

计算机集成制造系统
Computer Integrated Manufacturing Systems
ISSN 1006-5911, CN 11-5946/TP

《计算机集成制造系统》网络首发论文

题目：多轴 3D 打印技术研究进展
作者：汤朋飞，赵先锋，史红艳，胡波，丁井虎
收稿日期：2021-06-18
网络首发日期：2021-12-01
引用格式：汤朋飞，赵先锋，史红艳，胡波，丁井虎. 多轴 3D 打印技术研究进展[J/OL]. 计算机集成制造系统.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20211130.1409.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

多轴 3D 打印技术研究进展

汤朋飞,赵先锋⁺,史红艳,胡 波,丁井虎
(贵州大学 机械工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要: 3D 打印技术通过逐层堆积的方式成型, 克服了零件制造的几何限制, 而受到了学术界和工业界的广泛关注。然而这种定向构建方式会导致零件存在阶梯效应, 强度不足以及需要添加支撑结构等一系列问题。为了解决传统层式打印存在的问题, 研究人员开发了多轴 3D 打印技术。多轴 3D 打印技术使用多自由度机器人对零件进行动态构建, 克服了传统层式打印的限制, 显示出了极高的零件制造灵活性。文中对多轴 3D 打印技术进行了回顾, 首先分析了传统 3D 打印存在的一些问题, 接着综述了多轴 3D 打印技术的研究进展, 包括多轴 3D 打印技术在路径规划、零件力学性能改善、去支撑化、消除阶梯效应以及大尺寸打印上的研究概况。最后探讨了多轴 3D 打印技术目前存在的问题和未来可能发展的方向。

关键词: 多轴 3D 打印; 快速成型; 机器人; 路径规划算法; 研究进展

中图分类号: TH166;TP391

文献标识码: A

Research progress of multi-axis 3D printing technology

TANG Pengfei, ZHAO Xianfeng⁺, SHI Hongyan, HU Bo, DING Jinghu
(School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang, 550025)

Abstract: 3D printing technology to overcome the geometric limitations of parts manufacturing through directional layering, which has attracted significant attention from academia and industry. However, this directional construction method has caused a series of problems such as the staircase effect, insufficient strength and supporting structure requirements of the parts. In order to solve the traditional layer printing problems, researchers have developed multi-axis 3D printing technology. Multi-axis 3D printing technology uses multi-degree-of-freedom robots to dynamically construct parts, which solves the limitations of traditional layered printing and illustrates the flexibility of robots to manufacture parts. In this paper, the multi-axis 3D printing technology is reviewed. Firstly, some problems existing in traditional 3D printing are analyzed, and then the research progress of multi-axis 3D printing technology is summarized, including the research status of multi-axis 3D printing technology to path planning, improve the mechanical properties of parts, realize non-supported printing, eliminate staircase effect and realize large-scale printing. Finally, the article discusses the current problems and the future development of multi-axis 3D printing technology.

Keywords: multi-axis 3D printing; rapid prototyping; robot; path planning algorithm; research progress

0 引言

3D 打印技术诞生于 20 世纪 80 年代,在某些场合也被称作分层制造技术或快速成型技术。由于 3D 打印技术可以实现任意复杂零件定制的特性,被广泛的应用于电子^[1]、能源设备^[2]、医药^[3]、生物技术^[4]、光学^[5]、建筑^[6]和航空航天^[7]等领域。目前主流的 3D 打印技术有光固化成型^[8] (Stereolithography, SLA)、数字光处理技术^[9] (Digital Light Processing, DLP)、熔融沉积成型^[10] (Fused Deposition Modelling, FDM)、选择性激光烧结^[11] (Selective Laser Sintering, SLS)、激光直接沉积成形^[12] (Direct Laser Deposition, DLD)、电弧增材制造^[13] (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) 以及金属微滴喷射打印^[14] (droplet-based 3D Printing) 等技术。SLA 和 DLP 都是利用紫外光照射液态光敏树脂发生聚合反应,来逐层固化并生成三维实体的成型方式,与 SLA 的激光逐行扫描不同,DLP 可以一次固化整个输入的切片层^[15]。FDM 是一种利用高温将材料熔化,通过挤出机挤出长丝在构建平台上层积成型。SLS 是一种粉末成型技术,这种成型方式需要控制高强度的激光来使粉末颗粒聚合成型。激光直接沉积成形被国际上多个研究机构相对独立地发展起来,并且被赋予了不同的名称,如直接金属沉积 (Direct Metal Deposition, DMD)、激光立体成型 (Laser Solid Forming, LSF) 等,它在惰性气体环境中,以高能量密度的激光作为热源,将同步送进的粉末或丝材逐层熔化堆积,从而实现金属零件的直接制造与修复^[16]。电弧增材制造技术使用电弧作为热源将丝材熔化然后沉积成形,这种技术具有沉积效率高、制造成本低等优势。金属微滴喷射打印通过液滴喷射器产生金属微滴,金属微滴沉积在计算机控制的移动基板上,通过逐点的方式堆积成型。

不论何种打印方式,其都采用分层叠加的方式成型,首先通过计算机辅助设计或三维扫描仪进行建模,然后将建模得到的三维模型进行切片处理生成一系列层,接着对切片得到的层轮廓内部进行扫描填充(即路径规划,常用 Z 字型轮廓和偏置轮廓扫描),并将规划路径转化为机器能够识别的 G 代码。最后打印机通过读取输入文件的 G 代码信息,使用液状、固状或粉末状的材料将这些切片层逐一地打印出来^[17]。

传统 3D 打印系统通常局限于三轴运动(三自由度),沿着固定的方向打印所需的模型^[18]。正由于这种定向的作用,导致传统 3D 打印机打印的零件具有阶梯效应、尺寸限制、强度不够以及需要添加支撑结构等一系列问题。多轴 3D 打印技术的出现,通过动态调整打印的方向有效的解决了这些问题。自 2014 年以来,有关多轴 3D 打印的论文出版呈现上升的趋势^[19](如图 1 所示),越来越多的研究者开始关注多轴 3D 打印系统的研究。文中第 2 节分析了传统 3D 打印存在的一些问题,第 3 节回顾了多轴 3D 打印的研究进展,第 4 节探讨了多轴 3D 打印技术目前存在的问题和未来可能发展的方向。

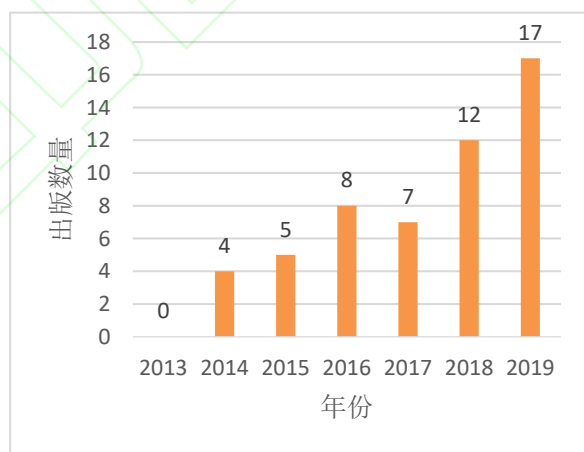


图 1 多轴 3D 打印文献出版数量^[19]

1 传统 3D 打印存在的问题

(1) 路径限制

传统 3D 打印利用平面切片生成打印层轮廓,并通过扫描算法对轮廓的内部进行规划,这导致零件的构建只能沿着固定的方向进行,造成这种问题的主要原因是 3D 打印系统自由度的限制。图 2 中对比了两种打印方式的区别,传统 3D 打印是在固定切片方向的切片层内规划轨迹,只局限于特定的 2D 平面内,且轨迹不可逆。

就目前而言，3D 打印零件需要更高的力学性能、热学、表面质量、甚至生物医学特性，迫切需要沿曲面切线方向或沿零件性能、质量要求的方向进行路径规划。

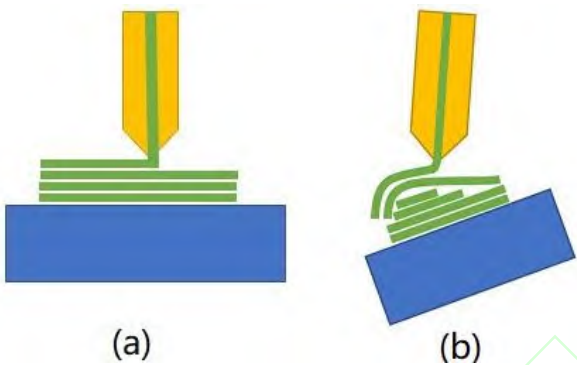


图 2 两种路径的比较：(a) 传统打印；(b) 多轴打印

(2) 阶梯效应

传统层式 3D 打印通过逐层堆积成型，对于零件高曲率表面会产生阶梯效应。不管哪一种 3D 打印工艺，当模型表面与零件的构建方向有一定的角度时，就会产生阶梯效应(如图 3)，阶梯效应的产生会影响制造零件尺寸精度和表面粗糙度。研究人员花费了大量的精力，试图通过自适应地调整切片层的厚度^[20 - 22]，来减少阶梯效应。然而，由于定向构建的原因，导致阶梯效应这个问题一直存在。

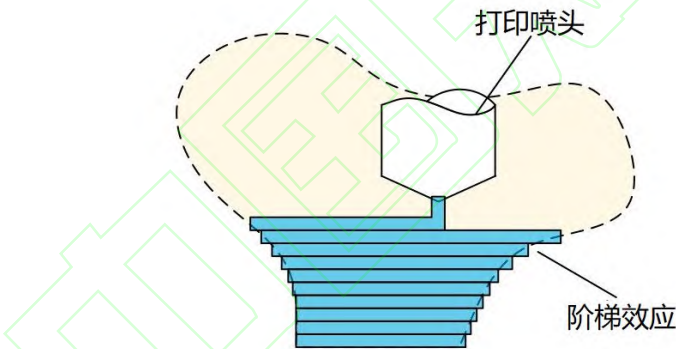


图 3 传统层式制造的阶梯效应^[20]

(3) 强度问题

3D 打印通过逐层堆积而成型，在大多情况下层间结合界面的缠结网络和晶体密度均低于打印材料本体，且部分成型技术的填充结构间存在间隙，所以几乎所有 3D 打印的结构都呈现各向异性的力学性能^[23]。如图 4 是 PLA 零件的纤维取向与抗拉强度关系^[24]，该 PLA 拉伸试验的结果显示了不同填充方向将会有不同的拉伸强度，显然打印纤维水平方向填充的零件承受拉伸载荷，这也意味着打印纤维填充方向必须与负载方向一致，打印零件才能承受更高的负载。然而传统的 3D 打印工艺是沿一个固定的方向层积成型的，大多数 3D 打印零件无法具有最优的力学性能。

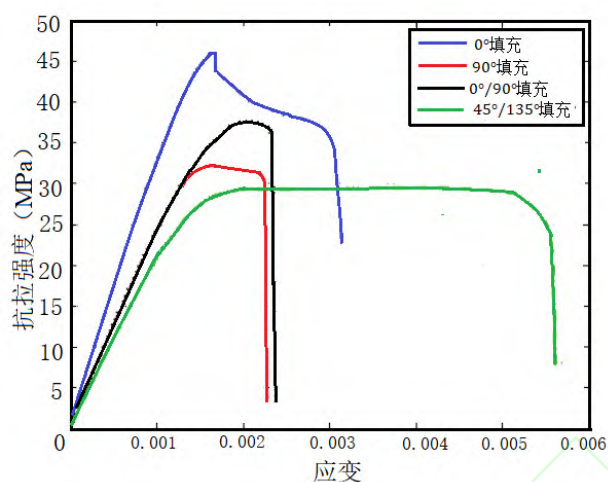


图4 填充角度与零件强度的关系^[24]

(4) 支撑效应

在打印过程中,当涉及到零件悬垂部分时,传统的打印过程需要创建额外的支撑结构,以防止悬垂结构塌陷或滑落,如图5所示。打印所需的支撑结构会增加额外的打印时间(增加32%~48%的打印时间)和材料消耗(增加30%~60%的材料消耗)^[25],并且打印完成的零件需要拆除添加的支撑结构,导致后期处理(如剥离支撑结构、清洁等)较困难^[26]。此外,由于零件的表面与支撑结构接触,导致零件的表面光洁度下降。

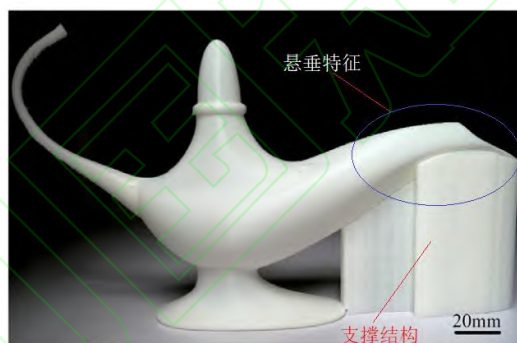


图5 传统打印方式^[26]

(5) 尺寸限制

目前大部分商业3D打印机由于自由度以及尺寸限制的问题,无法实现完整大尺寸零件的打印。在传统的一些大尺寸打印研究中,通常将打印零件分解成一系列可打印的子模型,在打印完成后,再通过胶水或自锁结构进行装配,如图6所示。但由于在拼接处的表面上有接缝的存在,导致零件的表面质量和光洁程度受到影响,此外还由于零件是拼接完成的,还存在零件力学性能不足的问题^[27-28]。

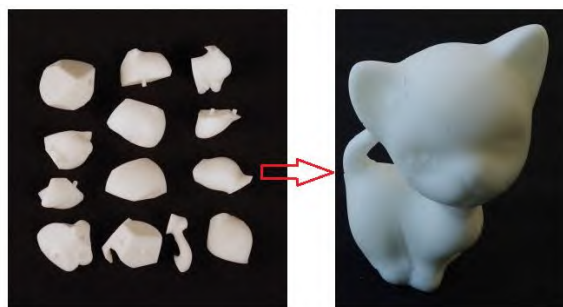


图6 传统3D打印制造大尺寸零件的方式^[27]

2 多轴 3D 打印技术研究进展

2.1 多轴 3D 打印技术的路径规划的研究现状

由于多轴 3D 打印构建的方向是变化的，传统的 3D 打印路径规划算法已经不再适用。当前的多轴 3D 打印通常将零件分解为不同的组件（或直接分解为曲面层），然后对组件（曲面层）的构建进行路径规划，其工艺通常涉及到 2 种路径规划：组件之间的路径规划和分层轮廓的路径规划。

在多轴 3D 打印组件分解的过程中，首先必须要在确保材料在层积无塌陷的条件下（例如，基于骨架的分解算法^[29]、体积分解算法^[30]、基于体素模型分解方法^[31]等），对模型的组件进行划分，其次再根据机器人的约束条件保证打印过程的无碰撞。对于多轴 3D 打印而言，一般将无碰撞路径集成于算法之中，而不使用实时监测的方法，以此来提高打印的效率。对于组件之间的路径规划，通常使用两种方法，一种是类似于数控机床的退刀方法，将打印头退回至安全高度，等待打印件姿态调整完成后，再进行加工。另一种是现代机器人中的路径规划方法，例如，基于几何模型路径规划中的 A*算法和 Voronoi 图，随机搜索算法中的快速搜索随机树算法以及概率路线图等。此外合理的组件路径规划，不仅能实现组件之间的无碰撞，还能减少起始时间、停止时间和构建时间。对于连续性的路径规划，则不存在这样的问题^[32]。

在分解组件完成后，需要对组件进行分层。多轴 3D 打印组件的分层轮廓的厚度有两种选择，一种是厚度均匀的平面分层，另一种是厚度变化的曲面分层。与传统的 3D 打印路径规划一样，平面分层使用平面对组件进行分层，分层后再对轮廓信息进行路径规划。平面分层最常使用轮廓偏置扫描^[32]和 Z 字形扫描^[33]对路径进行规划，如图 7 所示。然而这种平面分层及其路径规划，仍旧会产生一系列问题，如阶梯效应、零件产生缺陷等，在多轴 3D 打印中很少应用。

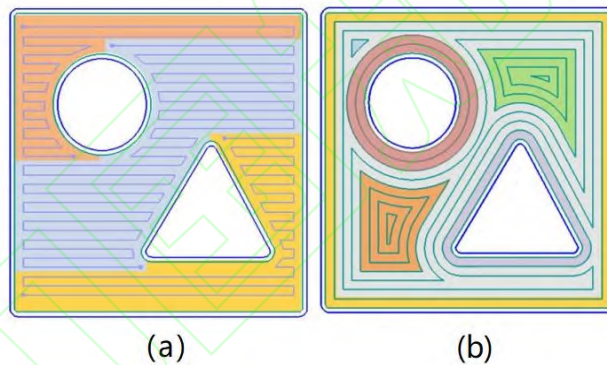


图 7 传统 3D 打印路径规划方法^[32]：(a) 轮廓偏置扫描；(b) Z 字形扫描

曲面分层突破了平面分层的缺点，使阶梯效应的解决成为了可能。由于曲面分层轮廓是 3D 曲面，传统的 2D 轮廓扫描将不再适用，需要提出新的路径规划方法。当前的多轴 3D 打印曲面路径规划研究中，最常使用空间映射法生成曲面打印路径。空间映射法^[34-37]指的是首先将曲面轮廓展开至平面，使用扫面算法对展开平面进行填充，然后将平面映射回 3D 空间，从而生成曲面打印路径，如图 8 所示。Xu 等^[35]将模型分解为一系列曲面场（该场由测地线组成），然后把该场展开至平面，使用 Delaunay 三角形网格对平面层进行填充，并将轮廓平行偏置的方式在层上生成打印路径，然后通过调和映射回 3D 空间，从而生成曲面打印路径。Isa 等^[36]构造了曲面的矩形参数域，在矩形参数域上使用 Z 字形算法对矩形进行填充，最后将矩形映射在曲面上，以获取三维打印路径。Etienne 等^[37]提出了一种在传统三轴打印机上进行曲面轨迹规划方法，他们首先使用平面对变形优化的模型进行切片，然后对平面层进行轨迹规划，最后再映射回原始模型以获得相应的曲面层轨迹。

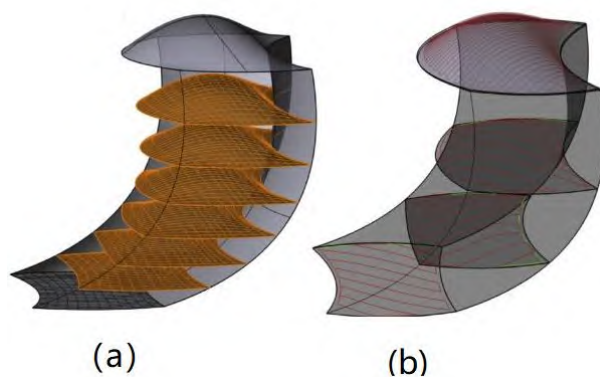


图 8 空间映射^[36]：(a) 自由曲面映射；(b) Z 字形路径映射

此外，也有其它的一些先进曲面路径算法。为了提高曲面层的打印效率，Li 等^[38]提出了一种曲面截交法，其利用四面体网格对模型内部进行填充，通过曲面截交四面体网格获得填充图案后，使用 Fleury 算法在填充图中寻找欧拉环，从而生成可以连续打印的路径。Singamneni 等^[39]讨论了一种混合轨迹规划方法，该方法主要包括曲面层栅格的填充，曲面切片的平行偏移和支撑生成。对于曲面栅格的填充它们提出了两种方法，一种是利用商用 CAM 软件，使用球头铣刀生成加工刀具路径时，其刀具路径与 FDM 路径基本相似的特点，从而生成打印路径。另一种方法是使用垂直平面对 STL 模型进行切片，以获取的曲面关键点，通过拟合进而生成曲面路径，但这种方法的精度很难保证，并且只能对零件表面进行规划。Ahlers 等^[40]提出一种在二维轨迹的基础上生成三维轨迹的方法，该方法通过二维路径向下投影于非平面曲面的图层上，从而生成曲面路径，如图 9 所示。Jin 等^[41]使用 B 样条曲面拟合网格曲面，通过偏移曲面获取打印路径。该方法首先将拟合的切片曲面偏移层厚度一半的距离，以获得沉积曲面。接着根据精度要求，通过将设计表面偏移一段距离来构建相贯面。最后在设计面上沿其一条边选择第一条沉积路径，通过垂直偏移沉积路径生成打印路径，如图 10 所示。

除了生成打印路径外，为了便于打印机修改层的厚度和构建方向，多轴打印路径还需要确定每一个采样点的构建方向，以及通过算法对材料进给速度进行适应性控制。

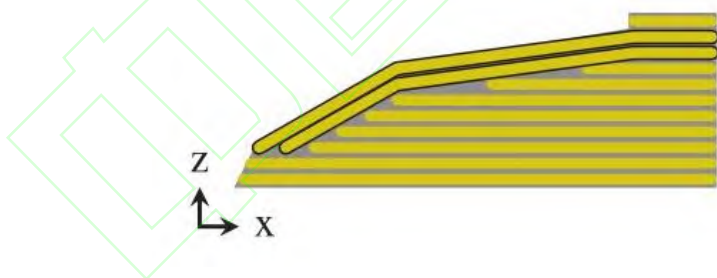


图 9 平面层投影生成曲面层

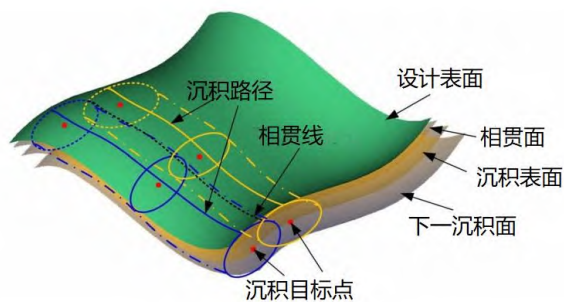


图 10 B 样条曲面的偏移

2.2 多轴 3D 打印技术在力学性能改善上的研究

对于 3D 打印零件而言，强度受它的切片方向和打印路径的影响。其主要原因是层间的粘合强度较弱，致使零件的力学强度在打印方向上受到限制^[42]。与纤维（打印路径）载荷方向一致打印的零件将会具有更大的

有效拉伸强度，可以承受更大的载荷作用。Ezair 等^[43]在传统直角坐标 FDM 打印机上实现了一种覆盖曲线打印方法，该方法根据零件的拓扑方向，使打印零件更符合其几何特点，如图 11 所示。这种方法能够提升打印零件的结构强度，并有效解决了阶梯效应的问题。但由于需要添加支撑，导致接触表面的表面光洁度较低，这是后续需要改进的问题。



图 11 Ezair 等打印的螺旋结构^[43]：(a) 去支撑后；(b) 未去支撑

Kubalak 等^[44]提出一种传统 3D 打印零件力学性能增强的方法，该方法在传统打印的零件基础上，根据零件的受载方向，利用多轴机器人打印与零件受载方向一致的复合板，以此来增强零件的力学性能。与传统的打印零件相比，该零件的强度提高了 59%。随后，Kubalak 等^[45]使用 ABB IRB 1200 机器人从零件受载方向上实现了零件整体的打印，研究了分层方向和沉积方向对零件力学性能的影响。对于如图 12 所示的结构，结构的每个分支都会以最佳的力学性能对物体进行支撑，将得到的多轴打印的零件与使用传统方法打印的零件进行拉伸试验，结果发现多轴打印零件的抗拉强度比传统打印零件的抗拉强度高出了 153%。

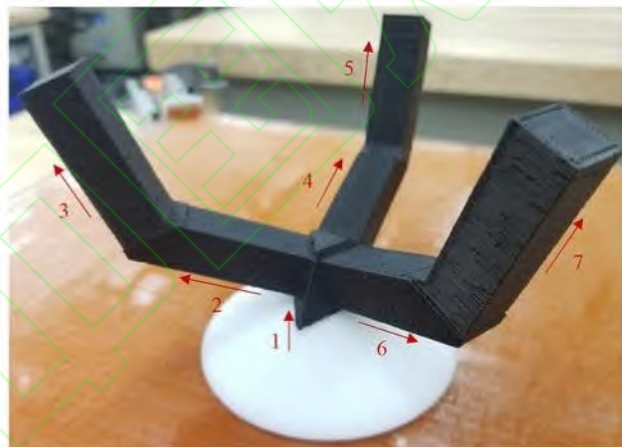


图 12 多个构建方向打印的零件^[45]

在传统熔融沉积成型系统中，所有打印丝的铺设都处于恒定的高度。打印材料层之间的附着力远弱于材料本身的抗拉强度，在打印零件中会存在零件力学性能弱化的方向。为此，Yerazunis 等^[46]将零件的打印纤维设计在与零件内的应力张量紧密对齐的位置，但需要 5 轴打印系统，因此设计了一个集成了 delta 结构（3 自由度）和旋转平台（2 自由度）的 5 轴打印系统来实现打印，如图 13a 所示。与传统的三轴打印零件相比，利用多轴打印的零件的强度提高了 3 到 5 倍。与此类似，Tam 等^[47]提出了一种拓扑优化后的 2.5D 平面来制造零件的方法（如图 13b 所示），该方法使用传统打印机的切片方法对零件进行分层，并将各分层平面的主法线方向与零件受载的主应力线对齐来打印零件，拓扑优化的零件力学性能优于未优化的零件，其承载力可额外增加 80%~100%。Fang 等^[48]通过引入标量场的方法，从标量场中提取 iso 曲面和 iso 曲线来计算曲面层和运动轨迹。该标量场可以根据机械强度要求和制造约束进行优化，与基于平面层的熔融沉积技术相比，该方法制作的模型在实验测试中可以承受高达 1.42~6.35 倍原有的载荷。

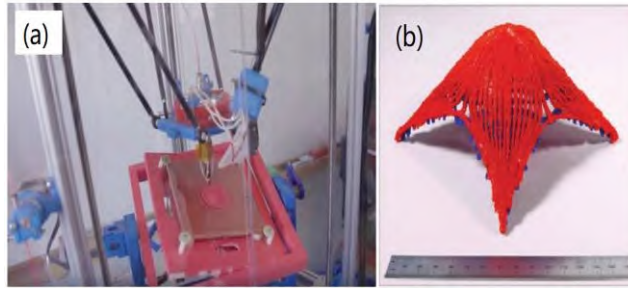


图 13 沿应力线构建的结构：(a) Yeraunis 等^[46]测试的零件；(a) Tam 等^[47]测试的零件

传统的 3D 打印路径规划中缺乏对结构性能的考虑，沿三维主应力矢量沉积材料是一种提高结构强度的有效方法，它在全局几何、拓扑和打印丝布局上对结构性能的进行了考虑。目前使用多轴 3D 打印技术改善零件的力学性能处于初步研究阶段，未来需要开发更智能的路径规划算法，该算法包括：①根据零件的受载情况，自动生成应力线结构；②根据应力线结构，选择零件的构建方向；③处理喷头和打印件之间的碰撞问题。

2.3 多轴 3D 打印技术在去支撑化上的研究

在传统的层式打印方式中，当打印具有悬垂特征的结构时，为了防止悬垂结构塌陷，必须要添加支撑结构。这通常会增加打印的时间、材料以及降低打印质量。然而，支撑结构并不是一定需要的，通过多轴 3D 打印技术在打印过程中改变打印方向，可以实现具有悬垂特征结构的无支撑打印。

Zhao 等人^[26]最早在传统熔融层积打印机中实现悬垂结构的无支撑化打印，提出了一种斜层切片的方法，该方法将等效倾斜角作为目标函数的重要参数，对切片角度进行了优化，从而实现了斜层打印。这种方法可以方便地用传统的 3D 打印机打印悬垂结构，如图 14a 所示，其充分利用了笛卡尔打印机的自由度，通过动态改变各层内的 Z 值进行打印，但由于喷嘴不垂直于打印表面，部分倾斜角度的切片的悬垂结构的底面容易产生毛刺，如图 14b 所示。

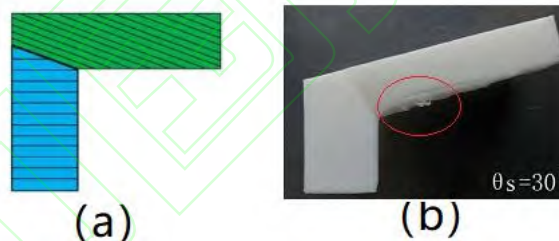


图 14 斜层打印方法^[26]：(a) 斜层切片；(b) 倾斜角为 30 度的零件

对于五轴 3D 打印而言，实现无支撑化打印最简单的方法是对悬垂结构进行分割，然后对模型逐个进行打印。Sundaram 等^[49]提出了一种五轴自适应切片算法，首先通过分析模型曲面法向矢量与打印方向之间的角度，实现对具有悬垂特征的结构进行分割，接着利用曲率阈值对分割的结构进行自适应切片，但该算法并未在打印机进行验证。Lee 等^[50]提出了一种五轴激光直接沉积的切片方法。该方法首先沿 Z 轴方向进行 2.5D 切片，利用切片层之间的拓扑关系（如图 15b~15e），将模型分解为“可构建部分”和“不可构建部分”（图 15a），然后从模型中分割出模型的悬垂特征（即不可构建部分之和），并对分割子区域进行排序，最后沿着构建的方向进行多方向切片。这种方法既简单又容易实现，但只适用于沿着一个或两个方向上的悬垂特征。

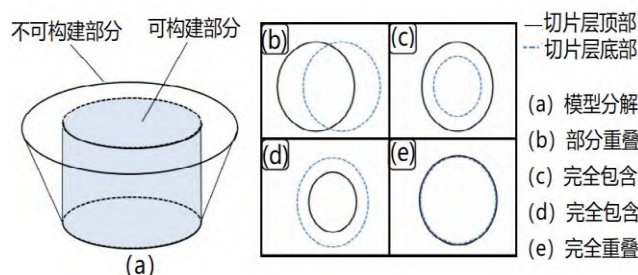


图 15 Lee 等人的分割方法^[33]

文献[26,49,50]的方法在一定程度上实现悬垂结构的去支撑化,但只关注了实体模型的外轮廓,而对于具有内部连续孔或薄壁的悬垂结构,并不能很好的实现去支撑化。为此,Wang 等人^[25]提出了一种五轴动态切片算法,实现了内部具有孔或槽的零件无支撑打印。首先将 STL 模型文件提取为点云模型文件,利用平均曲率流算法提取模型的骨架点集,并使用 B 样条空间曲线拟合骨架点集,得到模型的骨架曲线,通过空间位置转换矩阵来动态转换当前切片与骨架线的交点来实现动态切片,如图 16a 所示。然而由于该方法的层厚不均匀,导致打印模型外表面存在凹陷特征,如图 16b 所示。为了解决这种问题,Liu 等^[51]提出一种电弧增材制造无支撑结构的方法,该方法首先将模型进行分割,然后采用等距多段线生成模型的焊接路径,并确保焊接的方向线为等距多段线的切向量与法向量的叉乘,其生成的均匀层解决了这一问题。Nishikawa 等^[52]实现了 FDM 薄壁零件的无支撑化制造方法,该方法通过动态调整打印的姿态角,使打印层的重心作用于前一层的质心上,从而确保打印丝不会坍塌或滑落。

文献[25,51,52]的方法只适用于无分支的悬垂结构的打印,对于多分支的悬垂结构的打印并不适用。目前,对于多分支模型的无支撑打印通常有两种方法,分别是分割打印和自由曲面打印。分割打印指的是将多支模型

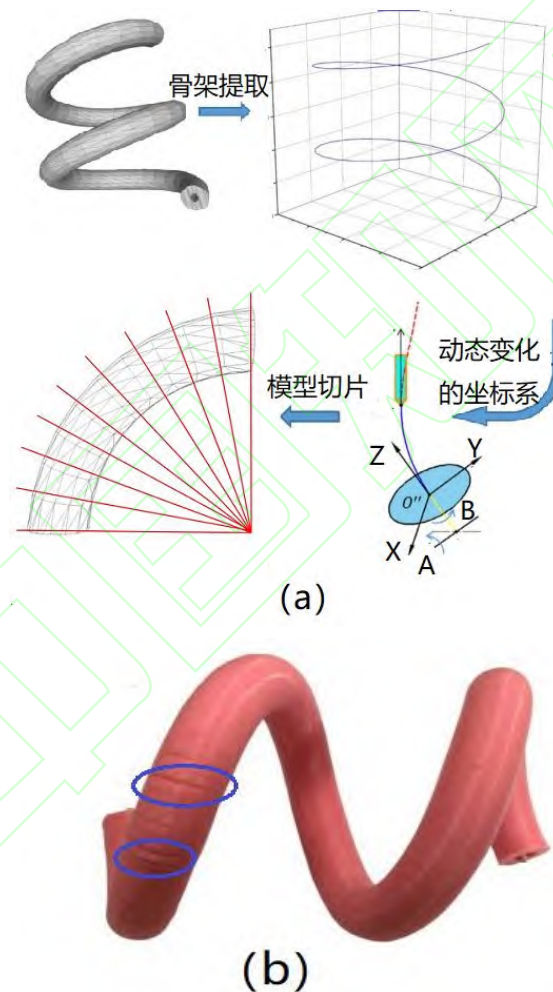


图 16 Wang 等^[25]提出的五轴打印方法: (a) 动态切片过程; (b) 所打印的结构

进行分割,然后使用无分支的悬垂结构打印的方法对模型逐个打印。自由曲面打印指的是将模型分解为一系列的曲面层,然后再由每个曲面生成曲面打印路径。Wang 等^[53]基于文献[25]这种骨架的工艺规划策略,在五轴打印机上实现了多分支结构的打印,该方法将多支结构分割为独立的无支撑子模型,然后再对每个子模型沿骨架的方向对模型进行切片。Wu 等^[30]提出了一种 6 自由度机器人去支撑化成型算法,如图 17 所示,该算法首先根据基于骨架的形状分析将一个模型分割成多个部分。然后结合系统之间的无碰撞约束,确定打印的顺序。最后,对每个部分进行精细的级别划分,并优化打印顺序。对于平行于零件打印平面的切片层,可以按照与传统 FDM 相同的方式生成打印轨迹的 G 代码,而其余的切片层则通过空间转换矩阵生成打印轨迹。Dai 等^[31]提出一种曲面分层算法。首先通过体素化将模型分解为一系列的曲面层,然后再由每个曲面生成曲面打印路径,

这可以依次降低打印维数。接着使用标量场算法寻找一个沉积顺序，在这种顺序下，可以保证打印之间是无碰撞的，最后根据六轴机械臂的约束条件，对打印零件的位置和沉积的方向进行优化，实现无支撑化打印。图 18 是传统切片与曲面切片方法的比较。



图 17 Wu 等人的切片算法^[37]

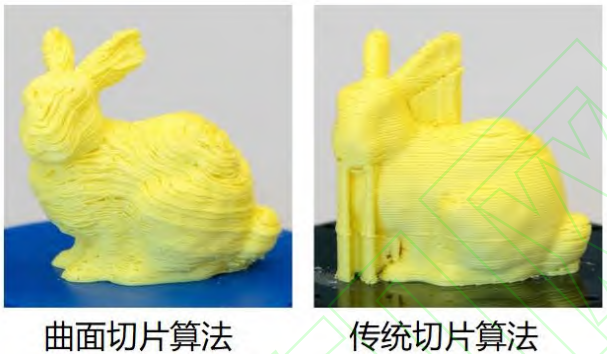


图 18 曲面切片算法与传统切片算法的比较^[38]

零件的去支撑化可以提高悬垂结构轮廓表面质量，节省打印的材料以及缩短零件打印的时间。随着机器人技术的发展，机器人将给无支撑打印带来新一轮发展。然而，目前的多轴切片算法只能实现对简单多支模型的研究，未来的一段时间里，复杂多支模型的打印将会一直是无支撑打印的研究重点。

2.4 多轴 3D 打印技术在阶梯效应上的研究

阶梯效应是传统层式打印的最大诟病，也是影响零件精度最大的因素。在定向层式制造中，人们一直致力于使用自适切片算法来抑制阶梯效应，即根据构建方向模型几何变化而改变切片层厚来减少阶梯效应^[54]。然而这种方法并没有从本质上解决阶梯效应，并增加了制造的时间。利用多轴打印技术，可以自由制造模型的曲面，为解决阶梯效应提供了一种有效的方案。

为了在传统三轴中解决解决阶梯效应的问题，Chakraborty 等^[55] 最早提出一种自由曲面层熔融沉积成型方法，该方法通过动态改变各层内的 Z 值进行打印，具有减少阶梯效应，在制造壳类或弯曲类零件具有明显优势。Allen 等^[56] 和 Llewellyn-Jones 等^[57] 在三轴 delta 打印机上实现了该方法的打印，相比于直角坐标打印机，delta 打印机能够提升打印模型的精度和效率。如图 19（a）是使用传统打印路径打印的零件，图 19（b） 是使用曲面打印路径制造的零件。该方法明显提升了打印零件的光洁度，但这种方法需要支撑，而无法实现悬垂结构的曲面自由打印。

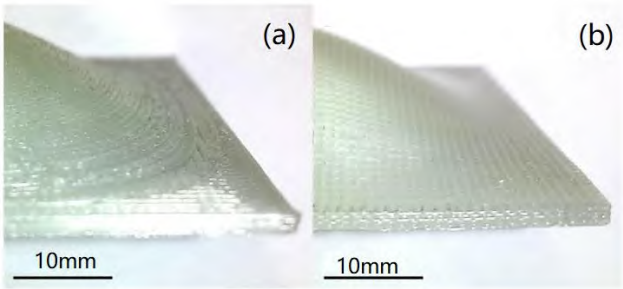


图 19 平面层打印与自由曲面打印的比较^[56]:(a)传统层式打印；(b)自由曲面打印

为了提高工艺效率和制造零件的质量,混合路径被认为是最有效的。**Backer** 等^[58]提出一种蒙皮打印方法,该方法将打印模型的蒙皮区域和内部区域分离出来,内部区域采用传统层式切片,而模型的表皮自由曲面进行路径规划,如图 20a 和 20b 所示。相比自由曲面打印而言,由于内部是传统的层式切片,降低了机器人运动轨迹的插补计算,从而提高了零件的打印速率。类似于 **Backer** 等人的方法, **Shen** 等人^[59]提出一种悬垂结构无阶梯打印,该方法将模型分为三个区域,区域 1 是与 Z 方向平行的外部轮廓,区域 2 是悬垂结构下表面的轮廓,区域 3 是零件的内部填充区。在传统打印和多轴模式下,打印机首先使用传统打印方法打印区域 1,然后旋转平台打印零件区域 2,最后在在第一层上打印填充区域 3,如图 20c 所示。**Flores** 等^[60]提出一种多轴激光直接沉积混合打印方法,其通过可倾斜平台沉积零件表面轮廓,同时打印喷头不断重新定向,使喷头与轮廓相切,最后使用传统的路径方法定向沉积零件的内部区域。

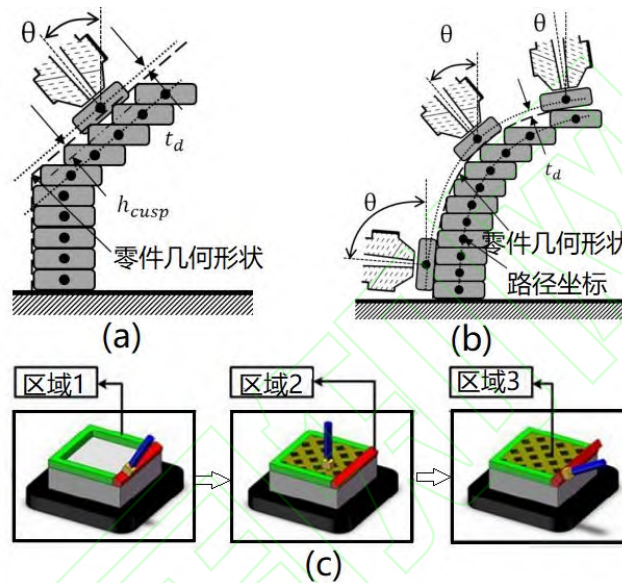


图 20 蒙皮打印方法: (a-b)Backer 等^[58]的打印方法; (c) Shen 等^[59]的打印方法

Li 等^[38]开发了一种多轴 FDM 硬件系统,该系统将打印床与 6 自由度 UR5 机械臂集成在一起。采用机器人操作系统使各轴同步,实现了变厚度层的连续打印。在多轴打印平台上,将模型分解成一系列曲面层,通过连续调整喷嘴方向与模型的轮廓法线方向垂直,使打印零件与模型重合,从而降低阶梯效应,图 21a 和 21b 显示传统制造与该方法制造零件的区别。为了提高零件的打印速率,他们采用了一系列网格填充打印零件的内部。**Isa** 等^[36]提出根据壳类零件的顶部形状对打印模型进行曲面层分解,并确保侧表面的打印方向与模型的切线方向重合,而上表面采用自由曲面打印,即连续调整喷嘴或堆积平台使喷嘴轴线与模型曲面重合,如图 21c 所示。这使得打印零件的质量得到进一步的提升,尤其是壳类零件的上表面。

针对下表面是高曲率曲面的零件, **Zhao** 等^[61]提出使用曲面床来堆积零件的打印模型。如图 22 所示,该打印系统包括用于运动控制的 **KUKA** 机器人、平面打印热床和曲面打印热床。根据零件的下表面曲率,将零件分解为不同厚度的曲面层,并使用曲面填充方法来生成打印路径,该方法可以有效解决零件下表面的阶梯效应问题。

多轴打印技术提供了更自由的打印方式,使零件的打印变得更灵活多样。从目前的研究来看,解决零件制造的阶梯效应的办法主要有三种。第一种是针对上表面是高曲率曲面的零件,可以采用自由曲面打印方法,通过连续调整喷嘴的轴线与零件曲面的法线重合进行打印。第二种针对的是悬垂结构的高曲率表面,将模型分解成一系列曲面层,通过连续调整喷嘴轴线方向与零件的轮廓切线方向对齐。第三种是针对下表面是高曲率曲面的零件,可以通过使用曲面打印床来对零件进行打印。在 FDM 成型中,解决悬垂结构表面的阶梯效应通常通过连续调整层切线方向与零件的轮廓切线方向对齐,然而 FDM 打印丝在实际综合挤压、收缩等各种因素之后,沉积的打印丝的形状会形成成为对称的赛道形状^[26,62],如图 23 所示。打印丝两端的半圆是导致 FDM 零件粗糙度产生的原因。因此如何在 FDM 上实现悬垂结构高曲率表面的自由打印,这是一个未来需要解决的问题。

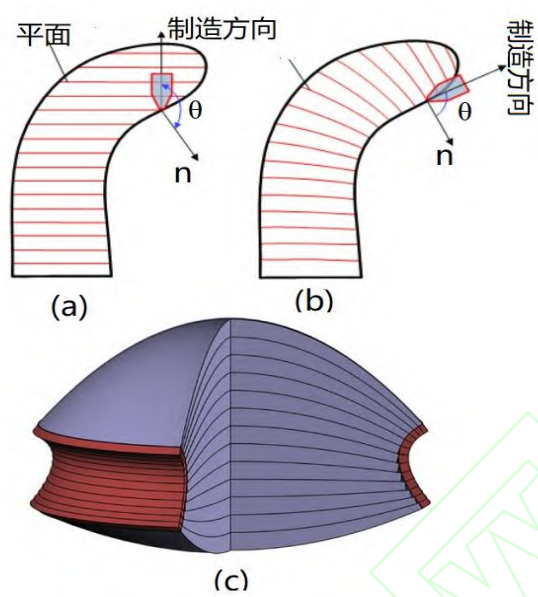


图 21 悬垂结构打印示意图: (a)传统打印^[38]; (b)Li 等打印方法^[38]; (c)Isa 等打印方法^[61]

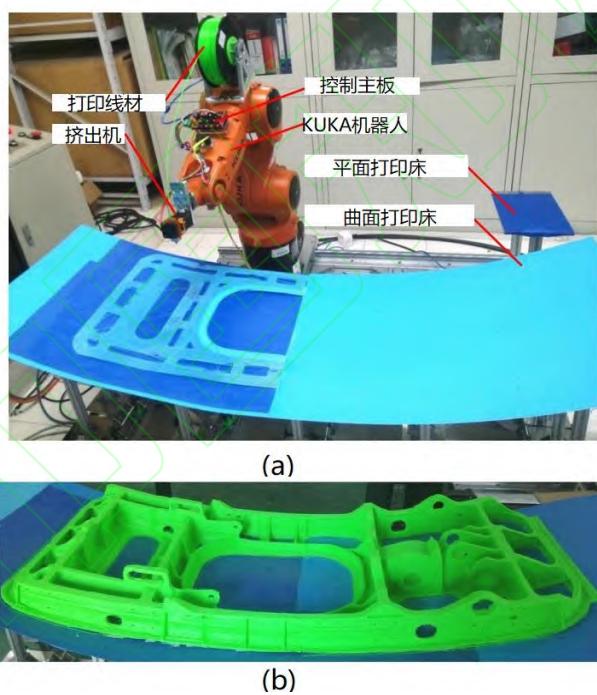


图 22 机器人打印系统^[61]: (a)打印系统的组成; (b)打印完成的零件

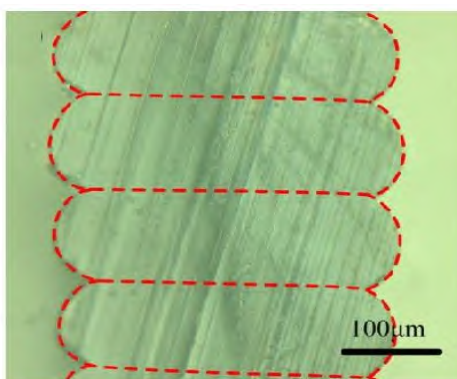


图 23 FDM 打印丝的层积形状^[26]

2.5 多轴 3D 打印技术大尺寸打印上的研究

多自由度系统的使用，让大尺寸打印成为了可能。大尺寸打印的方法有两种，对传统三轴打印系统的扩展以及机器人的使用。荷兰的 3D 打印企业 Blackbelt 3D^[63, 64]推出了一款如图 24 所示的 3D 打印机，该 3D 打印机具有用于沉积构建表面的移动输送带，理论上该打印机可以打印无限长的结构。同时该打印机支持绕 Y 轴进行旋转，以 45 度角打印悬垂结构，但这些悬垂结构只能在一个方向上进行。



图 24 Blackbelt 3D 研发的大尺寸打印机^[63, 64]

DLP 技术和 SLA 技术都是一种自底向上的成型技术，与 SLA 唯一不同的是 DLP 使用的是线光源，而 SLA 使用的是点光源。由于光源不可移动的特性，致使 DLP 和 SLA 打印的模型较小。为此，Yi 等^[65]在 DLP 打印中使用 delta 结构实现了 DLP 零件的大尺寸打印，该打印机由 delta 机构，三个垂直 Z 轴和一个倾斜装置组成，如图 25 所示。该大尺寸打印的挑战是如何用固定矩形光源区域覆盖模型切片后的平面多边形截面，Yi 等利用多边形的中轴（或骨架）来分割多边形截面，并对分割的子多边形进行最优合并。对于每个合并的部分，计算一组具有最佳方向的基本矩形块。同时打印机中的倾斜装置配合 delta 机构运动，有效的将每个固化层和 PDMS 膜（防止固化层粘接在储脂槽上）进行了分离，这种方法也可以扩展到 SLA 的大尺寸打印上。

四轴飞行器已经实现了良好的飞行控制^[66, 67]，被广泛应用于导航和定位^[68, 69]。为了实现大尺寸的零件打印，Hunt 等^[70]研究了一种空中 3D 打印机器人（如图 26 所示），该飞行器能够沉积聚氨酯泡沫建造结构，并允许打印模块进行旋转，在侧向进行打印。该飞行打印机克服了打印结构尺寸的限制，提供了极大的灵活性，在航空建设领域具有很好的发展前景。但这种技术的主要限制是飞行机器人的有效载荷有限，层积精度需要很高的飞行稳定性保证，电池寿命有限等问题。

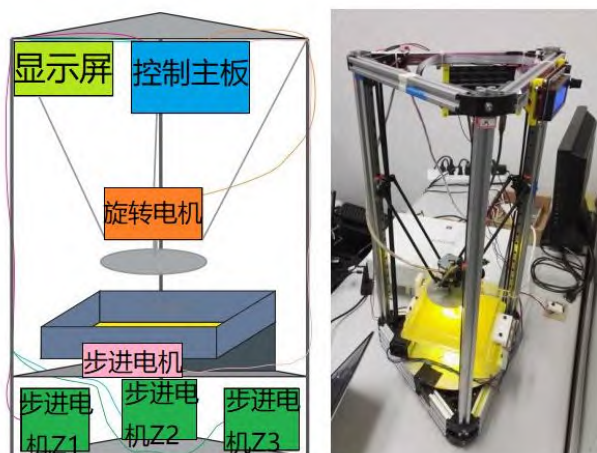


图 25 DLP 技术的大尺寸打印^[65]



图 26 空中飞行打印机^[70]

3D 打印技术在建筑领域的发展可提高建造的效率，降低能源消耗和人工成本。由于建筑结构的大尺寸要求，多轴机器人辅助制造技术在建筑设计和施工领域得到了广泛的应用。在建筑行业，多轴 3D 打印技术已成功应用于轮廓成型、混凝土打印等工艺。

Gosselin 等^[71]使用切向连续性分层方法，实现了大尺度建筑结构的无支撑打印，其打印系统如图 27a 所示。该打印过程包括两个步骤。首先制备砂浆预混料，使其具有适于泵送的流变特性，即具有细颗粒尺寸分布、低临界剪切应力和缓慢硬化质量。并将预混料保存在剪切混合器中，以避免因其触变行为而发生凝固。然后使用蠕动泵将预混料输送至打印头内的混合螺杆。Barnett 等^[72]采用六自由度悬索机器人实现了大型雕刻的打印，如图 27b 和 27c 所示。机器人的索缆定位系统提供了大范围的运动，与传统用于 3D 打印的机架式定位系统相比，悬索机器人系统质量更轻和重新配置。

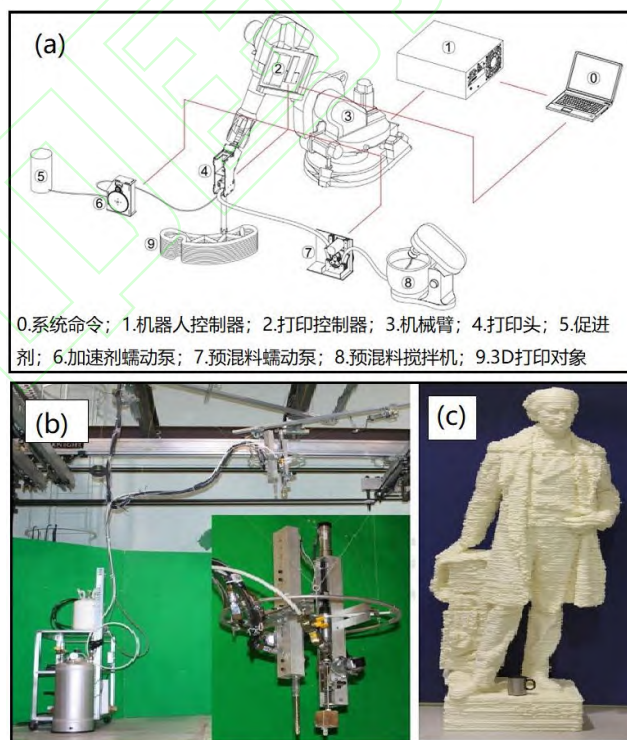


图 27 机器人在大尺寸打印的应用：(a) 机器人打印系统^[71]；(b) 悬索机器人^[72]；(c) 雕像^[72]

如果将多自由度机器人连接到移动基座，则机器人可以自由移动并能打印更大尺寸的结构^[73]。Kumar 等^[74]使用 ABB 的 IRB 4600 机器人与履带相结合(图 28a)，实现了混凝土结构的无废料制造。机器人集成的视觉反馈系统可以在现场制造过程中对制造公差进行反馈，实现结构的打印形状和目标形状之间进行协调。MX3D 公

司^[75]提出了一种电弧增材制造桥梁的构想，机器人可以沿着自己打印的导轨移动，并在导轨之间构建桥梁结构(图 28b)。**Keating** 等^[76]研究了一种移动复合机器人打印系统，该系统由一个 4 自由度液压臂和一个较小的 6 自由度电动臂组成(图 28c)，可以在各种材料上进行增材制造，减材制造以及混合制造。**Hack** 等^[77]设计了一种将模壳和钢筋统一起来的增材制造技术，移动机械臂的末端执行器具有弯曲和焊接钢丝的能力，可以在现场制造自由形式设计的网格(图 28d)，填充混凝土后形成钢筋混凝土结构。**Subrin** 等^[78]将自动导引车(AGV)和工业机器人相结合，实现了房屋的打印。这种复杂系统的集成会对 AGV 的位置偏移产生影响，在保证轨迹可行性的前提下，需要采用修正矩阵对工业机器人进行重新定位。尽管移动式机器人打印系统在建筑行业表现出了巨大的应用前景，但移动式机器人在增材制造系统的定位还存在许多问题及挑战，需要广大的研究者去解决。

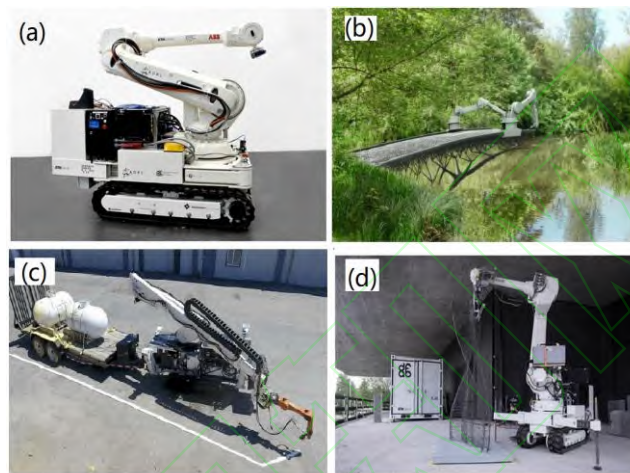


图 28 移动式机器人打印^[74-77]: (a) 履带式机器人; (b) 移动式电弧增材制造构想; (c) 复合机器人打印; (d) 机器人增材制造复杂网格

3 存在的问题和未来可能发展的方向

多轴 3D 打印技术使用曲面路径对零件进行打印，有效的提高了零件的表面质量和性能，然而当前曲面路径规划中依旧存在诸多问题。在由喷头沉积类型的 3D 打印工艺中，当构建的表面层存在凹陷特征时，可能会发生局部碰撞，导致零件打印失败或精度受损。因此对于曲面分层而言，如何保证路径的凸性或避免较小的凹陷特征也是一个值得关注的问题。此外，在零件轮廓的曲率发生剧烈变化的区域，可能无法保证沉积路径的凸性，有研究者提出采用细长的喷头来解决这个问题，这意味着需要重新对喷头进行一些研究，例如，探寻喷头形状对材料挤出性能、零件性能、路径规划等方面的影响，其需要更多的研究者加入，并从中评价出最优的喷头形状。在多轴 3D 打印路径规划中还应使喷嘴尽量垂直于打印曲面，例如，在激光直接沉积工艺中，倾斜喷嘴会引起激光光斑大小的变化，从而对零件制造的质量产生重要影响^[79]。相比传统 3D 打印而言，多轴 3D 打印有效提升了零件的打印质量，但由于打印方向的连续调整，使得多轴 3D 打印的效率较慢，因此我们无法评价那种路径规划方法的好坏，但未来可以把它们集成在一个应用软件中，根据用户的需求，对轨迹规划进行选择。另外，有关多轴 3D 打印在奇异域速度限制下的运动规划研究较少^[80]，例如，在 FDM 成型中，挤出机的速度是受硬件限制的，当打印速度过快时，这将会导致材料的挤出不足，造成零件缺陷，如图 29 所示。

目前的多轴 3D 打印研究中，大量使用机器人进行辅助制造，与传统打印零件相比，多轴打印的零件精度较低，其主要的原因是机器人的定位精度较低。目前的工业机器人重复定位精度在 0.1mm~0.5mm 之间，其受机器人零件加工误差、零件装配误差和零部件磨损等因素的影响^[81]。此外，机器人在打印时，需要对运动轨迹进行大量的插补计算，再加上插补误差，将使其打印误差进一步扩大。目前的多轴 3D 打印系统的研究大多处于开环打印状态，并没有引入反馈控制。3D 打印过程控制系统中的各控制量(如 FDM 的温度、压力、送丝速度等)通常会耦合作用于被控量，再加上存在大量的不稳定因素，如零件支撑的稳定性、电机运动的准确性、零件的翘边以及材料形态的变化等一些的因素影响，使得 3D 打印过程控制系统变得复杂化^[82]。然而机器人辅

助制造的零件精度较低，又必须要引入反馈控制，使其打印的质量得以提升。随着视觉反馈系统和机器学习的快速发展，可能将给多轴 3D 打印技术的过程控制带来曙光^[83]，视觉反馈结合机器学习应用于机器人辅助增材制造的定位，将可能有效的解决多轴打印零件的打印精度问题。

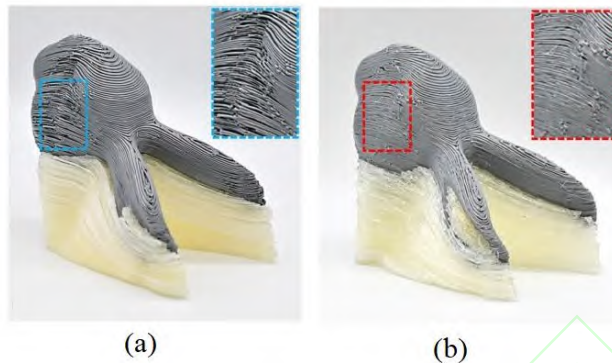


图 29 熔融沉积成型^[80]：(a) 奇异速度下；(b) 非奇异速度下

在当前的算法中，没有可以生成与机器人语言兼容的 G 代码的数据算法，也没有关于连接 CAD 系统和机器人辅助制造过程的信息交流的标准。传统的打印过程将规划路径转化为机器能够识别的 G 代码，然后打印机通过读取输入文件的 G 代码信息对零件进行打印。而机器人辅助制造与传统打印不同，其一般通过系统的解析器对运动信息和辅助信息（如进给速度和加热控制）进行提取，最后再将信息发送给机器人。并且不同的机器人有不同的语言，如何实现打印系统之间的信息交流也将是未来需要关注的问题。此外，传统的 FDM 成型技术，之所以得以广泛流行，其原因之一是其低廉的价格。目前的多轴打印系统大多成本较高，开发低成本的多轴打印系统也将是未来多轴打印研究的方向之一。

多轴 3D 打印的灵活性，除了在零件力学性能改善、去支撑化、解决阶梯效应以及大尺寸打印四个方面得到应用外，在以下几个方向，也将得到广泛的应用。

(1) 多材料打印。高自由度机器人可以提供更大的灵活性来有效地操纵各种打印喷头，允许使用多种材料来构建复杂的结构，还将给 4D 打印设计提供更多灵活的方案。4D 打印是一种设计智能动态结构的技术，这种智能动态变形能力主要依赖于三维空间中智能材料在普通材料中的分布和组合方式^[84,85]，多轴打印技术将摆脱传统的定向制造，为 4D 打印提供更佳灵活的智能材料分布，实现更复杂的智能构件的变形。

(2) 原位打印。原位打印是一种在缺损部位进行修复的技术，其通过对缺损部位进行扫描以获得缺损部位数据后，在现场直接进行打印。一般而言，缺损部位的结构一般不是规则的形状，传统的打印系统不够灵活，无法选择性地在受损区域进行打印。而多轴打印技术却能够容易的胜任这件任务，如 Li 等人^[86]使用小型机械臂和双光源喷嘴系统搭建了一种原位打印平台（四自由度），能够打印曲面形状的结构，并可在外科手术中直接应用。

(3) 线框打印。在需要快速迭代的设计领域中（如人体工程学匹配），当前的 3D 打印技术的制造速度仍不能使设计者满意，因此 Mueller 等^[87]提出了线框打印。近年来，该技术也受到广大学者的关注。复杂线框模型打印要求打印机能够进行任意三维运动，如果按照传统的定向制造方式，这可能会导致打印机构和已完成部分的结构发生碰撞^[88]。通过多自由机器人与规划算法结合，将能够轻松的实现复杂线框模型的无碰撞打印。

(4) 混合制造。多轴 3D 打印的零件通常具有较低的精度以及不令人满意的表面质量^[89-90]。因此，有必要在缩短生产时间的同时，提高制造零件的表面质量。目前，已经有学者使用机器人，对增材制造和减材制造混合工艺进行了研究，以此实现两种工艺的优势互补。通过引入换刀机构，机器人可以实现混合制造。机器人使用打印喷头可以执行增材制造步骤，而通过换刀机构使用切削刀具来实现减材制造。此外，这种混合工艺不止于增材和减材制造，也可以与其它的一些工艺相结合，例如，Qi 和 Hao^[91,92]结合传统的铸造工艺和金属微滴喷射打印，提出了一种不同的混合打印工艺。如图 30 所示，该工艺首先将均匀的液滴沉积在能够旋转的可溶型芯上，打印完成后将型芯溶解可以获得具有高质量内表面的管，其内表面粗糙度可达 $4.38\mu\text{m}$ 。

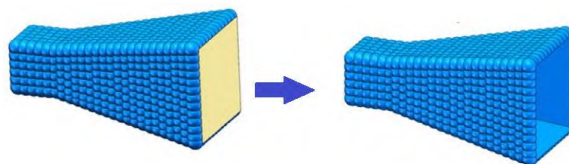


图 30 铸造工艺和金属微滴喷射打印相结合的混合制造^[92]

4 结束语

多轴 3D 打印技术作为传统 3D 打印技术的扩展,有效的解决了传统 3D 打印的存在的一些问题,如缩短零件的制造时间、提高零件的质量、提高零件的力学性能和制造一些大型零件等。多轴 3D 打印技术是一门结合材料、力学、计算机、机器人学等学科的技术,在各行业应用时,需要考虑行业本身打印结构所需的特点,再结合硬件与软件对结构进行设计。硬件和软件是多轴 3D 打印技术的支撑,多轴 3D 打印系统的发展需要注重硬件和软件两方面的创新。多自由度机器人具有极大的灵活性,在多材料打印、原位打印、线框打印以及混合制造等领域将有着巨大的潜在应用前景。然而目前多轴 3D 打印技术的研究还处在初级探索阶段,仍然有许多问题等待研究者们去解决。

参考文献:

- [1] LEWIS J A, AHN B Y. Three-dimensional printed electronics[J]. Nature, 2015, 518(7537): 42-43.
- [2] SUN K, WEI T S, AHN B Y, et al. 3D Printing of Interdigitated Li-Ion Microbattery Architectures[J]. Advanced Materials, 2013, 25(33):4539-4543.
- [3] GOYANES A, FINA F, MARTORANA A , et al. Development of modified release 3D printed tablets (print lets) with pharmaceutical excipients using additive manufacturing[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2017, 527(1):1-21.
- [4] MANNOOR M S, JIANG Z, JAMES T, et al. 3D Printed Bionic Ears[J]. Nano Letters, 2013, 13(6):2634-2639.
- [5] LINAS J, DARIUS G, et al. Optically Clear and Resilient Free-Form μ -Optics 3D-Printed via Ultrafast Laser Lithography[J]. Materials, 2017,10(12):2-18.
- [6] SALET T A M, AHMED Z Y, BOS F P, et al. Design of a 3D printed concrete bridge by testing[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2018, 13(3): 222-236.
- [7] HUANG W C, CHANG K P, WU P H, et al. 3D printing optical engine for controlling material microstructure[J]. Physics Procedia, 2016, 83: 847-853.
- [8] TRUBY R L, LEWIS J A. Printing soft matter in three dimensions[J]. Nature, 2016, 540(7633): 371-378.
- [9] GE L, DONG L, WANG D, et al. A digital light processing 3D printer for fast and high-precision fabrication of soft pneumatic actuators[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018,273: 285-292.
- [10] POPESCU D, ZAPCIU A, AMZA C, et al. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review[J]. Polymer Testing, 2018, 69: 157-166.
- [11] SINGH R, SINGH V. Experimental investigations for rapid moulding solution of plastics using polyjet printing [J]. Materials Science Forum, 2011, 701: 15-20.
- [12] THOMPSON S M, BIAN L, SHAMSAEI N, et al. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics[J]. Additive Manufacturing, 2015, 8: 36-62.
- [13] TAŞDEMİR A, NOHUT S. An overview of wire arc additive manufacturing (WAAM) in shipbuilding industry[J]. Ships and Offshore Structures, 2020,7(16): 1-18.
- [14] Fraunhofer I. Droplet-Based Additive Manufacturing of Hard Metal Components by Thermoplastic 3D Printing (T3DP)[J]. Journal of Ceramic Science and Technology, 2016, 8(1): 155-160.
- [15] HU Meijuan, JI Linggang, MA Qiurong, et al.Overview of Laser Additive Manufacturing Technology and Status[J].Petroleum Tubular Goods & Instruments,2019,5(5):1-6(in chinese).[胡美娟, 吉玲康, 马秋荣, 等. 激光增材制造技术及现状研究[J]. 石油管材与仪器, 2019, 5 (5) :1-6.]

- [16] JASVEER S, JIANBIN X. Comparison of different types of 3D printing technologies[J]. International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP), 2018, 8(4): 1-9.
- [17] WU Chenming, DAI Chengkai, WANG Changling, et al. Overview of the research progress of multi-degree-of-freedom 3D printing technology[J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(9):1918-1938(in chinese).[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.]
- [18] TAMBURRINO F , GRAZIOSI S , BORDEGONI M . The influence of slicing parameters on the multi-material adhesion mechanisms of FDM printed parts: an exploratory study[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2019, 14(4):1-17.
- [19] JIANG J, NEWMAN S T, ZHONG R Y. A review of multiple degrees of freedom for additive manufacturing machines[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2021,doi: 10.1080/0951192X.2020.185851.
- [20] XU K , LI Y , CHEN L , et al. Curved layer based process planning for multi-axis volume printing of freeform parts[J]. Computer-Aided Design, 2019, 114:51-63.
- [21] TAUFIK M, PRASHANT K J. Surface roughness improvement using volumetric error control through adaptive slicing[J]. International Journal of Rapid Manufacturing,2017,6(4): 279-302.
- [22] WANG Q, Y ANG P , HUANG L, et al. An adaptive slicing thickness adjustment method based on cloud point in 3D printing[C]//2016 13th International Conference on Embedded Software and Systems (ICESS),2016: 108-113.
- [23] GAO Xia, QI Shunxin, SU Yunlan, et al. Structure and properties of crystalline polymers processed by fused deposition molding[J]. Acta Polymerica Sinica, 2020, 51(11): 1214-1226(in chinese). [高霞,戚顺新,苏允兰,等.熔融沉积成型加工的结晶性聚合物结构与性能[J].高分子学报,2020,51(11):1214-1226.]
- [24] WULLE F, COUPEK D, SCHÄFFNER F, et al. Workpiece and machine design in additive manufacturing for multi-axis fused deposition modeling[J]. Procedia Cirp, 2017, 60: 229-234.
- [25] WANG M , H ZHANG, HU Q , et al. Research and implementation of a non-supporting 3D printing method based on 5-axis dynamic slice algorithm[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 57:496-505.
- [26] ZHAO H M , HE Y , FU J Z , et al. Inclined layer printing for fused deposition modeling without assisted supporting structure[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 51:1-13.
- [27] WANG W M , ZANNI C , KOBELT L . Improved Surface Quality in 3D Printing by Optimizing the Printing Direction[J]. Computer Graphics Forum, 2016, 35(2):59-70.
- [28] HILDEBRAND K , BICKEL B , ALEXA M . Orthogonal slicing for additive manufacturing[J]. Computers & Graphics, 2013, 37(6):669-675.
- [29] WEI X, QIU S, ZHU L, et al. Toward support-free 3D printing: A skeletal approach for partitioning models[J]. IEEE Transactions on visualization and computer graphics, 2017, 24(10): 2799-2812.
- [30] WU C , DAI C , FANG G , et al. RobotFDM: A robotic system for support-free fabrication using FDM[C]// IEEE International Conference on Robotics & Automation. IEEE, 2017.
- [31] DAI C , WANG C , WU C , et al. Support-free volume printing by multi-axis motion[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2018, 37: 1-14.
- [32] ZHAO D, GUO W. Shape and performance controlled advanced design for additive manufacturing: A review of slicing and path planning[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2020, 142(1): 010801.
- [33] 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.
- [34] JU T, GOLDMAN R. Morphing Rational B-spline Curves and Surfaces Using Mass Distributions[C]//Eurographics (Short Presentations),2003.
- [35] XU K, LI Y, CHEN L, et al. Curved layer based process planning for multi-axis volume printing of freeform parts[J]. Computer-Aided Design, 2019, 114: 51-63.
- [36] 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.
- [37] ETIENNE J, RAY N, PANOZZO D, et al. CurviSlicer: Slightly curved slicing for 3-axis printers[J]. ACM Transactions on Graphics

(TOG), 2019, 38(4): 1-11.

- [38] LI Y, TANG K, HE D, et al. Multi-Axis Support-Free Printing of Freeform Parts with Lattice Infill Structures[J]. Computer-Aided Design, 2021, 133: 102986.
- [39] SINGAMNENI S, ROYCHOUDHURY A, DIEGEL O, et al. Modeling and evaluation of curved layer fused deposition[J]. Journal of materials processing technology, 2012, 212(1): 27-35.
- [40] AHLERS D, WASSERFALL F, HENDRICH N, et al. 3D printing of nonplanar layers for smooth surface generation[C]//2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2019: 1737-1743.
- [41] JIN Y, DU J, HE Y, et al. Modeling and process planning for curved layer fused deposition[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1): 273-285.
- [42] CHACÓN J M, CAMINERO M A, García-Plaza E, et al. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection[J]. Materials & Design, 2017, 124: 143-157.
- [43] EZAIR B, FUHRMANN S, ELBER G. Volumetric covering print-paths for additive manufacturing of 3D models[J]. Computer-Aided Design, 2018, 100: 1-13.
- [44] KUBALAK J R, WICKS A L, WILLIAMS C B. Using multi-axis material extrusion to improve mechanical properties through surface reinforcement[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2018, 13(1): 32-38.
- [45] KUBALAK J R, WICKS A L, WILLIAMS C B. Exploring multi-axis material extrusion additive manufacturing for improving mechanical properties of printed parts[J]. Rapid Prototyping Journal, 2019, 25(2): 356-362.
- [46] YERAZUNIS W S, BARNWELL J C I, NIKOVSKI D N. Strengthening ABS, nylon, and polyester 3D printed parts by stress tensor aligned deposition paths and five-axis printing. Solid Free Fabr Symp[J]. 2016, 10: 1-13.
- [47] TAM K M M, MUELLER C T. Additive manufacturing along principal stress lines[J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2017, 4(2): 63-81.
- [48] FANG G, ZHANG T, ZHONG S, et al. Reinforced FDM: Multi-axis filament alignment with controlled anisotropic strength[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2020, 39(6): 1-15.
- [49] SUNDARAM R, CHOI J. A Slicing Procedure for 5-Axis LaserAided DMD Process[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(3): 632-636.
- [50] LEE K, JEE H. Slicing algorithms for multi-axis 3-D metal printing of overhangs[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2015, 29(12): 5139-5144.
- [51] LIU B, SHEN H, DENG R, et al. Research on GMAW based non-supporting thin-wall structure manufacturing[J]. Rapid Prototyping Journal, 2021, 27(2): 333-345.
- [52] NISHIKAWA H, MORIMOTO Y, HAYASHI A. Development of Path Generation Method for Five-Axis 3D Printer[J]. International Journal of Automation Technology, 2019, 13(3): 361-371.
- [53] WANG X, CHEN L, LAU T Y, et al. A skeleton-based process planning framework for support-free 3+ 2-axis printing of multi-branch freeform parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(1): 327-350.
- [54] ZHAO Jibin, LIU Weijun. Recent progress in slicing algorithm of rapid prototyping technology [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2009, 15(2): 209-221 (in chinese). [赵吉宾, 刘伟军. 快速成型技术中分层算法的研究与进展[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(2): 209-221.]
- [55] CHAKRABORTY D, REDDY B A, CHOUDHURY A R. Extruder path generation for Curved Layer Fused Deposition Modeling[J]. Computer-Aided Design, 2008, 40(2): 235-243.
- [56] ALLEN R, TRASK R S. An experimental demonstration of effective Curved Layer Fused Filament Fabrication utilising a parallel deposition robot[J]. Additive Manufacturing, 2015, 8: 78-87.
- [57] LLEWELLYN-JONES T, ALLEN R, TRASK R. Curved Layer Fused Filament Fabrication Using Automated Toolpath Generation[J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2016, 3(4): 236-243.
- [58] BACKER W D, BERGS A P, Tooren M. Multi-Axis Multi-Material Fused Filament Fabrication with Continuous Fiber Reinforcement[C]// 2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2018.

- [59] SHEN H, DIAO H, YUE S, et al. Fused deposition modeling five-axis additive manufacturing: machine design, fundamental printing methods and critical process characteristics[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2018,24(3):548-561.
- [60] FLORES J, GARMENDIA I, PUJANA J. Toolpath generation for the manufacture of metallic components by means of the laser metal deposition technique[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 101(5): 2111-2120.
- [61] ZHAO G, MA G, FENG J, et al. Nonplanar slicing and path generation methods for robotic additive manufacturing[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(9): 3149-3159.
- [62] CHEN X F, ZHANG Y P. Research about the ways to control the error of FDM forming workpiece[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2011, 31(11): 39-36.
- [63] WÜTHRICH M, ELSPASS W J , BOS P , et al. Novel 4-Axis 3D Printing Process to Print Overhangs Without Support Material[C]// *Industrializing Additive Manufacturing*, 2021:130-145.
- [64] XIA X. Blackbelt 3D launches FDM 3D printer that can print continuously [EB/OL]. <http://www.itmsc.cn/archives/view-171283-1.html>, 2017-05-11/2021-05-12 .
- [65] YI R, WU C, LIU Y J, et al. Delta DLP 3-D printing of large models[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2017, 15(3): 1193-1204.
- [66] LUPASHIN S , SCHOELLIG A , SHERBACK M , et al. A Simple Learning Strategy for High-Speed Quadcopter Multi-Flips[C]// *Robotics and Automation (ICRA)*, 2010 IEEE International Conference on, 2010: 1642–1648.
- [67] MICHAEL N , D MELLINGER, LINDSEY Q , et al. The GRASP Multiple Micro-UAV Testbed[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2010, 17(3):56-65.
- [68] TIJMONS S, DE WAGTER C, REMES B, et al. Autonomous Door and Corridor Traversal with a 20-Gram Flapping Wing MAV by Onboard Stereo Vision[J]. *Aerospace*, 2018, 5(3): 69.
- [69] LOIANNO G, MULGAONKAR Y, BRUNNER C, et al. Autonomous flight and cooperative control for reconstruction using aerial robots powered by smartphones[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2018, 37(11): 1341-1358.
- [70] HUNT G , MITZALIS F , ALHINAI T , et al. 3D printing with flying robots[C]// *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2014:4493-4499.
- [71] GOSSELIN C , DUBALLET R , ROUX P , et al. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders[J]. *Materials & Design*, 2016, 100:102-109.
- [72] BARNETT E , GOSSELIN C . Large-Scale 3D Printing With A Cable-Suspended Robot[J]. *Additive Manufacturing*, 2015, 7:27-44.
- [73] GIFTTHALER M, SANDY T, DÖRFLER K, et al. Mobile robotic fabrication at 1: 1 scale: the in situ fabricator[J]. *Construction Robotics*, 2017, 1(1): 3-14.
- [74] KUMAR N , HACK N , DOERFLER K , et al. Design, development and experimental assessment of a robotic end-effector for non-standard concrete applications[C]// *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2017.
- [75] BHATT P M, MALHAN R K, SHEMBEKAR A V, et al. Expanding capabilities of additive manufacturing through use of robotics technologies: A survey[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 31: 100933.
- [76] KEATING S J, LELAND J C, CAI L, et al. Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales[J]. *Science Robotics*, 2017, 2(5) :eaam8986.
- [77] HACK N, WANGLER T, MATA-FALCÓN J, et al. Mesh mould: an on site, robotically fabricated, functional formwork[C]//*Second Concrete Innovation Conference (2nd CIC)*,2017, 19: 1-10.
- [78] SUBRIN K , BRESSAC T , GARNIER S , et al. Improvement of the mobile robot location dedicated for habitable house construction by 3D printing[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, 51(11):716-721.
- [79] PLAKHOTNIK D, GLASMACHER L, VANEKER T, et al. CAM planning for multi-axis laser additive manufacturing considering collisions[J]. *CIRP Annals*, 2019, 68(1): 447-450.
- [80] ZHANG T, CHEN X, FANG G, et al. Singularity-aware motion planning for multi-axis additive manufacturing[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021.
- [81] WU Jinhui, TAO Yourui. Overview of the research status of positioning accuracy and reliability of industrial robots[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(18): 2180-2188(in chinese).[吴锦辉,陶友瑞.工业机器人定位精度可靠性研究现状综述[J].中

国机械工程,2020,31(18):2180-2188.]

- [82] LI Xuan, MO Hong, LI Shuangshuang, et al. Research progress of process control problems in 3D printing technology [J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(7): 983-1003(in chinese).[李轩,莫红,李双双,等.3D 打印技术过程控制问题研究进展[J].自动化学报,2016,42(7):983-1003.]
- [83] URHAL P , WEIGHTMAN A , DIVER C , et al. Robot assisted additive manufacturing: A review[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 59(OCT.):335-345.
- [84] ZHAO Xianfeng, TANG Pengfei, SHI Hongyan, et al. Progress in 4D printing technology research and application [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(3): 34-46+54(in chinese).[赵先锋,汤朋飞,史红艳,等.4D 打印技术研究与应用进展[J].华南理工大学学报(自然科学版),2021,49(3):34-46+54.]
- [85] ZHAO Xianfeng, TANG Pengfei, SHI Hongyan. Research progress on prediction of mechanical properties of 4D printing soft composite[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica,2021,38(6):1651-1668(in chinese). [赵先锋,汤朋飞,史红艳.4D 打印复合软材料力学性能预测研究进展[J].复合材料学报,2021,38(6):1651-1668.]
- [86] LI X , QIN L , LI D , et al. Development of a Robotic Arm Based Hydrogel Additive Manufacturing System for In-Situ Printing[J]. Applied Sciences, 2017, 7(1):73.
- [87] MUELLER S , IM S , GUREVICH S , et al. WirePrint: 3D printed previews for fast prototyping[C]// ACM Symposium on User Interface Software & Technology, 2014.
- [88] WU R, PENG H, FRANCOIS G, et al. Printing arbitrary meshes with a 5DOF wireframe printer[J]. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(4):1-9.
- [89] DAI D, GU D. Tailoring surface quality through mass and momentum transfer modeling using a volume of fluid method in selective laser melting of TiC/AlSi10Mg powder[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 88:95-107.
- [90] LI L , HAGHIGHI A , YANG Y . A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: Design and case studies[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 33:150-160.
- [91] Qi L, Yi H, Luo J, et al. Embedded printing trace planning for aluminum droplets depositing on dissolvable supports with varying section[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 63: 101898.
- [92] YI H, QI L, LUO J, et al. Direct fabrication of metal tubes with high-quality inner surfaces via droplet deposition over soluble cores[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 264: 145-154.

作者简介:

汤朋飞 (1997—), 男, 贵州盘州人, 硕士研究生, 研究方向: 3D/4D 打印, E-mail: 192124974@qq.com;

+赵先锋 (1974—), 男, 河南新乡人, 副教授, 博士, 研究方向: 3D/4D 打印、CAE、CAM, 通讯作者, E-mail: zxf5111@126.com;

史红艳 (1976—), 女, 山西省沁县人, 讲师, 博士, 研究方向: 3D/4D 打印及切削机理, E-mail: historyard@126.com;

胡波 (1996—), 男, 贵州遵义人, 硕士研究生, 研究方向: 3D 打印, E-mail: 1335103838@qq.com;

丁井虎 (1998—), 男, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 研究方向: 3D 打印, E-mail: 244330429@qq.com。