuxing040909@163.com。

对于有悬臂和中空结构的零件,需要额外添加支撑部件,这将导致支撑辅助材料的增加和生产周期的延长,同时降低了生产效率,加大了生产成本。此外打印质量还受支撑部件表面质量和安装精度的影响,沉积材料难以100%沉积于支撑物表面上,有时甚至会出现器件与打印支撑件粘连,增加了后期处理难度,致使3D打印在制造此类器件时严重受限。

2) 阶梯效应明显,模型表面精度不高。

由于层层堆积的原理,切片厚度直接影响模型表面质量,模型表面存在阶梯效应^[4],且由于喷头方向固定、自由度低,不能有效解决阶梯效应带来的表面质量问题,如图1^[5]所示。

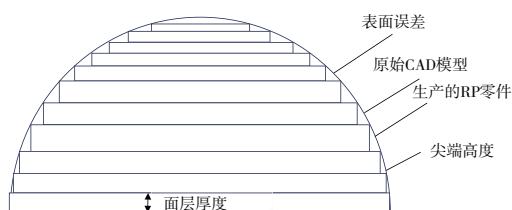


图1 阶梯效应

3) NC系统开放度低

目前市场上多为封闭式数控系统,程序功能简单且相对固化,用户无法从程序界面添加个性化设置或进行二次开发以满足实际生产需求^[6]。

4) NC系统支撑轴数少

运动控制器不能够通过控制多个旋转轴精准控制打印材料的沉积位置、方向、速度以及最小喷量,无法满足复杂曲面加工,阻碍了3D打印产品向高精度方向发展^[7]。

5) 平台调平精度低

由于3D打印是将材料直接沉积在打印平台上,因此平台调平对于模型的精度有着直接影响,对高精尖设备打印需求难以满足,需要引入更为自动化、标准化的调平技术^[8]。

6) 拉丝现象时有发生

喷头在移动到非打印区域时,特别是从模型的一端直接跳到另一端时,喷口材料未能及时切断或受重力影响,在空中形成细长的材料丝,这些材料丝附着在模型表面或者悬空,对模型表面质量产生不良影响。

7) 喷头丢帧

喷头丢帧区域无法正常成型而形成裂缝、孔隙、空洞,导致模型废品率增高、材料成本增加。

8) 机床尺寸局限

受机床尺寸影响,大尺寸模型难以用3D打印,并且还面临着打印精度不足问题^[9],同时存在生产成本增加、生产周期长、能耗高、打印效率低^[10]等问题。

9) 材料强度不足

由于打印材料多采用塑性材料,具有高孔隙率、低烧结性等特性,与传统组件材料相比缺乏足够的强度^[11]。

2 3D打印装备NC系统发展方向

2.1 多轴、多自由度、开放式3D打印机

1) 组件构造

在三轴3D打印的基础上另外增加两个控制轴,控制水平倾斜度A轴($\pm 90^\circ$)、控制平面转动C轴(360°),即由3自由度增加至5自由度,“x轴(水平方向左右运动)+y轴(水平方向前后运动)+z轴(垂直方向上下运动)+水平面A轴($\pm 90^\circ$)+水平面C轴(360°)”联动控制系统,这极大地拓展了打印的维度^[12],能更加精准地控制打印平台的旋转和喷头位置,通过确定点的位置和对应坐标系的法向量,并采用极坐标和旋转矩阵即可实现逆运动^[13]。5自由度3D打印机通过总线控制器与步进式电机之间的配合带动工作台和主轴,两个旋转轴采用蜗轮蜗杆减速装置,且蜗轮蜗杆带有自锁功能,使得在其中一个轴旋转运动时,可以固定其所在指定角度的加工,同时蜗轮蜗杆机构具有较小的传动误差,可以提高加工精度。

2) 控制原理

首先,PC机使用AutoCAD软件创建三维模型,随后将三维模型导出并使用五维切片软件Mastercam将模型分成多层二维切片,绘制出加工图形并设定出加工路径,生成文件导入G代码到控制软件中形成指令,将指令导入控制软件中,通过控制软件向运动控制器发出指令,运动控制器接收指令后通过总线系统向各个步进式电机发出不同类型的脉冲指令从而调控数控轴运动,通过A轴、C轴的运动,改变打印台面的转动角度和倾斜角度,从而控制材料的沉积位置,待一层成型后,移动各运动轴到下一层打印初始位置,重复上步骤直至打印完成。

五轴3D打印机目前多选择Mach3 CNC运动控制器,可控制高达6个轴,控制精度高达 10^{-4}

mm,且系统是一个开放式的数控系统,支持G代码,具有3D动态显示跟踪、间距补偿和磨损补偿等功能;轴向运动速度和位置可以结合实际情况进行调整,能够满足复杂高精度模型高速加工,但Mach3控制软件必须在Windows XP或Windows 2000版本下运行,流程如图2所示。

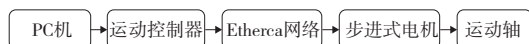


图2 五轴3D打印机控制流程

目前新开发出的雷赛SMC606运动控制器较Mach3更优,其功能更加全面且精细,可以控制多个步进式电机或数字式伺服电机,适用于多轴运动、插补运动、轨迹规划、编码器位置检测、IO控制等功能,支持多达5000个位置点的PVT运动曲线规划,实现准确时间点以准确的速度到达确定的位置。此外,雷赛运动控制器还形成了一套完整的运行指令——BASIC指令,使得用户无需依赖复杂的编辑软件和电脑外部终端设备,即可按照用户设定程序执行任务。

2.2 机械臂打印喷头

用机械臂打印喷头替代传统三轴3D打印机的打印喷头,拓展了打印喷头的运动自由度,支持空间末端多方向运动完成打印,同时将挤出机构、温度控制机构、材料制造机构等统一到机械臂控制系统中,减小了设备体积空间。机械臂的运动路径是根据路径规划和空间坐标转换共同确定,这种设置有助于改变材料沉积方向^[13],其工作原理是首先将机械臂移动到初始打印位置,将材料送入熔融腔内,待温度控制机构将熔融腔和工作平台分别加热到预定温度,随后在机械臂的带动下按预定轨迹移动,同时挤出机构持续将材料挤入熔融腔,熔融材料将均匀地从打印喷口挤出,铺在指定位置并凝固成型,在打印过程中若遇到转折点,机械臂将在转折处停止材料从喷口挤出,并改变喷头至合适角度继续打印直至模型完成,机械臂控制如图3所示。

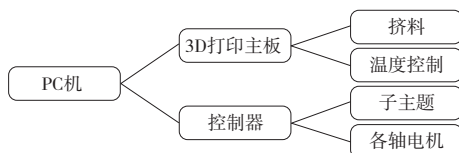


图3 机械臂控制方式

打印设备在机械臂上将喷头组件、运动控制

系统、温度控制系统等集成化管理,可以精确控制加热温度和时间,从而确保材料具有较高的黏附性。同时,喷头搭配运动控制系统,能够精确控制喷射,如对喷嘴的运动速度、相对位置、挤出量的控制等,实现材料的均匀喷射和制造精度,提高了打印的灵活性并扩大了打印范围。

2.3 3-PRRR并联机构3D打印

目前研发出了一种并联机构6自由度的3D打印设备。该设备核心组件是变形3-PRRR并联机构,由定平台、动平台和3条支链组成,每条支链由移动副(P)和转动副(R)组成,同时有3个平移自由度,可以在3个不同方向上进行平移运动,无需进行旋转。变形3-PRRR并联机构凭借其高刚度、大负荷、无累积误差等特点,能够提高模型的加工精度和稳定性。

针对3D打印技术中普遍存在的阶梯效应以及大尺寸模型打印难的问题,可以通过串联与并联两种机械结构来寻求解决方案。相较于并联结构,串联结构简单,搭建便捷并在空间灵活度方面较有优势,但其转动惯量较大、刚度较低,难以满足3D打印的高精度需求。相比之下,并联结构则以卓越的刚度、稳健的结构、可靠的载荷能力和更高的精度而被广泛应用。并联结构将多个独立的运动部件连接成一个闭环系统,提高了系统的整体性与稳定性。因此在搭建3D打印系统时,将3-PRRR并联机构主链作为移动副链,并添加串联式导轨以增加运动空间,通过融合并联与串联结构的各自优点,设计出既能克服阶梯效应,又能满足大尺寸模型高精度打印需求的3D打印系统。

2.4 3D打印机喷头改进

3D打印本质上是材料“固-液-固”的物理相变过程,材料经冷却凝固成固态进行层层堆积成模型,打印喷头会频繁出现堵塞与拉丝现象,直接导致产品开裂,严重破坏了模型质量与结构完整性,废品率居高不下。为了解决这个难题,对喷头提出如下改进措施。

1) 喷头结构改进

通过优化喷头内部结构,适当降低材料的流动性^[15],采用增加喷头内腔表面积,在同等条件下增大了材料向下运动的摩阻力,此外采用不同材质、制造工艺的喷头,也能有效阻止材料在无挤压力作用时因重力而发生的滴落、拉丝现象。因此,保持喷头直径不变、增加喷头前端长度、减小

内壁坡度和正反螺杆等措施来改善滴落、拉丝现象,改善前后喷嘴结构示意图如图4^[16]所示。

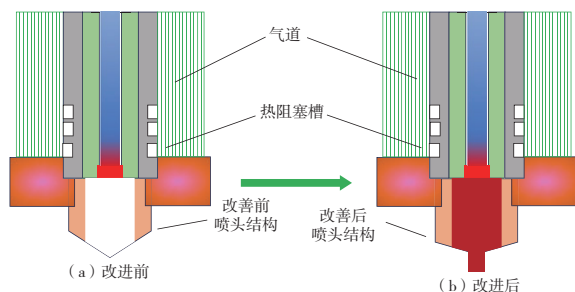


图4 改善前后喷嘴结构示意图

2) 调节喷头回抽距离

实验发现,喷头温度、回抽速度、回抽距离、空驶速率对喷头拉丝产生一定的影响,其中回抽距离较为显著,回抽距离越大越不易出现拉丝现象^[17]。因此可以优先调节回抽距离来解决拉丝现象。

3) 设计喷头回抽系统

在3D打印机控制系统中增设一台独立的材料回抽泵系统,当喷头停止工作时,即刻启动回抽系统对材料形成回吸附力,回抽系统工作时间控制在0.5s以内,以防止材料拉丝现象。

4) 调整打印策略

在不改变喷头结构的基础上,采用将打印数据通过数据偏移的方法,避免每一层打印都是同一喷头在同一区域挤出材料。其方法为:沿宽度方向两侧喷头循环关闭和打开,使同一打印喷头在相应打印区域曾经对应的喷射位置错开,若遇喷头堵塞情况,该堵塞喷头在相邻层对应位置也能错开,从而避免了由于喷头堵塞引起的打印模型开裂。在打印过程中,为了确保打印喷头在偏移错位后图层还能重叠在一起,在每一层错位的基础上对图像数据进行反方向偏移相同距离处理,从而抵消喷头偏移带来的图像移位问题^[18-19]。

2.5 平台调平改进

3D打印平台调平对打印质量具有直接的影响。打印平台调平能够保障打印喷头与平台之间的间距保持一致,在喷头移动过程中不与平台发生刮蹭,确保每一层材料都能均匀、紧密地粘合在一起,减少模型空隙、错位导致打印件结构松散、易塌陷等问题的产生。平台调平还有助于提高打印成功率和模型精度,减少设备磨损,延长设备的使用寿命。可采用如下调平方式。

1) 双发射差分式光电传感器调平

先手动确认 z 轴传感器的初始位置,利用安装在支撑地板上的激光对准器,精确测量支撑地板的位移偏差,然后借助运动控制器调节电机运动,实现打印平面的水平调节。根据3D打印机的框架结构特点,选择四点式调整平台,即对每个测量单元确认4个调节点,根据高度与倾斜角度确定最高点,对最高点进行调节后便作为调平的基准点,再对剩余的3个点进行调节^[20]。

2) WIZMAKER 人机交互系统调平

WIZMAKER 人机交互系统将设计界面与3D打印操作结合,提供符合用户操作习惯的交互界面,为实现3D打印操作平台智能调平,还需要在3D打印平台周围安装智能传感器,该传感器能够测量平台不同位置的高度差,将实时数据传送给AI算法进行调平。

2.6 3D打印提升模型表面质量

阶梯效应是影响3D打印模型表面质量的最主要因素之一。通过实验进一步发现,模型表面质量与喷嘴直径、分层厚度、成型方向夹角成正相关。为提高模型表面质量,提出如下改进措施。

1) 减小分层厚度及降低喷头成型角度

表面粗糙度主要受喷头倾角和层厚影响,尺寸精度主要受层厚和打印速度影响,然而层厚和打印速度是两个相互冲突的因素,在打印设置时需要综合平衡这两个参数^[21]。此外,喷头倾角是导致表面质量变化的直接因素^[22]。因此在时间允许的情况下,尽量通过减小分层厚度来提高模型表面质量,在不影响喷头正常打印的情况下,尽量降低喷头成型角度以此改善模型表面质量。

2) 局部自适应分层打印

根据轮廓表面曲率大小进行自适应分层打印^[23],在曲率较大的地方减小分层厚度,在曲率较小的地方适当增加分层厚度^[24],同时降低材料挤出速度及规则挤出,以更好地重现曲面区域。

3) 分区域差异化打印

通过计算机辅助设计,将模型分为内部区域与表面区域两个不同打印区域。打印模型内部区域时,采用厚切片、大口径喷头、快速粗放型打印;打印模型表面区域时,利用五轴3D打印机的A转动轴、C转动轴旋转平台或多自由度机械臂打印喷头,采用薄切片、小口径喷头、慢速精细化打印。这既能提高打印效率,还能改善模型表面质量。

4) 构建数字孪生模型映射物理空间的数字模型

利用构建数字孪生模型,准确映射物理空间的数字模型并进行虚拟打印,同时利用区域分层算法和变密度填充算法提高打印器件的性能,降低模型表面精度^[25]。

5) 模型后处理技术进行表面修复

通过化学处理、热处理、铣削、激光等精加工后处理技术,降低模型表面粗糙度,降低阶梯效应的影响^[26]。

6) 混合制造工艺

将3D打印增材制造技术与传统加工数控机床技术结合在同一台机器上^[27],利用数控机床自动化、智能化程度高的优点,可以及时、准确地调整机床运行状态,确保加工质量的可靠性和准确性,同时利用数控机床对3D打印模型表面进行切削、铣削等加工,进一步消除阶梯效应对模型表面质量的影响,使模型具有更高的精密度和表面质量^[28-29]。此外,混合制造工艺还缩短了模型整体生产周期,降低了生产设备更换频率,提高了生产效率。

2.7 3D打印提升效率

3D打印时间主要与喷头的移动速度、挤出速度、材料凝固时间、切片厚度、打印路径等因素有关,在保证打印质量的同时,提高打印速度,提升生产效率,主要有以下途径。

1) 增大喷头压力

在传统喷头上增加螺旋状结构代替标准的“空转轮”结构,增大基础压力,并且在喷头附近增加一个激光器以加快材料的融化速度,该新型打印喷头比传统喷头打印速度提高了近10倍,此外还可以在喷嘴上增加小型活塞泵以控制材料的挤出速度。

2) 增加喷头数量

适当增加喷头数量平行打印以提高模型成型速度。

3) 优化打印方法

通过计算机辅助设计,将模型分为轮廓层、过渡层和内层3个打印区域,不同区域采用不同的填充措施,同时对区域内部的填充路径进行优化,特别是对非核心区域采用大喷头、厚切片、大泵力、快移动等措施加快打印,缩短模型整体打印时间。

2.8 3D打印提升模型强度

3D打印涉及材料堆叠的过程,导致空洞的产

生与各向异性的特性,其力学性能在层内和层间上都有所不同。为了提高打印部件的强度并满足更高的性能要求,提出了如下措施。

1) 采用复合材料

连续纤维材料以其优越的力学性能被广泛应用在提高打印件的强度中,连续纤维材料比短纤维材料具有更高的强度和更优的性能,在3D打印过程中被添加进基础聚合物,从而制造出具有增强力学性能的3D打印模型。

2) 改变FDM打印机制

在连续纤维复合材料中通常有两种打印机制:双挤压机制和原位融合机制。双挤压机制先使用连续纤维在树脂中预浸渍和固化,然后通过两个喷嘴分别挤压出预浸料长丝与聚合物长丝,这种方法具有更大的灵活性和精度,可以针对特定部位进行单独加强,同时由于是不同的喷嘴挤压不同的材料,这对于材料的选择上有了更多的可能性^[30]。对于原位融合机制,连续纤维进入喷嘴进行预热,同时基础聚合物进入熔体区,将熔化的聚合物与预热的纤维沉积在一起并被一起挤出。不同于双挤压机制,这种机制中纤维和基础聚合物同时进入喷嘴,方便用户控制塑料含量的流速。但由于纤维与聚合物停留时间短,导致两者之间粘合不良,从而无法达到预期的效果。此外,根据研究发现,单独添加连续纤维并不能提高抗拉强度,但通过口径为0.4mm和0.9mm的喷嘴能显著提高复合材料的拉伸强度^[31]。

3) 采取策略降低孔隙率及空洞

由于孔隙及空洞的存在,降低了3D打印模型的力学性能,可采取如下策略来减少孔隙及空洞从而提高力学性能:a)优化刀具路径与调整原料长丝有效预防空隙的产生;b)在3D打印模型构建期间优化参数,调整层厚和提高喷嘴温度;c)应用超声波震动排出气泡增加结构密实度,降低空隙率;d)模型打印完成后,还可通过二次加热使热塑性材料再次融化从而降低孔隙。

3 3D打印装备NC系统发展趋势

日本OSACA计划致力于自动化系统中的开放控制体系结构研制,OSACA计划基于PC平台对开放式体系结构CNC进行开发^[32]。美国OMAC项目通过构建不同类型的控制模块与接口定义了不同组件、任务、模块的程序软件片,这些都为数控系统进一步的开放性与模块化发展奠定了坚实基础。相较于国外,我国自主研发的高端数控系

统存在使用寿命较短、控制精度低与开放性低等缺陷^[33],基于此,我国未来的研究方向宜聚焦于以下几个方面。

3.1 适用性、易用性

3D打印目前仅适用于简单结构和特定设备,要发掘3D打印的潜力,需要开发更复杂的工艺生成算法。同时3D打印的使用并未大量普及到日常生活生产中,主要是由于使用门槛高,需要更加专业的知识。因此,需要建立更加直观、简单的用户界面和交互系统。

3.2 复合材料

目前用于3D打印的材料有限,大多是石膏、塑料和树脂等^[34-35],金属材料3D打印技术尚未成熟,塑料仍是3D打印中最常用的材料^[36]。随着材料领域的发展,将研发出更多可用于3D打印的复合性材料,开发更多的潜在领域。

3.3 高速、高可靠度、高精度

数控系统将采用大规模集成电路与高速处理器提高系统的运算速度,大幅降低数控系统在处理加工数据指令的速度与伺服电机运行的响应时间,这有利于缩短生产周期,提高生产效率,降低生产成本。

高精度3D打印直接关系到产品表面质量、内部结构以及均匀性与精细化,这将提升产品的整体品质,使产品更加具有可靠性、耐用性。国内数控机床目前可以做到精度0.05 mm以上,而国外的高精度数控机床则可达微米级以上。发展高精度数控机床以实现3D打印超精密加工技术是我国航空航天、医疗、精密仪器制造等行业发展方向。

3.4 多轴化、功能复合化

多轴化是3D打印的必然发展趋势,打印的产品也将会趋向复杂化,额外添加的打印喷头和运动轴能够在多个方向上同时或交替工作,这有助于更精确地控制打印过程,减少打印误差,显著提高打印速度,提升整体效率。此外,多轴3D打印还能够轻松实现复杂的几何结构,为产品设计提供更大的空间^[37]。多轴3D打印系统还可以实现不同打印区域搭载不同种类的材料,实现多种材料的混合打印,利于打印复合材料的器件。同时多轴3D打印机可以添加更多功能配件,如添加控制打印喷头温度的功能以适应不同材料,增加打磨、上色的机械臂,替代人工后处理,使加工更精确

和更规范化,提高模型的性能,增加设备利用率,减少设备投资,缩短生产周期,降低人力成本。

3.5 自适应性、柔性制造

自适应性数控系统可以自动测量机床功率、喷头温度等参数,CPU依据参数进行自我诊断后发出修改指令,避免随机因素以及人为误差导致的加工质量低下,这种动态调整能力可以显著减少因环境变化或材料特性不同导致的打印误差,能够应付复杂多变的打印任务。通过对数控系统自适应能力的优化能够更加智能地分配打印资源和时间,提高打印效率。自适应性数控系统能够完成大部分打印参数的设置和调整工作,将简化用户的操作流程和操作难度,快速实现最佳目标的智能决策机制^[38]。

柔性制造是一种机床适应加工对象变化的能力,具有灵活性,使用软件功能替代硬件功能,采用可编程设计的硬件^[39],实现硬件的减少,开发更简易和更有效的系统,减少传统数控机床可采用的机械或刚性连接。

3.6 开放式数控系统

数控系统应具有可互换性、可裁剪性、可移植性、交互性与扩展性等,开放式数控系统是未来3D打印技术发展的必然趋势^[40],不仅是厂商可以根据用户需求随意添加、修改、删除、设计、定制各种功能,还能够满足被用户重新配置改装、模块添加、选配、集成、即插即用、功能模块开发插补、兼容不同的操作平台与硬件设施等要求,采用PC技术的开放式数控系统易于实现图形化用户界面,且软件适应性强,有助于3D打印技术朝着灵活化、智能化方向发展^[41]。

3.7 智能化、网络化

新一代数控系统需要与人工智能和制造技术深度融合,使其具有自主判断、识别、感知、分辨周围环境信息能力,通过神经网络系统进行自主学习,使其具有自主决策的能力。在机床、人力资源和信息之间建立联系,并通过以太网或USB与外围设备和信息源进行交互,使其具备更高的感知力和决策力,以满足数控系统自动加工工件并根据工件状态自动调整加工参数,这有助于实现系统的自适应性和故障自诊断功能,对硬件、软件进行故障判断并快速排除故障。

为保障数控系统长期可靠地运行,可采用多种网络形式进行信号的采集与处理。随着网络技术的发展,数控系统能够引入工业互联网,实现数

控系统与其他设备之间交互与协同作业,提高灵活性和生产效率,实现远程监控和控制操作,这不仅有助于企业经营管理和现场操作控制,还保障了生产过程的优化与资源共享^[42]。

4 结语

尽管针对3D打印技术存在的各类主要问题提出了诸多明确、有效的解决方案,然而3D打印技术仍存在着诸多亟待解决的问题。更为关键的是,现有的解决方案也尚未系统地整合在一起,以形成一套完备的、标准的、能普遍推广的3D打印系统。3D打印技术在机械制造及自动化生产领域具有举足轻重的地位,是推动我国迈向工业4.0时代的重要技术^[43]。为进一步提升我国3D打印技术,未来需要朝着跨学科、跨领域方向研发,特别是机床技术、工业设计软件技术、材料技术、机械制造技术、工业自动化技术、化学工程技术、传感器技术、计量技术、仪器仪表技术、机器人技术、计算机技术、图形识别与处理技术、AI技术等融合、协同发展。

综合性人才的培养也十分重要,如何培养跨学科、跨专业、具有国际视野的综合性人才的需求已摆在我们面前。国内相关大学应加大专业调整力度,由精尖向综合性拓展,使人才不但有某一方面的精尖技术,还应具备与之相关的跨学科知识,同时还应学习先进的技术,了解国外3D技术的发展与方向。

参考文献:

- [1] 李锁. 智能化数控系统体系结构及关键技术研究实现[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院沈阳计算技术研究所),2019.
- [2] 肖述文. 基于EtherCAT的多轴机器人3D打印控制协同性研究与系统实现[D]. 武汉:武汉理工大学,2022.
- [3] 刘嘉和,徐铭作,何懿琳,等. 3D打印技术的研究现状及发展趋势[J]. 科技传播,2018,10(3):104-105,107.
- [4] 童和平,李达人,丘永亮. 基于熔融沉积成型3D打印模型表面质量的研究[J]. 机电工程技术,2019,48(12):112-114.
- [5] ZAGORSKI M, SOFRONOV Y, IVANOVA D, et al. Investigation of different FDM/FFF 3D printing methods for improving the surface quality of 3D printed parts[C]//10th International Scientific Conference "TechSys 2021" - Engineering, Technologies and Systems, Plovdiv, Bulgaria: AIP Publishing,2022:060001-1.
- [6] 王晓东,刘宇. 开放式数控系统的现状与发展[J]. 城市建设理论研究,2013(4):1-5.
- [7] 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.
- [8] 董梦莹. 3D打印技术过程控制问题研究进展[J]. 现代工业经济和信息化,2022,12(12):238-239,242.
- [9] 屈家豪. 六自由度并联机构3D打印系统的设计与实现[D]. 西安:西京学院,2023.
- [10] 王素玉,曾庆锁,王瑶,等. 3D打印速度的影响因素及改善措施研究[J]. 机床与液压,2020,48(7):47-51.
- [11] KARIMI A, RAHMATABADI D, BAGHANI M. Various FDM mechanisms used in the fabrication of continuous-fiber reinforced composites: a review[J]. Polymers, 2024,16(6):831.
- [12] 蔡锐龙,李晓栋,钱思思. 国内外数控系统技术研究现状与发展趋势[J]. 机械科学与技术,2016,35(4):493-500.
- [13] YAO Y, CHENG L Y, LI Z Y. A comparative review of multi-axis 3D printing[J]. Journal of Manufacturing Processes,2024,120:1002-1022.
- [14] 闵畅,李锦,沈新明,等. 基于Mach3控制板的3D打印机设计[J]. 科技创新与应用,2018,8(1):30-32,35.
- [15] 闵畅,李锦,沈新明,等. FDM型3D打印机喷头优化设计[J]. 黑龙江科学,2017,8(21):10-12,15.
- [16] LIU H, LIU Z P, HAO S T. Design of a throat-extended FDM extruder for multi-axis 3D printing[J]. Strojniški Vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 2021:167-179.
- [17] 徐绍娟,胥鹏,周敏. 基于FDM技术的3D打印制件缺陷产生原因及解决方法的概述[J]. 科技创新与应用,2021,11(23):126-128.
- [18] 陆江波,虎成,杜银学. 3D打印过程中喷孔堵塞导致产品开裂问题的研究[J]. 中国铸造装备与技术,2023,58(4):51-54.
- [19] 周子翔. 基于随机开关喷孔数量的3D错位打印研究及应用[J]. 中国铸造装备与技术,2020,55(3):58-61.
- [20] 张毅,王莎,李盼盼,等. 基于MEMS技术FDM 3D打印机自适应调平系统[J]. 工程塑料应用,2017,45(8):70-74.
- [21] ELKASEER A, SCHNEIDER S, SCHOLZ S G. Experiment-based process modeling and optimization for high-quality and resource-efficient FFF 3D printing[J]. Applied Sciences,2020,10(8):2899.
- [22] JACKSON B, FOULADI K, ESLAMI B. Multi-parameter optimization of 3D printing condition for enhanced quality and strength[J]. Polymers,2022,14(8):1586.
- [23] SONG H C, RAY N, SOKOLOV D, et al. Anti-aliasing

- for fused filament deposition [J]. Computer - Aided Design, 2017, 89: 25-34.
- [24] 张晟祺,解乃军. 基于FDM技术的阶梯效应弱化及特征保留自适应分层算法[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2023, 21(2): 27-33.
- [25] 曾山林. 提高熔融沉积3D打印制件表面质量与力学性能的方法研究[D]. 西安:西安理工大学, 2024.
- [26] SUN X C, MAZUR M, CHENG C T. A review of void reduction strategies in material extrusion-based additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2023, 67: 103463.
- [27] DJUROVIĆ S, LAZAREVIĆ D, MIŠIĆ M, et al. 3D printing and CNC machining: materials, technologies, and process parameters[M]//New Trends in Engineering Research. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 271-276.
- [28] LU S Y. Research on integrated manufacturing technology of CNC machine tool and 3D printing[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 253: 01054.
- [29] CANO-VICENT A, TAMBWALA M M, HASSAN S S, et al. Fused deposition modelling: current status, methodology, applications and future prospects [J]. Additive Manufacturing, 2021, 47: 102378.
- [30] NAKAGAWA Y, MORI K I, MAENO T. 3D printing of carbon fibre-reinforced plastic parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(5): 2811-2817.
- [31] 李茂月. 开放式智能数控系统及其在线控制相关技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
- [32] 陈铭. 基于运动控制卡的开放式数控系统设计及应用[D]. 上海:上海交通大学, 2012.
- [33] 郭远东,袁祎博,沈航. 中外高端数控系统差距分析及对策[J]. 机械工业标准化与质量, 2022(9): 19-25.
- [34] PAGAC M, HAJNYS J, MA Q P, et al. A review of vat photopolymerization technology: materials, applications, challenges, and future trends of 3D printing [J]. Polymers, 2021, 13(4): 598.
- [35] MA Q J, REJAB M R M, IDRIS M S, et al. Recent 3D and 4D intelligent printing technologies: a comparative review and future perspective [J]. Procedia Computer Science, 2020, 167: 1210-1219.
- [36] HUANG Y X, CHEN J Q. Current status and prospects for quantification of 3D printing [M]//Recent Advances in Applied Mechanics and Mechanical Engineering. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 181-192.
- [37] 田建忠. 国产化数控系统的应用现状与发展趋势[J]. 金属加工(冷加工), 2018(2): 16-18.
- [38] ADIL S, LAZOGLU I. A review on additive manufacturing of carbon fiber-reinforced polymers: current methods, materials, mechanical properties, applications and challenges [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140(7): e53476.
- [39] DICKSON A N, ABOURAYANA H M, DOWLING D P. 3D printing of fibre-reinforced thermoplastic composites using fused filament fabrication - a review [J]. Polymers, 2020, 12(10): 2188.
- [40] GOTHWAL S, RAJ T, VARDHAN A, et al. DSP and other related alternate technologies to CNC in FMS: a review [J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2024, 15(6): 2067-2076.
- [41] 王程鹏. 开放式数控系统的现状与发展趋势[J]. 科技传播, 2013, 5(3): 190-191.
- [42] 庞敏,李贺军. 数控技术在现代制造业中的应用及发展趋势研究[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(8): 84-86.
- [43] 马富豪. 3D打印技术的发展现状及前景分析[J]. 南方农机, 2018, 49(10): 104.

收稿日期:2025-02-05