

复杂结构的多轴无支撑 3D 打印的工艺规划算法研究 最新进展和展望

张江兆, 汤辉亮, 王楚, 吴晓暄, 龙雨*

广西大学机械工程学院激光智能制造与精密加工所, 广西 南宁 530004

摘要 3D 打印已被广泛应用于汽车、航空航天、船舶、医药等领域。但是, 传统 2.5 轴沉积方式在大型复杂结构的制造中面临阶梯效应、需要支撑结构, 甚至无法制造的困难。多轴沉积方式为复杂结构的制造打开了新局面, 克服了传统方法需要支撑结构的问题, 显示出极高的制造灵活性, 但目前缺少对多轴无支撑制造的研究总结。因此, 本文首先回顾了多轴无支撑制造的工艺规划方法, 根据各方法处理复杂模型的能力, 将其分为基于悬垂结构分解、基于骨架化、基于约束优化、基于曲面层分解和基于内/外体积分解等方法; 然后, 讨论了多轴无支撑打印在表面质量、悬垂区域制造、精度控制、路径规划等方面存在的问题和挑战; 最后, 针对目前存在的问题和挑战, 展望了未来多轴无支撑打印的发展方向。

关键词 激光技术; 多轴 3D 打印; 无支撑 3D 打印; 工艺规划; 机器人辅助增材制造

中图分类号 TH164, TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1402302

1 引 言

增材制造(AM)技术, 又称 3D 打印技术, 诞生于 20 世纪 80 年代。相较于传统的减材制造和等材制造技术, 增材制造技术具有能实现任意复杂零件定制的特性, 已被广泛应用于电子^[1]、能源设备^[2]、医药^[3]、生物技术^[4]领域, 在汽车^[5]、船舶、关乎国防安全和民生的航空航天^[6]等领域也有重要作用。根据美国材料与试验学会(ASTM)标准, 现有的 3D 打印技术可以分为七大类, 包括光聚合(VP)、材料挤压(ME)、材料喷射

(MJ)、黏结剂喷射(BJ)、粉末床熔化(PBF)、直接能量沉积(DED)和薄板层压(SL)。尽管这些方法的工艺和材料多样, 但均采用 2.5 轴的配置, 利用分层叠加的方式将 CAD 模型转换为一组相对较薄的层。这种分层过程被称为“切片”, 其决定每一层如何在前一层上构建成型。虽然切片算法的输入(3D 模型)和输出(2D 切片)对于上述所有方法通常是相同的, 但不同的 3D 打印技术出于不同的考虑和限制, 定义了各自切片算法的规范^[7]。3D 打印预处理的一般流程如图 1 所示, 其以 3D 模型作为输入, 最终生成 G 代码用于实际打印过程。

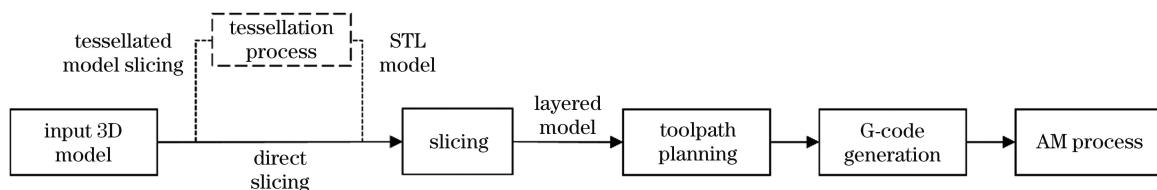


图 1 3D 打印预处理的一般流程

Fig. 1 A general workflow of 3D printing preprocessing

这种 2.5 轴配置的方式在制造过程中会存在阶梯效应^[8-9]以及需要支撑结构^[10]的问题, 这不仅增加了总体的打印时间和材料成本, 并且降低了打印材料表面的粗糙度^[11]。因此, 研究人员试图通过各种手段来克服 2.5 轴打印的缺点, 例如自适应选择主要构建方向^[12-13]、通过模型变形减少支撑结构^[14]、寻找更高效的

支撑^[15-17]和支撑去除方式^[18]、优化相邻层之间的层厚^[19]等。然而, 由于 2.5 轴配置的限制性, 这两个问题无法根除。值得庆幸的是, 采用多轴的方式能够解决(至少在理论上是如此)传统 2.5 轴所需支撑结构的问题。

目前, 与多轴 3D 打印技术相关的论文数量呈逐年上升趋势(图 2), 越来越多的研究人员开始关注多

收稿日期: 2021-12-22; 修回日期: 2022-01-21; 录用日期: 2022-02-10

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFE0203500)、中央引导地方科技发展资金专项(桂科 ZY21195029)、广西研究生教育创新计划项目(JGY2021001)

通信作者: *longyu@gxu.edu.cn

轴工艺规划的研究^[20]。最近已经提出了与多轴 3D 打印技术相关或相似的评论,如:Jiang 等^[20-22]综述了多自由度机器人辅助增材制造的研究进展;Xu 等^[23]和 Lehmann 等^[24]回顾了直接能量沉积(DED)技术的切片方法;Zhao 等^[25]对形状和性能控制下的切片和路径规划研究进行评论;Nayyeri 等^[26]回顾了熔融沉积成型(FDM)技术的平面和非平面切片算法。但是,无支撑制造作为多轴工艺规划的研究热点之一,目前还未有对其算法的全面总结。因此,本文回顾了近年来研究人员为实现复杂结构的无支撑制造所做的工作:首先,回顾多轴无支撑制造的工艺规划方法;其次,讨论多轴无支撑制造面临的问题和挑战;最后,对多轴无支撑工艺规划的未来发展方向进行探讨。需要指出的是,本文讨论的范围主要为从属于 DED 的激光直接能量成型(LDMD)、从属于 ME 的 FDM 和从属于电弧送丝增材制造(WAAM)技术的多轴无支撑工艺规划方法。

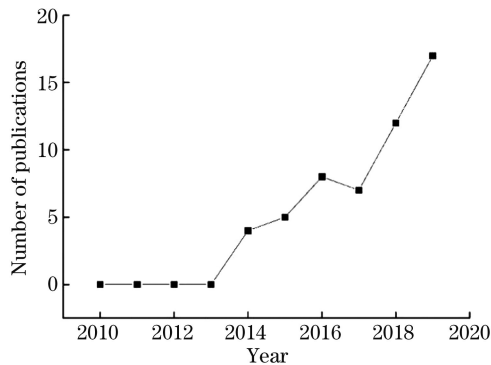


图 2 多轴 3D 打印论文出版数量^[20]

Fig. 2 Number of publications on multiaxis 3D printing^[20]

2 多轴无支撑工艺规划方法

在传统的 2.5 轴沉积过程中,工艺规划包括模型切片和路径规划两个核心步骤,二者保持相对独立。由于路径规划方式对沉积质量具有重要影响,因此传统 2.5 轴沉积过程更侧重于路径的优化^[27-28]。而在多轴无支撑工艺规划中,切片方法对是否满足无支撑制造要求具有决定性作用,因此更侧重于切片方法研究。随着多轴无支撑工艺规划的发展,切片和路径规划不再保持相对独立,二者表现出强烈的耦合关系。因此,本节在讨论多轴无支撑工艺规划方法时,并未将切片和路径规划独立叙述,这一点不同于文献^[22]。本文综合考虑不同方法首次出现的时间和所处理模型的难易程度,将现有的多轴无支撑工艺规划方法分为以下几类:基于悬垂结构分解、基于骨架化、基于约束优化、基于曲面层分解和基于内/外体积分割的方法。

2.1 基于悬垂结构分解的方法

早在 2001 年,密歇根大学的 Singh 等^[29]就指出了多轴无支撑打印的几个关键任务:1)零件的体积分解;2)打印方向和沉积头方向的选择;3)子体积的沉积顺序决策;4)切片和路径规划方法。其提出的 5 轴切片方法

被称为多方向切片(MDS)方法。在选择构建方向后,沿构建方向识别和分解悬垂特征(在文献中通常称为“不可构建体积”或“子体积”),确定每个子体积的构建方向,沿构建方向对子体积进行排序以满足无碰撞要求,随后进行切片和路径生成。这种方法的核心在于区分核心部分与悬垂特征,在此之后的大多数方法均沿用了这一思路。

Zhang 等^[30]基于 LDMD 工艺提出了一种非均匀切片方法,如图 3 所示。其切割平面是基于一个或多个切片层生成,切片方向仅由切片的外边界决定。该方法只能处理不含空腔和凹陷特征的零件,且会带来较大的制造误差。Ren 等^[31]针对非均匀切片算法导致的精度问题,在对零件进行非均匀切片后,将每个切片层称为“单元层”,对每个“单元层”采用平面切片再次分割,通过控制“单元层”切片层厚度的方法来减少误差,如图 4 所示。

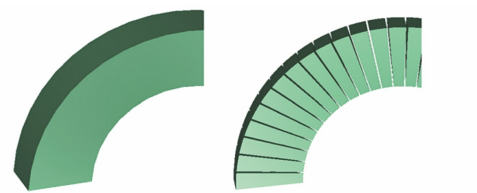


图 3 非均匀切片法^[30]

Fig. 3 Non-uniform slicing method^[30]

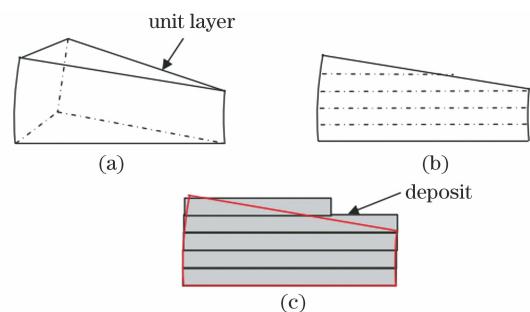


图 4 单元层切片法^[31]。(a)单元层 ;(b)切片结果 ;(c)沉积后的“单元层”

Fig. 4 Unit layer slicing method^[31]. (a) Unit layer; (b) result of slicing; (c) unit layer after deposition

Singh 等^[32]提出了偏移切片的概念来处理悬垂特征,该方法将零件分为可构建体积和不可构建体积,不可构建体积是通过基面的偏移实现的。此外,为避免偏移曲线的尖点和自相交问题,采用 Voronoi 图来计算偏移量,但这种方法无法处理含有孔洞和突出的零件,如图 5 所示。

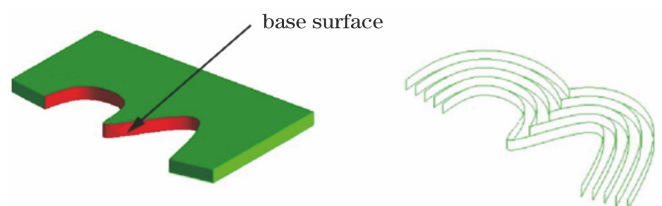


图 5 偏移切片法^[32]。(a)轮廓基面 ;(b)由基面获得的偏移切片

Fig. 5 Offset slicing method^[32]. (a) Base surface of contour; (b) offset slices obtained from base surface

Lee 和 Jee^[33] 提出一种基于几何拓扑的构建区域与不可构建区域的分解方法,并将其用于 LDMD 工艺,该方法分为以下几个步骤:1)识别沿 z 轴方向的单一几何形状,如悬垂或过切特征;2)对含有悬垂或过

切特征的体积进行分解,以去除“不可构建”的体积;3)沿各个子体积的轴线方向进行切片;4)通过 4 轴控制(倾斜)和 5 轴控制(倾斜和旋转)来制造所需零件,如图 6 所示。

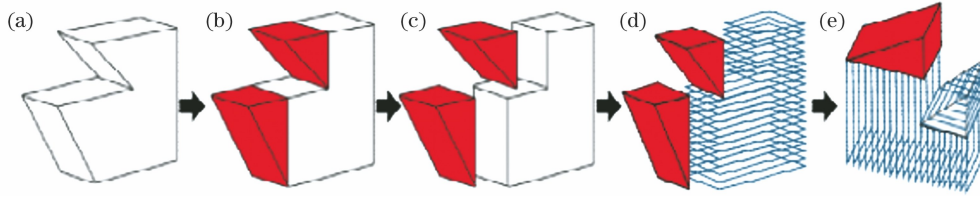


图 6 Lee 和 Jee 所提方法的说明^[33]。(a)STL 模型;(b)悬垂/过切识别;(c)悬垂/过切体积分解;(d)(e)多方向切片
Fig. 6 An illustration of method proposed by Lee and Jee^[33]. (a) STL model; (b) overhang/overcutting identification; (c) overhang/overcutting volume decomposition; (d)(e) slicing in multiple directions

Ding 等^[34] 提出一种基于分解-重组的多方向切片方法,如图 7 所示。首先,使用简单的基于曲率的体积分解方法将模型分解为子体积。随后,引入基于拓扑信息的深度树结构对分解后的子体积进行重组。值得

注意的是,由于在分解前对模型进行了简化(填充了内部孔洞和突出),基于分解-重组的多方向切片方法弥补了 Singh 等^[32] 提出的偏移切片方法无法处理带孔或突出特征的不足,但会增加一些不必要的后处理步骤。

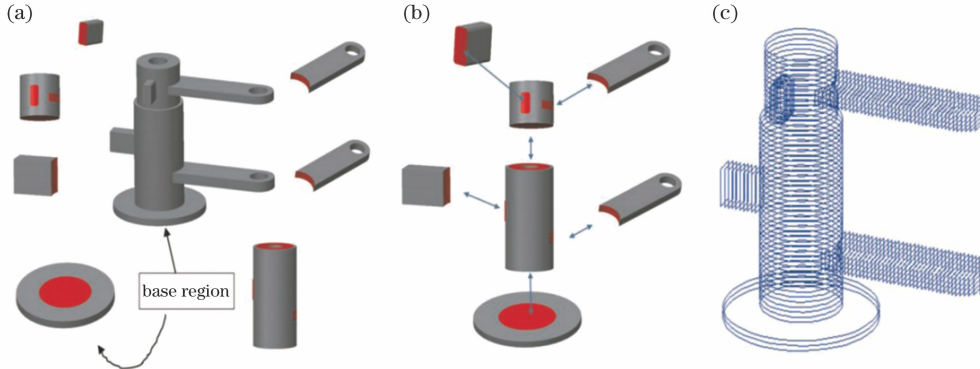


图 7 分解-重组方法说明^[34]。(a)子体积、特征区域(红色)和基本区域;(b)子体积重组;(c)多方向切片
Fig. 7 Illustration of decomposition-regrouping method^[34]. (a) Sub-volumes, feature regions (red), and base region; (b) grouped sub-volumes; (c) slicing in multiple directions

Ding 等^[35] 将一个 6 轴机器人和额外的两个倾斜旋转定位系统相结合,形成 6+2 轴的多轴打印系统。该系统主要用于复杂旋转部件(如螺旋桨和叶桨)的无支撑打印。首先,将零件分解为悬垂结构和核心部分。随后,使用 2.5 轴沉积方法制造核心部分,将悬垂结构通过圆柱坐标变换映射到平面基底后,利用 8 轴制造系统进行悬垂结构制造,如图 8 所示。

为解决具有弯曲特征零件的无支撑制造问题,Zhao 等^[36] 提出一种基于坐标变换的非平面切片方法,该方法结合了 Singh 等^[32] 的偏移切片方法和 Ding 等^[35] 的圆柱坐标切片方法的优势,分为 4 个基本步骤:1)对具有凹环特征的体积进行分解;2)利用在体积分解过程中得到的原始曲面进行偏移,生成一组曲面;3)对生成的曲面与原始体积进行布尔运算,得到待加工的曲面层切片;4)采用圆柱坐标系将获得的曲面层切片变换至平面内,随后采用平面路径填充,将得到的填充路径逆变换至原始曲面中,获得曲面层路径,如图 9 所示。该方法采用坐标变换的方式,理论上能够实现无支撑制造,但对于大型弯曲特征零件需要曲面基板辅助制造。

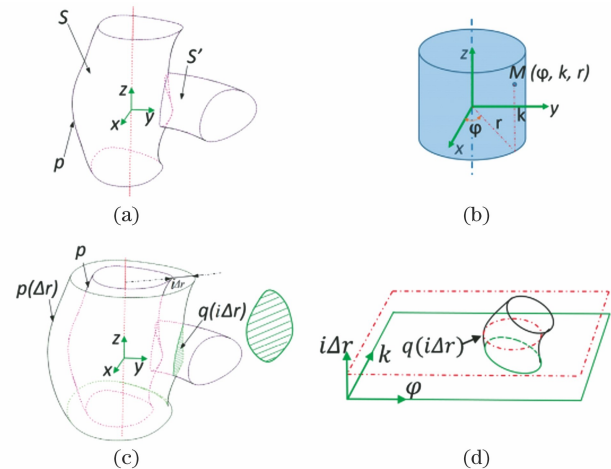


图 8 圆柱坐标切片法^[35]。(a)旋转类零件;(b)圆柱坐标系;(c)悬垂特征切片后的相交轮廓;(d)映射到笛卡儿坐标系下的悬垂特征
Fig. 8 Cylindrical coordinate slicing method^[35]. (a) Revolving part; (b) cylindrical coordinate; (c) intersection contour of slice with overhang structure; (d) mapped overhanging structure at Cartesian coordinate

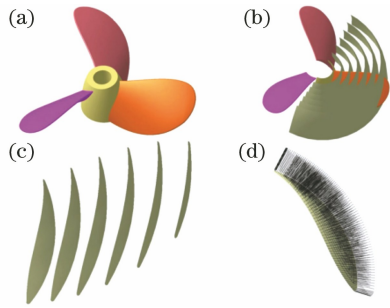


图 9 Zhao 等^[36]提出的非平面切片方法。(a)已分解的体积；(b)偏移曲面；(c)修剪后的曲面；(d)5轴工具路径

Fig. 9 Nonplanar slicing method proposed by Zhao et al^[36].

(a) Decomposed volumes; (b) offset surfaces; (c) trimmed surfaces; (d) five-axis toolpaths

可以看出,上述方法只能处理悬垂特征为尖锐凹边或凹环特征的零件,这些特征与核心体积的分离较为方便,即分为“可构建体积”和“不可构建体积”,但无法有效处理更难分解的如具有非锐边特征的零件。

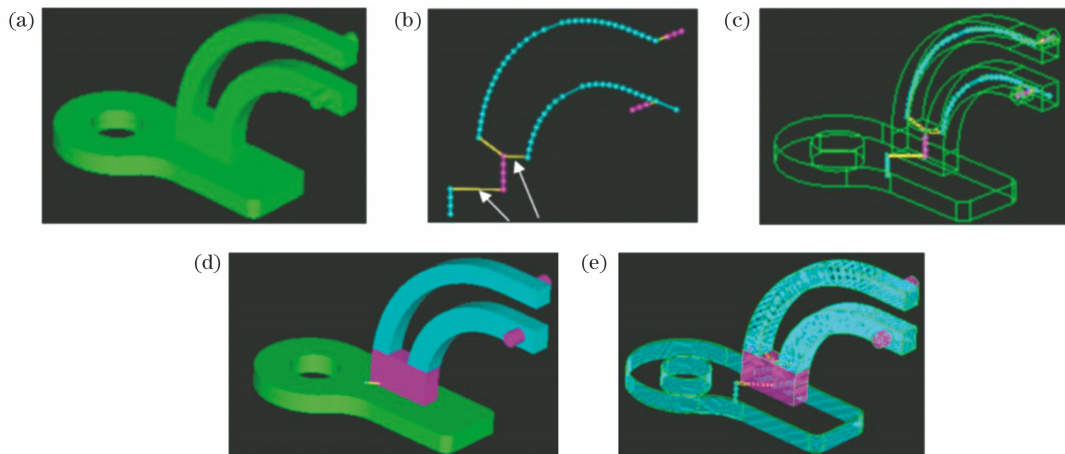


图 10 基于质心轴的非均匀切片方法^[37]。(a)实体模型；(b)质心轴；(c)质心轴与实体模型；(d)分解结果；(e)切片结果
Fig. 10 Non-uniform slicing method based on centroidal axis^[37]. (a) Solid model; (b) centroidal axis and solid model; (d) decomposed result; (e) slicing result

2019年,Wang等^[38]针对具有圆形通孔和外部带有T型槽的弧形规则弯管,提出了一种5轴动态切片方法。首先,将STL模型文件转换为点云文件;其次,采用平均曲率流(MCF)算法提取骨架,对所提取的骨架通过B样条曲线进行拟合;最后,在满足最大层厚的要求下沿骨架方向执行动态切片,该过程是基于空间位置变换矩阵来动态变换悬垂结构模型的空间位置以及当前切片与中心曲线的交点实现的。2020年,Hu等^[39]将文献[38]方法应用到多分支结构中。先通过K均值聚类方法对多分支结构进行聚类,获得粗分解结果;再在碰撞约束条件下,采用局部动态搜索方法进行调整,获得精细的平面分解结果,并对分解后的子模型执行5轴动态切片。同年,Wang等^[40]提出一种更通用的切片方法,其结合了平面切片和平面自适应切片,可应用到更复杂的多分支结构的无支撑制造中。该方法分为3个主要步骤:

1)骨架化。通过MCF算法对输入模型 γ 进行骨

2.2 基于骨架化的方法

为了进一步提高复杂几何零件的处理能力,研究人员试图遵循零件的内在特征,从输入模型的几何信息中获得形态学骨架或者质心轴。利用骨架或者质心轴的引导,将模型分割为无需支撑的子体积并切片,能够有效地处理管状结构和多分支结构的无支撑打印。

早在2010年,Ren等^[37]就提出了一种基于质心轴的非均匀切片方法。通过提取模型质心轴,利用质心轴将模型分解为子体积并建立子体积之间的拓扑关系。对子体积进行排序以获得无碰撞的打印顺序,采用均匀或非均匀切片的方式对每个子体积进行切片和路径生成,如图10所示。但是,该方法在LDMD的应用上遇到了自适应层高变化的困难,通常需要铣削工艺来辅助制造,因此并未得到广泛应用。最近,在FDM工艺中,通过改变送丝速度将层厚控制在合理范围内,为基于骨架和质心轴的方法的实际应用奠定了基础。

架化,获得一维骨架 S^1 ,同时可以获得分支数 C (如Y形状的分支数 $C=3$,如图11(b)所示),该过程将被重复多次直至每个子模型的分支数减少到1。

2)基于骨架的分支检测和分割。获得骨架后,通过形状直径函数(SDF)为模型每个面 f 计算形状直径分布,通过SDF来检测分支,建立被检测特征与骨架之间的联系。采用空间扫描方法(SSM)沿骨架寻找风险区域(图11(d)),根据最大原则从骨架所有可能的扫描平面中确定最佳分割平面,随后分支特征 B^* 将被裁剪并沿 B^* 骨架进行打印。

3)重新骨架化。分割后的剩余主干特征 A^* 具有原始的骨架(大于等于一条骨架),因此对其进行重新骨架化,如图11(f)所示。表面模型最终被分割为几个可实现无支撑制造的部件,其中C、E和G由沿固定方向制造方法得到,D和F采用5轴动态切片方法沿骨架方向制造得到。

综上,骨架化的方法更适合于多分支结构或树状

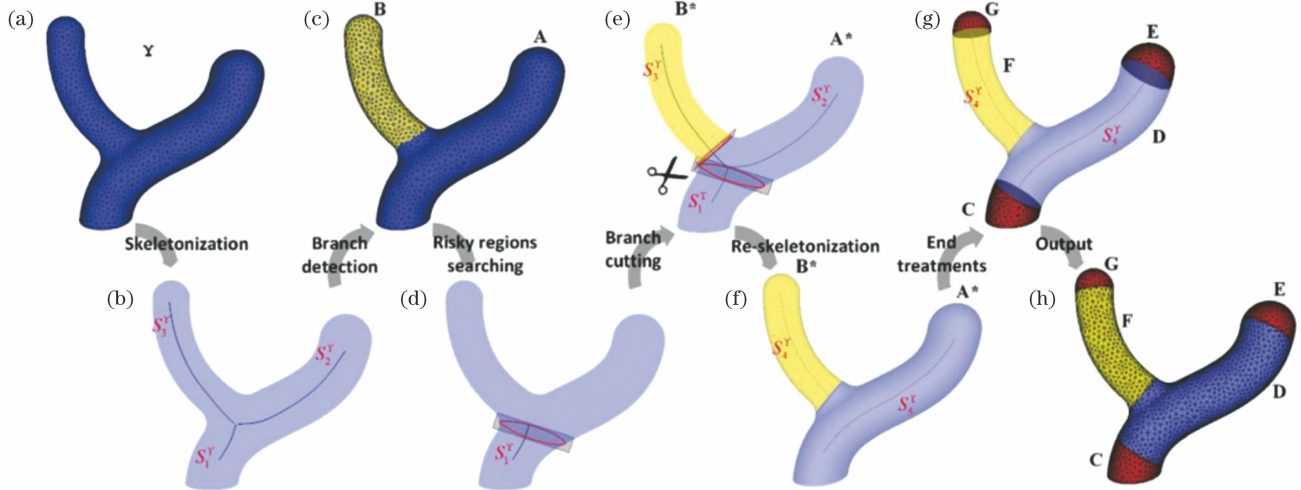


图 11 Wang 等^[40]所提方法的介绍。(a)输入 Y 型模型;(b)提取的 3 个骨架 S_1^r 、 S_2^r 和 S_3^r ;(c)通过评估形状直径,基于图 11(b)骨架的粗分割结果;(d)在可变打印方向上寻找危险面;(e)使用分割平面将模型分为两个可打印部分 A^* 和 B^* ;(f)骨架 S_1^r 作为 S_3^r 的一部分,在平面裁剪后保留 B^* ,从主干模型 A^* 中重新提取骨架 S_5^r ;(g)采用固定方向打印 C、E 和 G;(h)最终的分解结果

Fig. 11 Illustration of method proposed by Wang et al^[40]. (a) Input Y shape model; (b) three extracted skeletal polylines of S_1^r , S_2^r , and S_3^r ; (c) coarse segmentation result based on skeletons from Fig. 11(b) by evaluating shape diameter; (d) find the risky facets of model surface under a variable printing direction; (e) partition the model into two printable parts A^* and B^* with a partition plane; (f) skeleton S_1^r , as part of S_3^r , is reserved B^* after plane clipping, and a single skeleton S_5^r is re-extracted from trunk model A^* ; (g) C, E, and G printed in fixed directions; (h) final decomposition result

结构的无支撑打印,5 轴动态切片更适合于具有弯曲特征(如管状、螺旋状等)的零件。然而,骨架化方法依赖于可变厚度的沉积,目前 FDM 工艺中合理的层高变化很有限,且控制上大多采用开环控制,沉积质量并不十分理想,通过反馈控制有利于进一步解决该问题。此外,骨架易受局部区域的干扰,生成的骨架与理想骨架存在一定差异。现有的骨架生成方法诸如平均曲率流骨架和拉普拉斯骨架并不是描述模型拓扑结构的最优方法,各种曲线骨架的性能均值得进一步研究。值得注意的是,模型的骨架已经不局限于作为多分支结构或树状结构的切片引导,在基于约束优化、基于曲面层分解的方法中均开始利用骨架辅助模型分解和确定打印次序。

2.3 基于约束优化的方法

2.1 节所述的基于悬垂结构分解的方法只能处理悬垂特征为尖锐凹边或凹环特征的零件,2.2 节所述的基于骨架化的模型分解方法虽然能够有效处理多分支结构,但无法处理无明显骨架特性(一个极端的例子是球)的模型。因此,仅仅依赖于模型的几何特征来分解是不够的。

Wu 等^[41]引入一种先进的模型分解方法,该方法被认为是从骨架化方法到约束优化方法的重要过渡,可有效分解更难分解的模型(如非锐边模型)。文献[41]方法包括 3 个主要步骤:

1) 模型粗分割。基于 MCF 算法生成骨架,如图 12(b)所示;采用 SDF 评估模型边界与骨架之间的

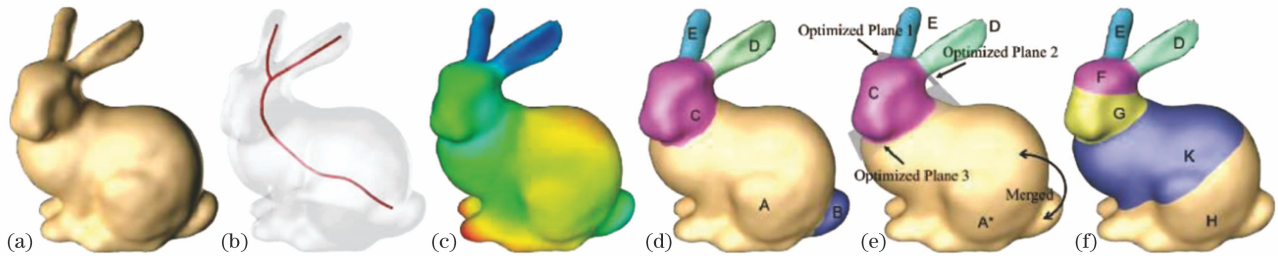


图 12 Wu 等^[41]提出的模型分解方法。(a)输入 3D 模型;(b)提取的骨架;(c)形状直径分布;(d)初始分解和打印顺序结果;(e)合并(B+A)后的结果;(f)精细分解后的最终结果(满足可制造性要求)

Fig. 12 Model decomposition method proposed by Wu et al^[41]. (a) Input 3D model; (b) extracted skeleton; (c) distribution of shape diameter metric; (d) initial decomposition and print order results; (e) result after merging (B+A); (f) final result after fine decomposition (meet manufacturability requirements)

距离,如图 12(c)所示;根据 SDF 的显著差异对模型进行粗分割,如图 12(d)所示。

2)确定初步打印顺序。由模型骨架和 SDF 建立模型各个子体积的拓扑关系,并用无向图表示(根节点由用户交互产生)。得到初步打印顺序后,根据不同子体积的平面来确定打印方向。在本案例中,得到的顺序为 A→B→C→D→E,如图 12(d)所示。

3)受限微调。针对步骤 2)中确定分割平面可能产生碰撞等问题,对分割平面做了一定约束,在该约束条件下,应用平面扰动、区域合并、精细分解和最大分割平面的方法来获得最终打印平面。在本案例中,B 由于不满足平台制造约束条件,故将 A 和 B 合并为 A* ;A* 由于不满足无支撑约束条件,被分解为 H 和 K,如图 12(f)所示。

文献[41]方法利用骨架化后的初步结果,在满足无支撑、无碰撞约束条件下进行微调,能够处理更为复杂的模型。此外,研究人员开始尝试在局部或全局范围内通过建立目标优化函数对模型进行分割,该类方法可有效处理具有非锐边的模型。

在文献[41]方法中,不允许在待打印对象内发生切割平面相交的情况,这一标准虽然可以很好地防止碰撞,但却过于严格,导致某些模型(例如带有向下分支的树结构)无法获得无支撑打印的解决方案。Gao 等^[42]在一定程度上降低模型与平台或已打印模型的碰撞标准,发现当打印优先级较高的零件位于后续零件的基平面下方时,可以避免碰撞。该方法可允许悬垂角度放松至 60°,但增加了安全距离的限制。Gao 等^[42]提出一种基于全局优化的启发式方法,将模型分解为几个部分,同时获得满足无碰撞要求的打印优先级序列。与 Wu 等^[41]算法相比,文献[42]方法需要分解的子部件数量较少,在多数情况下可以实现无支撑打印,其他情况可以使用几个支撑点来完成打印过程。Wu 等^[43]利用文献[42]所提无碰撞标准来改进他们之前的工作,其核心是最小化悬垂区域面积的分解算法。


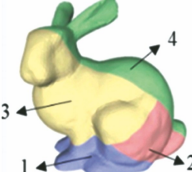
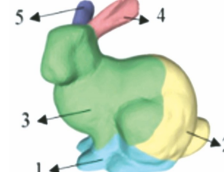


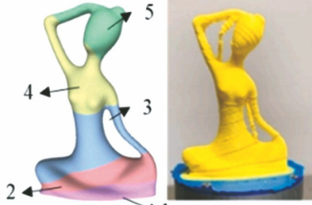
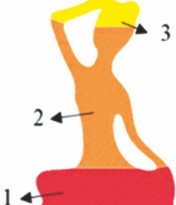
利用具有制造约束的集束搜索方法确定最优的体积分解结果,该分解由一系列分割平面表示。对于无法满足无支撑要求的部分,Wu 等^[43]提出了“投影支撑”的新结构,能够确保在无碰撞条件下制造剩余悬垂区域。

与上述几种方法不同的是,Liu 等^[44]利用重力效应下的滴落原理区分核心与悬垂区域。通过最大化工件和打印基板之间的接触面积、最小化子部件数量、最小化打印空行程,将模型分解与打印序列决策问题转换为约束优化问题,最终将模型分解为几个子部分,每个子部分均可以沿其基面的法线方向打印成型。不过,该方法处理的模型更倾向于具有尖锐凹边或凹环的零件。Xu 等^[45]注意到可制造方向和模型表面法线方向之间存在对偶关系,利用该性质在高斯球内搜索无支撑制造方向,当这个方向不存在时,采用主成分分析(PCA)法寻找具有最小支撑的制造方向。通过向下泛洪算法对模型进行表面分割,应用前向网格推进(AFMG)算法填充孔洞。利用向下泛洪算法的优势容易获得打印次序,但可能不满足无碰撞条件,因此需要人工干预,对不满足碰撞条件的区域进行合并。此外,该方法只能处理树状结构的零件,对于具有孔或环的零件则无法有效分解。

尽管采用单一平面将模型分割与打印顺序决策问题转换为约束优化问题进行求解,已经能获得较好的分解结果,但在少数情况下仍然需要支撑结构,并且需要一定的人工干预。为进一步提高工艺规划的自动化程度,Xiao 等^[46]采用单一或一组平面来分割模型,并结合了 Liu 等^[44]和 Wu 等^[43]方法的优势。在可制造性约束条件下,侧重于以下几个标准:1)始终搜索在可制造性条件限制下的可制造区域内的最大体积;2)分解后的体积可以有多个切片方向或构建方向;3)在制造方向上不应该有先前制造的体积,以防止局部碰撞。整个分解过程不需要人工干预即可完成。表 1 总结了上述几种方法的分解结果,表 2 则对上述几种方法的特点进行对比。

表 1 基于约束优化的方法分解结果对比^[46]

Table 1 Comparison of decomposition results based on constrained optimization methods^[46]

Original input model	Decomposed result by Wu et al ^[41]	Decomposed result by Xu et al ^[45]	Decomposed result by Xiao et al ^[46]
			
		Cannot be processed	


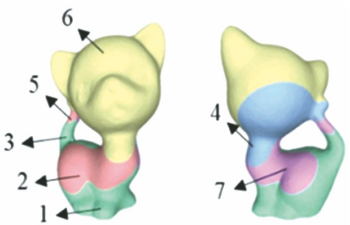
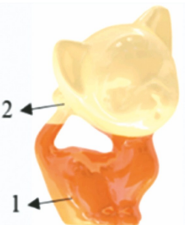
Original input model	Decomposed result by Wu et al ^[41]	Decomposed result by Xu et al ^[45]	Decomposed result by Xiao et al ^[46]
		Cannot be processed	

表 2 基于约束优化的方法特点对比

Table 2 Comparison of characteristics of constraint-based optimization methods

Ref.	Year	Category	Suitable type of models	Decomposing with planes or surfaces	Limitation	Platform type	DOF	
							Dep. head	Build plate
[41]	2017	Shape-analysis-based decomposition, constrained fine tuning	Multi-branched structure; volumes with non-shape edges	Planes	Root node of print sequence needs to be manually intervention	6-DOF robotic arm	0	3 trans., 3 orient.
[42]	2019	Constrained optimization, heuristic search (ant colony algorithm)	Volumes with non-shape edges; ring-like models (compared with results of Ref. [41])	Planes	Number of cutting planes need to be manually intervention; not efficient	5-axis CNC machine	3 trans.	2 orient.
[44]	2019	Constrained optimization, gravity-effect partition	Overhanging features with sharp concave edges or concave loops	Planes	Several type of workpieces like hollow cubic cannot be partitioned	5-axis CNC machine	3 trans.	2 orient.
[45]	2019	Constrained optimization, downward flooding search	Tree structure	Planes	Sub-volumes which may interference with printing nozzle should be merged manually	3-axis (tested their method by assembly parts)	-	-
[43]	2020	Constrained optimization, beam-guided search	Volumes with non-shape edges (compared with results of Ref. [45])	Planes	Rotational axis should be chosen carefully	6-DOF robotic arm	0	3 trans., 3 orient.
[46]	2020	Constrained optimization	Overhanging features with sharp concave edges or concave loops; ring-like models; volumes with non-shape edges	Planes/surfaces	Rotational axis should be chosen carefully	3-axis (tested their method by assembly parts)	-	-

可以发现,基于约束优化的模型分解方法通常有以下特点:1)通常以无支撑、无碰撞为约束条件,用于3+2轴的打印过程;2)通常是可以连续制造的,即分解后的每一个体积均与基板相连,以防止“悬空”体积的产生;3)通常为简化运算过程和降低求解复杂度,采

用单一平面切割,导致在某些情况下仍然需要支撑结构;4)模型分解后的体积通常只能有一个构建方向,这种约束会产生不必要的分解;5)通常需要在三维空间中搜索切割平面,算法相对耗时,还需要指定初始平面和方向,且最终分解结果与初始方向密切相关。

基于约束优化的方法已经能够有效处理具有尖锐凹边或者凹环的零件,但效率通常较低。尽管 Wu 等^[47]为其先前的集束搜索算法开发了一个学习框架,该框架可以通过使用较少数量的原始集束宽度来加速集束搜索过程,可以实现大约 3 倍的速度提升,但这一提升效果并不理想。因此,选择更高效的优化算法或学习框架可进一步提高该类方法的实际应用价值。目前基于约束优化的方法在分割模型后大多采用传统的平面切片方法,通过与自适应切片方法结合,有望进一步提高表面质量。最重要的是,该类方法很少被应用到金属无支撑制造中,可归结为采用约束优化方法面临接合面强度不高,导致力学性能较差,需要进一步解决相邻沉积部分结合中存在的问题。

2.4 基于曲面层分解的方法

尽管前述几类方法在较低的硬件设备条件下实现了无支撑制造,但基于平面层的约束为更复杂的零件制造施加了限制。为此,在另外一条研究路线上,为充分利用多自由度的优势,即采用多轴联动的方式,尝试了一些新的方法,包括用于薄壁零件的弯曲层切片方法,但该类方法主要研究表面质量改善。而基于曲面层分解的方法则为复杂结构的无支撑制造注入了新活力。

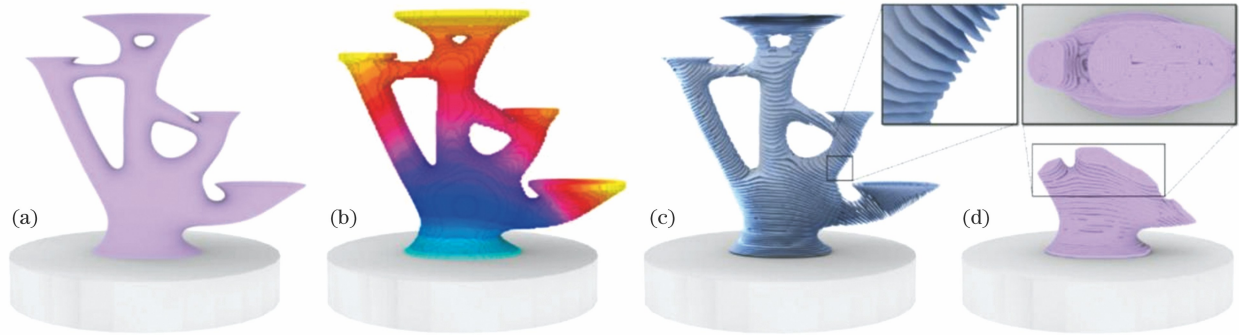


图 13 Dai 等^[48]提出的体积分解方法。(a)输入 3D 模型;(b)体素化和体素累积序列;(c)基于图 13(b)生成曲面层;(d)计算出的路径细节描述图

Fig. 13 Volume decomposition algorithm proposed by Dai et al^[48]. (a) Input 3D model; (b) voxel discretization and accumulative voxel sequence; (c) generating curved layers based on Fig. 13(b); (d) a detailed view on a computed toolpath

Dai 等^[48]在喷嘴固定而基板 6 轴联动的机器人 AM 平台上验证了该方法可行性,同时指出该方法的局限性包括:1)由体素化带来的离散化误差,导致相邻层厚不一致,需要通过控制材料进给速度进行补偿;2)在沉积薄壁零件时沉积质量并不可靠;3)费马螺旋路径可能存在间隙。尽管如此,这种曲面+曲面路径规划的方式极大地扩展了多轴打印的思路,为更复杂模型的无支撑打印指明了方向。张帆等^[50]也采用了类似的方法,但不同的是,其采用 Fast Marching 网格测地线算法来生成曲面空间的连续等距螺旋偏置路径。

鉴于采用体素表示带来的计算负担和离散化误差,Xu 等^[51]提出一种无需第三方数据的多轴工艺规划方法,其基于形状的一个重要内在性质——测地线距离。该方法分为以下几个步骤:1)在模型边界 $\partial\Omega$ 上

Dai 等^[48]从弯曲层切片方法中获得灵感,采用降维策略将给定模型分解为可制造的有效曲面层序列(从三维到二维),并通过曲面层生成有效曲面层路径(从二维到一维)。而在此之前,未有在零件体积内生成曲线路径的应用。该方法分为以下 4 个基本步骤:

1)模型体素化。由于将模型的体积分解视为全局搜索问题,故将输入模型离散化为体素网格,以便于构造、存储和处理。随后,可以将 AM 过程中材料的累加过程转变为体素的累加过程。

2)计算累积场 $G(x)$ 。在可制造性条件下,对体素进行排序以生成体素累积序列,包括采用凸面图的贪婪算法来确保工作面的可达性;采用体素阴影的概念,避免从当前层进入下一层,从而产生不可访问区域;采用基于逆剥离的启发式方法来控制生长,更大程度地降低阴影区域的生成概率。

3)计算每层工作面。体素的离散化导致几何形状严重混叠,因此从 $G(x)$ 中提取等位面 S 作为每层工作面,随后进一步修剪以获得精确边界。

4)计算曲面层路径。在满足路径连续性、方向连续性和姿态连续性要求的情况下,利用基于费马螺旋线的方法^[49]生成曲面层的路径,如图 13 所示。

生成一组等值线轮廓;2)将由该场产生的等值线轮廓平滑,采用结合 Delaunay 和先进网格生成算法^[52]的三角剖分算法进行网格填充,并将谐波映射回三维空间,对原始三维轮廓进行插值,从而产生曲面层;3)在生成曲面层后,利用 MMP 方法构造关于边界轮廓的测地线距离场,生成轮廓平行路径,同时采用高斯半球插值的方法进行平滑,最后通过逐层累加即可完成打印,如图 14 所示。

利用这种基于映射的方法生成的曲面层可能会产生局部干扰,尤其在模型剖面曲率变化大的区域更容易发生。为了进一步解决采用体素化带来的计算负担以及曲面层相交的问题,Li 等^[53]提出了在四面体网格上生成测地距离场的新方法。与 Xu 等^[51]的方法不同的是,该方法并非使用零件表面的测地距离作为曲面

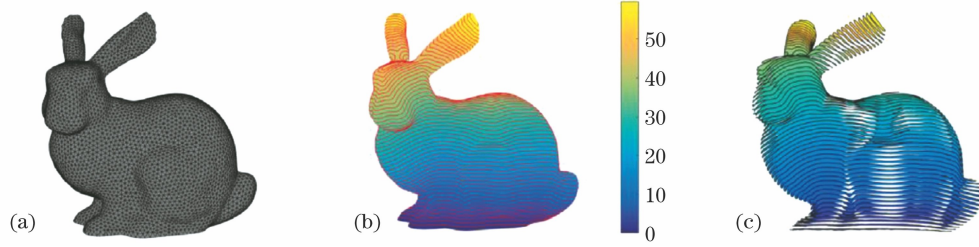


图 14 Xu 等^[51]提出的体积分解方法。(a)原始网格模型;(b)生成的等测地线轮廓;(c)重建后的无相交表面层
Fig. 14 Volume decomposition algorithm proposed by Xu et al^[51]. (a) Original mesh model; (b) generated iso-geodesic contours; (c) reconstructed surface layers with no intersection

层的边界轮廓,而是利用热法^[54]直接计算零件三维体积内的测地距离场,从而提供一个更自然的体积分解过程。不过,由于简化了曲面层的获取过程(利用插值方法在测地距离场中提取等值面 IGDS),利用文献^[53]方法所获得的曲面层不一定是凸的,在面对具有环状结构的零件时,可能存在碰撞问题。有两种潜在方法可以缓解和消除碰撞:通过使用一个细长的喷嘴或通过适当调整测地线距离场,使来自不同分支的测地线在合并时对齐,从而使相应的等值面更加平滑。Fang 等^[55]提出一种基于应力场的优化框架,通过对获得的矢量场进行逐步微调来满足无碰撞的要求(图 15)。该优化框架主要由以下两部分组成:

1)生成强度感知层的优化场。通过 Abaqus 应力

分析来获得给定模型 H 的标量场 $G(x)$,并将其存储在四面体网格中。在建立标量场的约束优化函数 $\nabla(x)$ 时的约束条件有:各向异性强度、层厚和梯度谐波。考虑到最小化加权目标是一个非线性优化问题,引入一个矢量场 $\mathbf{V}(x)$ 作为近似 $\nabla(x)$ 的中间体。随后,通过最小化 $\nabla(x)$ 和 $\mathbf{V}(x)$ 之间的差异来确定曲面层切片的标量场 $G(x)$ 。

2)可制造性约束下场的调整。综合考虑打印机的全局可访问性,对生成的矢量场进行调整。考虑到悬垂区域的制造问题,采用基于采样的方法检测支撑,计算四面体网格 T' 作为采样区域的包络线。对网格生成施加约束 $T \cap T = M$,其中 M 表示表面 T 的边界。利用这种性质,将 T 中的矢量场 $\mathbf{V}(x)$ 推断为

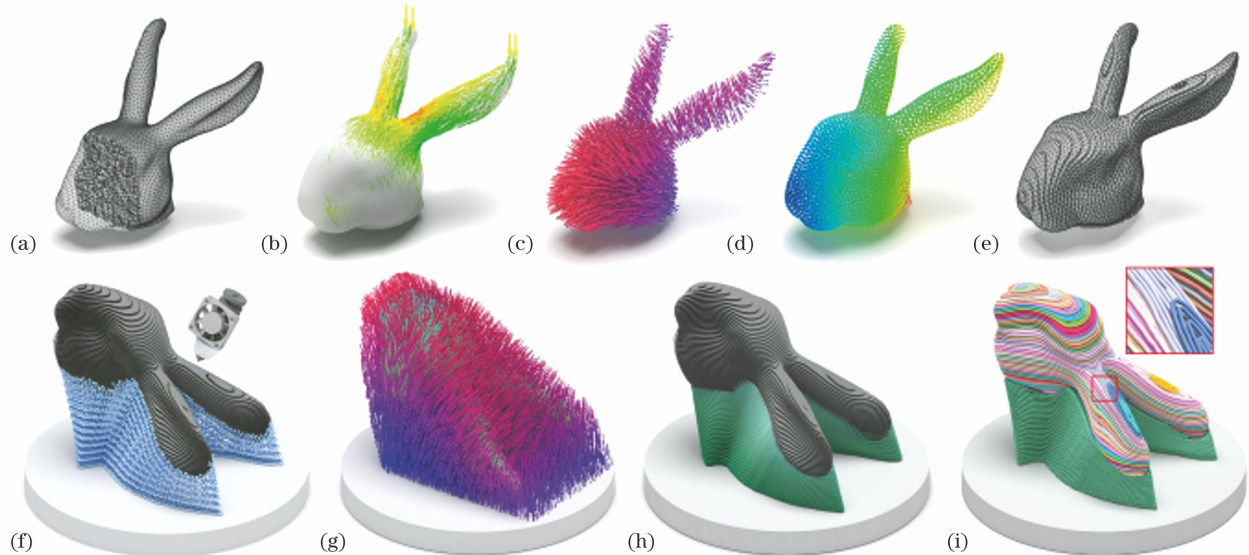


图 15 Fang 等^[55]提出的体积分解方法。(a)由四面体网格 T 表示的兔子头模型 H ;(b)用颜色表示的主应力值;(c)根据强化原理和制造约束条件对 $\mathbf{V}(x)$ 进行优化;(d)通过强制使 $\nabla G(x)$ 跟随 $\mathbf{V}(x)$ 获得标量场 $G(x)$;(e)通过从 $G(x)$ 中提取等值面初步生成的曲面层;(f)通过考虑可打印性和悬垂区域检测后的结果;(g)由矢量场 $\mathbf{V}(x)$ 推断的支撑结构的 $\mathbf{V}(x)$;(h)通过生长场提取用于 3D 打印的最终曲面层;(i)根据主应力生成的曲面层路径

Fig. 15 Volume decomposition algorithm proposed by Fang et al^[55]. (a) A bunny-head model H is represented by a tetrahedral mesh T ; (b) principal stresses with values are visualized by colors; (c) a vector-field $\mathbf{V}(x)$ is optimized according to the principle of reinforcement and the fabrication constraints; (d) a scalar-field $G(x)$ is obtained by enforcing $\nabla G(x)$ to follow $\mathbf{V}(x)$; (e) preliminary curved layers are generated by extracting the iso-surfaces from $G(x)$; (f) an orientation of fabrication is determined by considering the accessibility of printer head and regions with large overhangs are detected by a sampling based method; (g) a vector-field $\mathbf{V}(x)$ is extrapolating $\mathbf{V}(x)$ for supporting structure; (h) final curved layers are extracted from the governing fields for 3D printing; (i) toolpaths are generated for curved layers according to the principal stresses

$-V(x)$ 。采用厚度控制的切片策略,可以在曲面层上依据强化原理来生成优化后的曲面层路径。

为了提高切片的力学性能,Fang 等^[55]指出若采用类似 Dai 等^[48]提出的方法来确定材料累加序列,将极大改变路径的对齐方向,这会导致各向异性强度不能得到很好的控制,因此他们未采用无支撑制造的方式而是采用水溶性树脂作为支撑。若以无支撑为目标时,可以通过修改能量方程来控制矢量场,实现弱应力增强和无支撑打印,这将是该方法的一个发展方向。

在 Li 等^[53]提出的测地距离场的启发下,Shan 等^[56]将测地线距离方法推广到温度场。可以想象,将设计部件放在 3D 打印机的加热基板上,随着时间的推移,热量会扩散到部件的各个部分,由此获得的等值面则由具有相同温度的点组成。这种传热模型能够模拟打印部分的生长过程,打印材料会随着热流的方向即热梯度方向累加,这类似于 Dai 等^[48]提出的累积场。Shan 等^[56]在 COMSOL 软件中模拟传热,利用插值法获得等温表面,并通过热法获得曲面层路径。相比于 Li 等^[53]的方法,Shan 等^[56]提出的方法可以基于不同的设置如无碰撞、无支撑、提高表面质量等,通过

调整各种边界条件、材料特性和传热模型来满足不同的打印机配置。虽然现有的边界条件在改善表面质量方面很有效,但在碰撞和无支撑制造上仍然存在不足,许多研究人员试图通过进一步添加新的边界条件来克服上述不足。

实际上对于曲面层,只要是凹形的,就存在与喷嘴碰撞和局部嵌入的风险,尤其对喷嘴头尺寸较大的金属打印尤为明显。在上述方法中,除 Dai 等^[48]提出的方法外,其余方法均面临凹形曲面层的风险。Xie 等^[57]最近提出一种基于椭球面应用的曲面层分解算法。首先,基于平均曲率流算法提取模型骨架,将模型分解为 N 个子实体,每个实体将分配一个或多个上特征椭球层 CE^+ 和下特征椭球层 CE^- ,其中 CE^+ 代表子实体顶部, CE^- 代表子实体底部,如图 16(a) 所示。随后,对于子实体 M_i ,在 CE^+ 和 CE^- 之间生成一组中间椭球面,如图 16(b) 所示。椭球体具有凸性,成功地规避了喷嘴局部嵌入的问题。与 Dai 等^[48]方法相比,Xie 等^[57]提出的方法获得的表面精度更优。此外,在该方法中,网格和椭球体之间的交点是通过解析计算得到的,且切片方法支持给定模型的任何原始边界表示而无需转换为第三方数据,因此计算效率更高。

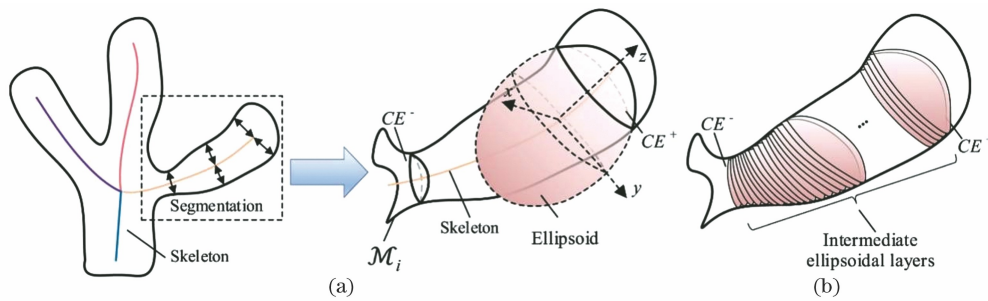


图 16 椭球切片示意图^[57]。(a)子实体的特征椭球体;(b)中间椭球生成

Fig. 16 Illustrate of ellipsoid based curved slicing^[57]. (a) A characteristic ellipsoid of a sub-entity; (b) intermediate ellipsoid generation

值得注意的是,上述所有基于曲面层分解的方法均基于优化预定义的目标,使用者无法直接控制路径配置。Mitropoulou 等^[58]则致力于促进由用户驱动的 FDM 打印的路径设计工作。通过基于形状的 Reeb 图,在启发式方法下为用户提供控制路径

定向目标的导向。这种启发式方法能使路径分布更加均匀,避免在分叉附近的鞍点出现孔,但该方法只适用于壳型结构,并不严格属于曲面层分解方法。表 3 所示为上述几种基于曲面层分解方法的对比总结。

表 3 基于曲面层分解的方法对比总结

Table 3 Summary and comparison of methods based on curved layer decomposition

Ref.	Year	Category					Limitation	Platform type	DOF	
		Generation method of initial curved layers	Generation method of curved toolpath	Classification of curved toolpath	Optimization method of orientation-smoothing	Suitable type of models			Dep. head	Build plate
[47]	2018	Growing field generated by determining an order of voxel accumulation	Generated by FWP-MMP method	Continuous fermal spiral tool-path	Low pass filtering sampling; quaternion interpolation	Volumes with non-shape edges	Discretization error; Not efficient; Lower surfaces quality	6-DOF robotic arm	0	3 trans., 3 orient.

Ref.	Year	Category					Limitation	Platform type	DOF	
		Generation method of initial curved layers	Generation method of curved toolpath	Classification of curved toolpath	Optimization method of orientation-smoothing	Suitable type of models			Dep. head	Build plate
[51]	2019	Scalar field computed based on MMP algorithm	Geodesic distance field computed based on MMP method	Contour-parallel path	5-point sampling with Gaussian hemisphere interpolation	Volumes with non-shape edges	Potential local interference; low productivity	6-DOF robotic arm	0	3 trans., 3 orient.
[53]	2020	Geodesic distance field based on heat method	Geodesic distance field based on heat method	Contour-parallel path	-	Multi-branched structure	Parts with complicated topologies may lead to collision	5-axis printing system	3 trans.	3 trans., 3 orient.
[55]	2020	Scalar-field according to stress analysis (based on Abaqus)	Scalar-field according to stress analysis (based on Abaqus)	Hybrid strategy (contour-parallel path and directional-parallel path)	-	Volumes with non-shape edges	Supports needed; low productivity	5-axis CNC machine	3 trans.	2 orient.
[56]	2021	Temperature field based on COMSOL	Based on heat method	Contour-parallel path	-	Overhanging features are sharp concave edges or concave loops	Potential local interference; not efficient	5-axis printing system	3 trans.	2 orient.
[57]	2022	Ellipsoidal slicing	Field based method	Contour-parallel path (iso-cusp height printing path)	-	Volumes with non-shape edges	Complex algorithms; global interference is not considered	5-axis printing system	3 trans.	3 trans., 3 orient.
[58]	2021	-	-	-	-	Thin-walled structure	Affected by human experience	6-DOF robotic arm	0	3 trans., 3 orient.

这种基于曲面层分解的方法通常有以下几个特点:1)通常拥有“场”的概念,如生长场、测地距离场、应力场等,以获得初始曲面层。2)曲面路径的生成过程亦采用“场”的概念,尽管可以获得较好的填充路径,但面临间隙问题;生成的相邻曲面层之间的距离并非定值,导致整体的控制难度增大。3)生成的表面质量不高,需要更通用的曲面层分解方法,在满足五支撑制造约束的同时有较好的表面质量。

2.5 基于内/外体积分解的方法

尽管基于曲面层分解的方法通过充分利用多自由度带来的优势实现了更复杂零件的无支撑打印,但整体的控制难度增大了。现有的基于曲面层分解的方法很难应用到金属部件上。基于内/外体积分解的方法可有效解决复杂金属部件的无支撑打印问题。

Kapil 等^[59]提出基于基板倾斜的 5 轴切片方法以消除支撑,对外轮廓采用 5 轴沉积,获得一个类似容器的沉积体,对内部则采用 2.5 轴沉积,如图 17 所示。在该方法中,未提及对外轮廓沉积参数的设置,而采用

等距切片时(切片间距为 h),外轮廓的沉积高度是变化的($h/\cos\theta$),如图 18 所示。若采用与平面沉积同样的沉积参数设置,可能会造成局部塌陷甚至无法成型。针对该问题,Flores 等^[60]对薄壁零件的切片轮廓进行调整,通过分析路径上的每个点,将其向下移动到零件的轮廓上,以便相邻层之间保持固定距离。Liu 等^[61]则保持原始切片,采用变速度进行沉积。首先将给定的模型分为表面和内部实体(IS),并将表面进一步分为悬垂区域(OA)和非悬垂区域(NOA),OA 采用多轴沉积,NOA 和 IS 采用传统垂直方法沉积。由于 OA 通过一系列水平面切片,OA 的焊接高度发生变化,这可通过改变焊接速度来调整。为减少层高误差,将高度变化限制在一定范围内,为此,OA 亦被分解为几个子 OA。通过交替 OA、NOA 和 IS 进行整体路径规划。此外,IS 采用层间交错的方式填充,以减少层间空隙数量,提高致密度。与 Liu 等^[61]采用动态变化的沉积速度不同,Dai 等^[62-63]针对悬垂结构的无支撑制造问题,提出另一种巧妙的解决方法。首先,采

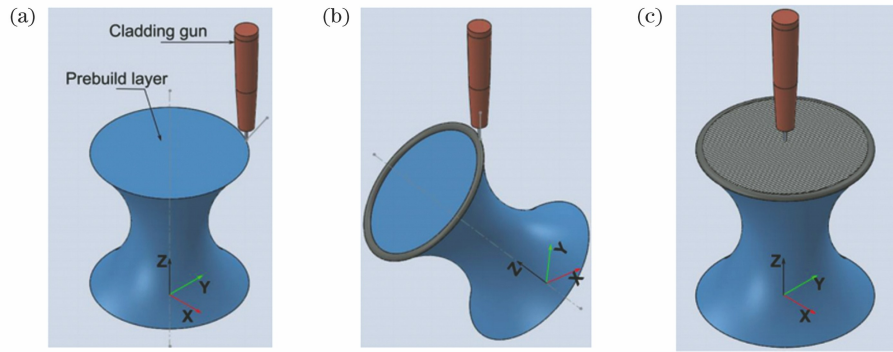


图 17 Kapil 等^[59]所提方法的示意图。(a)激光头和基板位置;(b)采用 5 轴基板倾斜的方法沉积外轮廓;(c)采用 2.5 轴的垂直基板填充内部区域

Fig. 17 Schematic of the method proposed by Kapil et al^[59]. (a) Position of cladding torch and substrate; (b) tilted substrate for 5-axis outer contour deposition; (c) vertical substrate for 2.5 axis area filling

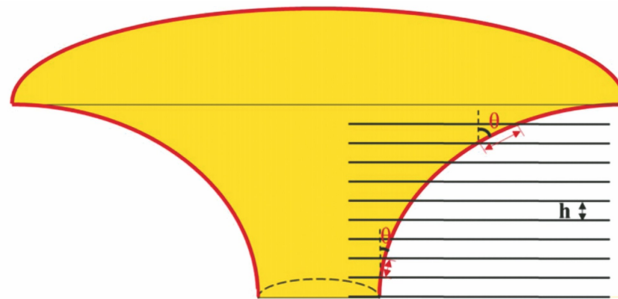


图 18 间距 h 相等的水平平面在焊接方向上产生不同的层厚^[61]

Fig. 18 Horizontal planes with equal distances h between each other generate different layer thicknesses in the welding direction^[61]

用 5 轴沉积外轮廓的悬垂段,并将其作为填充路径的支撑部分。同时考虑到悬垂段可能是不连续的,且亦不能太短,为此提出一个适当的悬垂段应满足两个条

件:1)长度应大于 l_{\min} ;2)悬垂段的最短距离应大于 d_{\min} 。在该研究^[63]中: $l_{\min}=10\text{ mm}$, $d_{\min}=1\text{ mm}$ 。图 19 所示为 Dai 等^[62-63]提出的制造悬垂段的新型沉积策略。

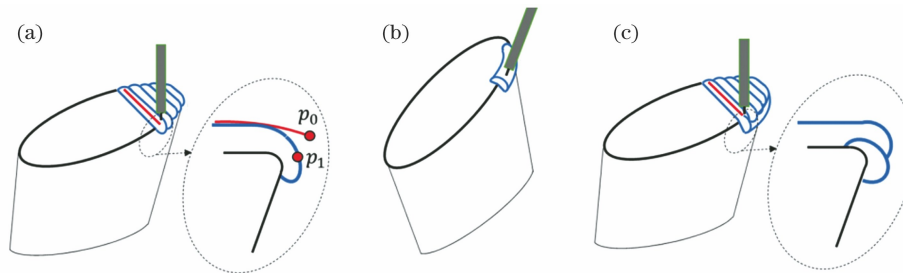


图 19 Dai 等^[62-63]提出的制造悬垂段的新型沉积策略。(a)一种常见的逐层沉积充填路径策略;(b)一种新颖的悬垂部分作为支撑的沉积策略;(c)填充路径的沉积

Fig. 19 A novel deposition strategy for creating overhangs proposed by Dai et al^[62-63]. (a) A common strategy of depositing filling paths layer by layer; (b) a novel strategy of depositing the overhanging segment as a support; (c) deposition of filling paths

可以看出,基于内/外体积分解的方法结合了传统 2.5 轴和多轴打印的优势,能够获得较高的致密度(这对金属零件的沉积非常重要),体积误差能够满足制造要求。尽管表面粗糙度较低,但可以通过进一步采用铣削来保持准确性和精密度。未来,需要进一步研究外部轮廓沉积和层厚调整的最佳方法与内部填充路径方式,以进一步提升 3D 打印材料的力学性能等。

2.6 现有技术的总结和分析

表 4 所示为上述多轴无支撑工艺规划方法的分类、典型特征及其对制造工艺的影响。不同的工艺规

划方法在所处理模型的复杂程度方面存在差异:基于悬垂结构分解与基于骨架化的方法能够处理的模型通常较为简单,且具有尖锐凹边与凹环的零件或树状结构;而基于约束优化、基于曲面层分解和基于内/外体积分解的方法通过更复杂的分解,能够处理具有非锐边的零件。然而,能处理更复杂零件的方法通常需要复杂的分解算法,且耗时更长、鲁棒性差,特别是基于曲面层分解的方法需要更复杂的控制方法,在表面质量上存在不足。此外,如表 2 和表 3 所示,尽管采用的分解方法类似,但不同的平台类型和

自由度配置,将影响整体算法的实现难度,所得成型件的表面质量、力学性能方面也存在差异。只有综

合考虑现有平台配置、工艺参数等因素,才能实现多方面的权衡。

表 4 多轴无支撑 3D 打印的工艺规划方法总结

Table 4 Summary of process planning methods of multi-axis support-free 3D printing

Method	Category	Suitable type of models	Characteristic	Impact of manufacturing process	Main application
Overhang structure decomposition	Planner multi-axis	Overhanging features are sharp concave edges or concave loops	Easy to control; efficient	Alleviated anisotropy; high surface quality	FDM, WAAM, LDMD
Skeletonization	Planner multi-axis; nonuniform	Multi-branched or tree structure	Easy algorithms; robust	Alleviated anisotropy; high surface quality	FDM, WAAM, LDMD
Constraint optimization	Planner multi-axis; uniform	Volumes with non-shape edges	Anisotropy; easy to control toward 3+2-axis; not efficient	Alleviated anisotropy; weak stiffness	FDM
Curved layer decomposition	Nonplanar; nonuniform	Volumes with non-shape edges	Complex algorithms; not efficient	Isotropy; lower surfaces quality	FDM
Inner/outer volume decomposition	Planner multi-axis; uniform	Volumes with non-shape edges	Easy algorithms; efficient; easy to control	Isotropy; lower surfaces quality; few defects or voids in inner volume	WAAM, LDMD

3 多轴无支撑工艺规划面临的问题和挑战

3.1 表面质量

等距平面切片的方法会由于离散化带来的误差而产生阶梯效应,进而对表面精度和沉积质量造成不利影响,图 20 所示为 CAD 模型 P 和沉积轮廓 Q 之间产生阶梯效应的 3 种情况^[23]。目前已经提出了包括局

部自适应切片^[64]、全局自适应切片^[65]和基于区域的自适应切片^[66]等方法,它们都是通过控制层厚变化来减少阶梯效应。此外,Nayyeri 等^[26]总结了自适应切片算法中用于确定每个切片层厚的不同标准。但正如 Wasserfall 等^[67]所述,自适应切片方法的最大问题在于不直观的控制措施,且大部分自适应切片方法并未考虑层厚之间的平滑过渡,增加了不必要的后处理过程,因此这些自适应方法并未得到广泛应用。

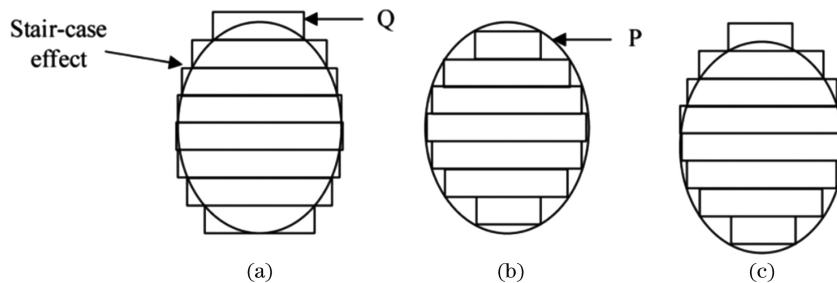


图 20 三种情况下阶梯效应示意图^[23]。(a) $P \leq Q$; (b) $Q \leq P$; (c) $P \not\leq Q$

Fig. 20 Illustrate of staircase effect under three conditions^[23]. (a) $P \leq Q$; (b) $Q \leq P$; (c) $P \not\leq Q$

Etienne 等^[68]提出一种基于映射的微弯曲切片法。通过对各层进行曲面化,使曲面遵循输入表面的斜率,或者以更大的角度与表面相交,从而降低阶梯效应的不良影响。在优化模型的变形后,采用标准的平面方法进行切片,如图 21 所示。尽管该方法只使用了 3 轴沉积,但实验结果证明了该方法在可制造性约束条件下生成无碰撞路径的能力。然而,该方法并未考虑无支撑制造约束。Fang 等^[55]声称其方法可以切换到 Etienne 等^[68]所提出的功能,以在多轴下提高零件

表面质量,但并未具体实施。

Yigit 等^[69]提出一种螺旋切片方法,用于去除平面切片方法在起点和终点处的连接缺陷。将输入几何零件进行平面切片,并使用两个连续的平面切片来构造从当前层到下一层的方向向量。这些向量用于在平面切片之间生成螺旋切片,如图 22 所示。该方法适用于具有复杂薄壁结构、较小悬垂特征的零件。Bhatt 等^[70]将文献^[69]方法扩展到具有两个旋转自由度基板的 5 轴打印机上,以实现具有更大悬垂角度的无支

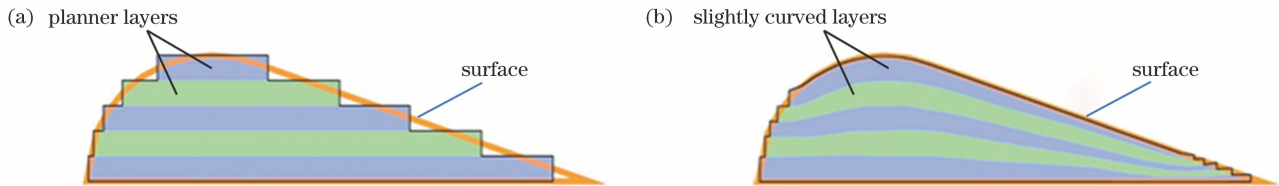


图 21 平面切片与微弯曲切片方法对比^[68]。(a)平面切片法;(b)微弯曲切片法

Fig. 21 Comparison of methods between planar slicing and slightly curved slicing^[68]. (a) Planner slicing method; (b) slightly curved slicing method

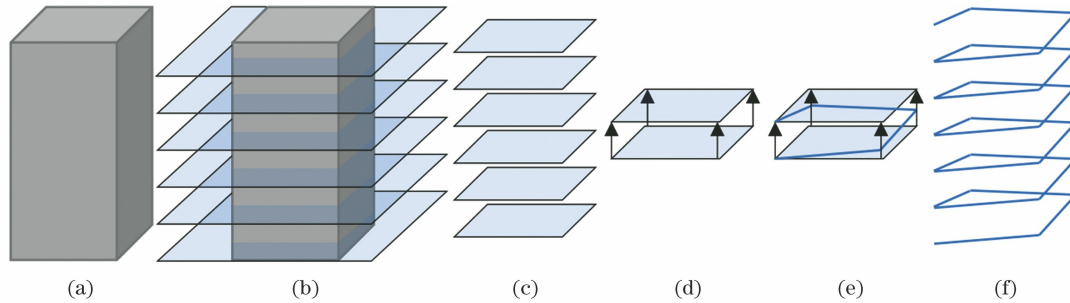


图 22 螺旋切片方法^[69]。(a)输入模型;(b)生成切片平面;(c)获得平面切片;(d)生成方向向量;(e)生成螺旋点;(f)生成螺旋路径

Fig. 22 Helical slicing method^[69]. (a) Model input; (b) generate slicing planes; (c) obtain planar slices; (d) generate direction vectors; (e) generate helical points; (e) generate helical toolpath

撑制造。螺旋路径和平面路径的结合,可能是在满足无支撑制造要求的同时提高实体结构表面质量的新解决方案。

与使用平面分层的方法相反,Davis 等^[71]提出一种保形打印方法,可以通过围绕对象的自然边界保形打印实现具有多层、厚特征的完全包裹,以减小阶梯效应带来的不利影响。利用两种方法在 2D 或 3D 空间中生成初始和理想几何对象边界之间的层;第一种方法基于可变偏移曲线(VOC),该方法无法处理非凸的初始几何对象;第二种方法基于拉普拉斯方程,适用于所有几何对象。然而,Davis 等^[71]仅仅给出了数学描述,并未给出实际打印结果。Bhatt 等^[72]则为 WAAM 工艺设计了一种保形基板,以便于在非平面层焊接时通过控制熔滴的融合方向来减弱阶梯效应,但不会降低焊接强度。

对于金属打印,还有两种常见的方式可以减少阶梯效应带来的不良影响。1)采用表面重熔的方法提高表面质量。Bruzzo 等^[73]通过旋转工件或激光头的方式对薄壁圆管的表面进行重熔,在最佳的重熔条件下,面积粗糙度 $S_{a,LF}$ 降低了 79%,同时表面波纹度降低了 58%。有趣的是,他们发现使用倾斜激光有助于提高激光重熔工艺降低粗糙度的能力(倾斜激光通常被认为不利于沉积)。张荣伟等^[74]也通过表面重熔来改善阶梯效应。2)增减材交替的方式被认为是提高表面质量的最有效途径^[75]。

通过微弯曲切片、螺旋切片、保形打印、重熔和混合制造的方式,能够较好地解决由阶梯效应带来的不良影响,但一些方法并未实现无支撑制造。在多轴无支撑工艺规划中,无支撑约束是一个强约束条件,而表面质量通常被视为弱约束条件甚至不作为考虑因素,

以简化模型和降低求解难度,防止在处理复杂模型时出现找不到解的情况。因此,需要进一步改进模型,在无支撑制造和表面质量方面做出权衡。

3.2 悬垂区域制造

目前,沉积悬垂区域的方法主要有两种:2.5 轴沉积,通过下层的支撑作用沉积较小的斜面;多轴沉积,通过倾斜和旋转基座、沉积头实现沉积。

在 2.5 轴沉积中,FDM 工艺的最大允许悬垂角度通常设置为 45° 。Jiang 等^[76]研究了 FDM 工艺下冷却速度、打印速度和打印温度等参数对可打印悬垂角阈值的影响,为减少支撑浪费和高精度打印提供了重要参考。最近,研究人员认为悬垂区域的制造不仅与悬垂角度有关,还与悬垂长度存在比例关系。在 Gao 等^[42]的实验中, 60° 悬垂角下的安全悬垂长度为 10 mm。相比之下,LDMD 工艺的最大允许悬垂角度要小很多。尽管通过变 Z 方向增量能够获得最大悬垂角度为 36.6° 的零件^[77],但 Wang 等^[78]的实验证明优化 Z 方向增量并不能进一步增大最大允许悬垂角度。因此,悬垂角一般设置为不超过 30° ,且通常取较小值。这是因为 LDMD 无法像 FDM 一样通过对沉积头施加一定压力,进而增加黏附性能。WAAM 的最大允许悬垂角度则介于 FDM 和 LDMD 之间。

Zhao 等^[79]在传统 2.5 轴打印机上开发了一种倾斜层切片方法,通过将悬垂部分旋转到合适角度,对旋转部分采用水平切片后再将切片结果转回原位置。同时考虑到熔丝宽度给阶梯效应带来的不良影响,建立了熔丝宽度的简化模型和悬垂结构的等效力学模型。可以轻松打印接近 90° 的悬垂,但在悬垂结构的底面可能产生毛刺。最近,Wüthrich 等^[80-81]开发了一种 4

轴打印机 RotBot, 该 4 轴打印机拥有一个 45° 的倾斜喷嘴和绕 Z 轴的旋转轴, 采用该方法时无支撑制造的

悬垂角度可扩大到 100° , 并且在表面精度和尺寸精度方面均具有良好结果, 如图 23 所示。

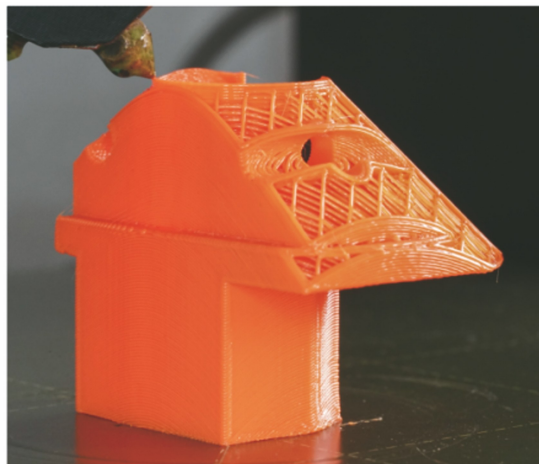
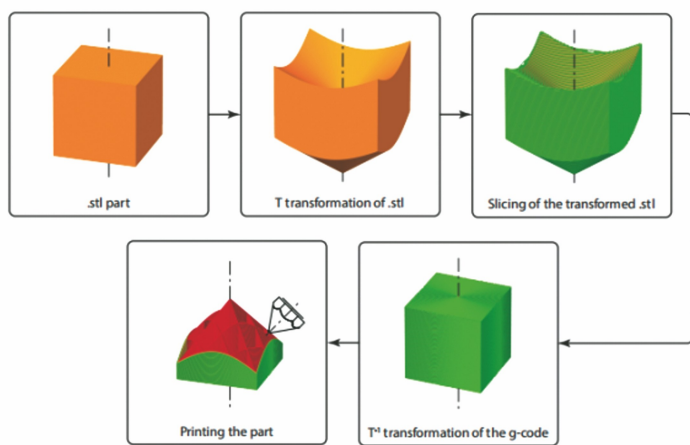


图 23 用于 RotBot 的切片和路径生成方法和实际打印结果^[81]

Fig. 23 Slicing and path generation method and actual print results for RotBot^[81]

采用多轴沉积倾斜或旋转基座的方式能够在很大程度上解决悬垂区域的制造问题, 但也存在一些限制, 如在沉积桥式结构时, 基板与已打印部分可能发生碰撞。而采用倾斜沉积头的方式可能不适合于诸如 LDMD 的工艺, 这是因为粉末流动性会影响熔池稳定性, 激光光斑直径也会发生相应的变化, 对沉积造成不利影响^[82]。因此, 扩大传统 2.5 轴沉积的最大允许悬垂角度仍然具有一定意义。

3.3 精度控制

目前, 多数 3D 打印系统采用机械臂进行制造, 精度问题限制了多轴机器人在 3D 打印领域的广泛应用。尽管目前的工业机器人重复定位精度已经非常高 ($0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$), 但受制造误差、测量误差与标定误差等因素的影响, 其实际定位精度较低, 进而影响打印精度^[21]。而数控机床在精度控制方面较为成熟, 已经有一些采用数控机床或混合制造的机器来实现更高的精度和生产率^[83]。

目前多轴 3D 打印系统大多处于开环状态, 而在实际打印过程中的控制量通常相互耦合影响, 尽管 Chen 等^[84] 在开环系统下通过优化离焦量获得较为精确的可变厚度, 但引入反馈控制方法能够带来更高的质量提升。Shi 等^[85] 开发了沉积高度传感和闭环控制系统, 通过 PI 控制器来记录和平滑可变高度沉积过程中产生的不平整顶面, 给采用变厚度沉积的多轴无支撑打印带来新思路。Song 等^[86] 亦在其开发的 6 轴并联打印机中集成了激光和视觉反馈系统, 用于识别初始沉积间隙的反馈控制。另外, 机器学习在 3D 打印中也得到了广泛应用^[87]。视觉反馈和机器学习方式的结合, 将为多轴无支撑制造的精度控制带来新局面。

3.4 路径规划

目前, 曲面路径的获取方式有两种: 一种是基于曲面协调映射的方法, 通过将曲面映射到平面内, 采用传

统 2.5 轴的路径规划方法获得路径后再映射回原曲面。这种方法的问题在于: 对于采用坐标变换与逆变换的方式, 逆变换后得到的曲线精度较低, 需要对路径进行插值以获得更精确的表示。另一种是通过“矢量场”的方式插值获得曲面层路径。正如前文所述, 这种曲面路径面临相邻路径间存在间隙的问题, 将严重降低零件的力学性能。Chen 等^[88] 将协调映射与尖端高度相结合, 通过扩展生成打印路径, 然而他们的方法在处理修剪曲面或复合曲面时面临困难, 导致其应用范围受到限制。Xie 等^[89] 引入等残高路径生成方法, 减少自由曲面相邻路径的间隙, 该方法有望进一步应用到基于曲面分解的方法中。

此外, 路径的生成不能是完全独立的。通常, 沉积头方向被设置为当前路径点平面的法向量方向, 这种方向的设置被认为会满足最佳的沉积效果。但是, 在所有位置都满足该条件反而不利于运动平稳, 因此需要对沉积头方向进行光顺。对于沉积头方向的光顺, 高斯半球插值法备受欢迎。此外, 在悬垂角度变化较大的区域, 还需要满足无碰撞要求。Plakhotnik 等^[90] 对 LDMD 工艺采取沿工具路径方向平滑以减少激光光斑表面速度的偏差, 重新分布工具路径点表面以确保机床对点的稳健处理, 同时调整喷嘴方向以避免碰撞, 然而该方法并不能用于无支撑制造。另外, 除了路径方向的光顺外, 还需对机械臂的运动轨迹进行光顺。Dai 等^[48] 利用 6 轴机械臂带来的一个冗余自由度来优化机械臂运动的动态行为, 随后又开发了一种新的基于采样的框架, 可以高效地为机械臂制造生成 jerk 优化轨迹^[91]。

根据 Craig^[92] 的说法, 关节空间中的运动规划可以方便地避免奇点。相比之下, 笛卡儿空间下的运动规划必须应对诸如中间点不可达、奇点的高关节速度或不同配置中连续姿势的可达性挑战。最近, Zhang

等^[93]研究了 5 轴机床配置下的奇点感知运动规划,其结果如图 24 所示,但该规划并未用于无支撑制造。Xie 等^[89]利用可操纵椭圆对 6 轴机械臂的奇点进行评估,并建立目标函数来避免奇点位置。总体来讲,目前

关于多轴下的奇点感知运动规划还很少,而徐金亭等^[94]综述了复杂曲面 5 轴数控加工的奇异性避免方法,将有助于多轴 3D 打印特别是无支撑制造下的奇点感知运动规划的发展。

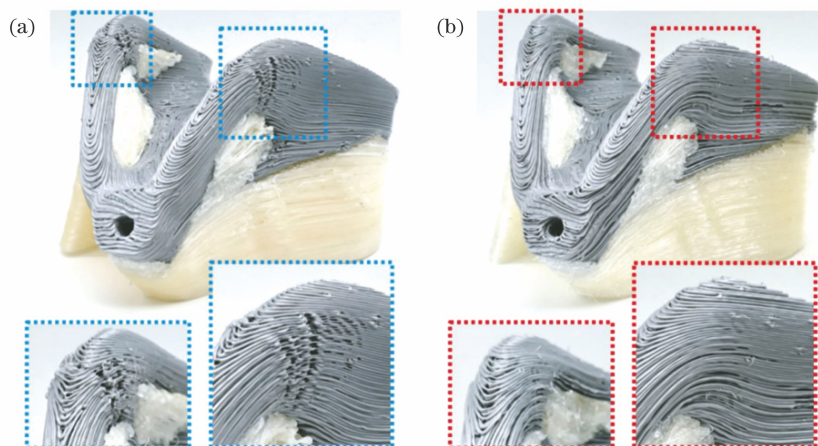


图 24 奇异点感知运动规划^[93]。(a)未采用奇异点感知优化;(b)采用奇异点感知优化

Fig. 24 Singularity aware motion planning^[93]. (a) Singularity aware optimization is not used; (b) singularity aware optimization is used

总之,在多轴无支撑工艺规划下,新型的路径规划需要在任意空间内进行体积分解即切片;能够无间隙地生成路径来覆盖切片表面;考虑机械臂运动学、关节限制和可达性;要在无支撑制造、算法效率和打印效率之间做出权衡。需要注意的是,传统 2.5 轴的路径规划方法并不需要完全排除在多轴路径规划中,特别是在金属打印过程中,现有的 2.5 轴路径对制造的影响研究较为深刻。结合多轴和 2.5 轴路径规划,有助于提升 3D 打印材料的整体力学性能等。

3.5 数据转换与开放性

在传统 2.5 轴沉积过程中,对于 3D 和 2D 数据均有较好的表达,如用于 3D 模型的 STL、AMF、3MF、OBJ 等格式,用于 2D 切片的 SLC、CLI、MAMF 等格式。而在多轴工艺规划中,切片程序并不完全相同,切片数据表示也不能一致。此外,当前的算法中,既没有能够生成与机器人语言兼容的 G 代码数据算法,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标准,需要进一步关注打印系统之间的数据转换与信息交流^[95]。

当前,大多数研究者采用机械臂作为多轴无支撑制造系统的核心部分,多轴工艺规划需要对机械臂进行运动规划研究,Robot Operating System (ROS) 提供了可用于各种机器人的软件组件、机器人特定工具和库,以及各种可视化工具,极大地促进了机器人的研究和软件开发。但是,ROS 仅提供有限的 2.5 轴切片功能,也无通用的硬件和计算机接口^[96]。Flexible Collision Library (FCL) 则提供了用于机械臂的干涉检测方法,但其采用试错搜索的方法在大的搜索空间下效率并不高^[97]。另外,尽管目前有零星关于多轴无支撑制造的开源软件和工艺规划方法^[98],但总体的开

放性还不够,这在一定程度上限制了多轴无支撑制造的发展。

4 结论与展望

随着航空航天、船舶、医疗、电子等领域的飞速发展,对工业产品的复杂性、性能、表面质量的要求越来越高。多轴制造的出现克服了传统 2.5 轴制造需要支撑结构甚至无法制造的问题,为复杂结构的无支撑打印打开了新局面。但目前来讲,多轴制造工艺的规划方法还远不成熟,需要进一步研究当前多轴无支撑制造所面临的问题。针对当前多轴无支撑制造的研究现状,以下发展方向值得关注:

1) 更广泛的工艺应用。不难发现,目前除基于悬垂结构分割的无支撑制造方法外,其余方法大多只在 FDM 工艺上得到了应用。而同样适合于多轴制造的 WAAM、LDMD 工艺则仍然缺少相关研究和应用,但 WAAM、LDMD 工艺在大型航空零部件(如航空发动机尾翼),船舶(如螺旋桨)等关乎国防生计的领域具有重要应用,对复杂结构的需求也高于 FDM 工艺。因此,结合金属增材制造工艺的要求和特点,进一步扩展 FDM 无支撑工艺规划方法,未来将实现更广泛的工艺应用。

2) 更高精度和性能的打印。通过引入反馈控制方法,基于机械臂的多轴无支撑制造精度有望得到进一步提升。另外,目前的多轴无支撑工艺规划方法为实现无支撑制造牺牲了部分精度和力学性能。需要进一步研究奇点的运动优化,实现更平滑的运动轨迹,以提高表面质量。通过在工艺规划过程中引入力学性能要求,进一步提高零件的力学性能。此外,本文缺少针对复杂结构的功能梯度结构打印的讨论,这也是未来的

研究话题。

3) 多轴混合制造。多轴 3D 打印技术受启发于 5 轴数控加工技术,但目前还不能生产出具有与数控机床加工相同的精度和表面粗糙度。此外,数控加工技术有着更完善的碰撞检测能力。为了获得所需的几何形状,同时实现数控加工精度和生产效率的提升,增强碰撞检测能力,这两种工艺的组合已经开始受到关注。目前已经开发了包括多轴 LDMD 和多轴铣削、多轴 FDM 和多轴铣削等复合机床,制造灵活性得到进一步提高。

4) 更开放的社区氛围。目前,多轴无支撑的工艺规划受到硬件和软件兼容性和设备开放性的影响,其发展受到一定的制约。但是,目前已经出现一些开源运动规划库、开源无支撑工艺规划方法等。未来有望进一步开放,这将为复杂结构的无支撑制造提供更强劲动力。

参 考 文 献

- [1] Lewis J A, Ahn B Y. Three-dimensional printed electronics[J]. *Nature*, 2015, 518(7537): 42-43.
- [2] Cheng M, Deivanayagam R, Shahbazian-Yassar R. 3D printing of electrochemical energy storage devices: a review of printing techniques and electrode/electrolyte architectures[J]. *Batteries & Supercaps*, 2020, 3(2): 130-146.
- [3] Liaw C Y, Guvendiren M. Current and emerging applications of 3D printing in medicine [J]. *Biofabrication*, 2017, 9(2): 024102.
- [4] He Y, Wu Y, Fu J Z, et al. Developments of 3D printing microfluidics and applications in chemistry and biology: a review [J]. *Electroanalysis*, 2016, 28(8): 1658-1678.
- [5] Talagani F, DorMohammadi S, Dutton R, et al. Numerical simulation of big area additive manufacturing (3D printing) of a full size car[J]. *Sampe Journal*, 2015, 51(4): 27-36.
- [6] Joshi S C, Sheikh A A. 3D printing in aerospace and its long-term sustainability[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2015, 10(4): 175-185.
- [7] Qin Y C, Qi Q F, Scott P J, et al. Status, comparison, and future of the representations of additive manufacturing data[J]. *Computer-Aided Design*, 2019, 111: 44-64.
- [8] Wong K V, Hernandez A. A review of additive manufacturing [J]. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 2012: 208760.
- [9] Taufik M, Jain P K. Role of build orientation in layered manufacturing: a review [J]. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 2013, 27(1/2/3): 47-73.
- [10] Jiang J C, Xu X, Stringer J. Support structures for additive manufacturing: a review [J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2018, 2(4): 64.
- [11] Jiang J C, Lou J J, Hu G B. Effect of support on printed properties in fused deposition modelling processes[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2019, 14(4): 308-315.
- [12] Qin Y C, Qi Q F, Shi P Z, et al. Status, issues, and future of computer-aided part orientation for additive manufacturing[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 115(5/6): 1295-1328.
- [13] di Angelo L, di Stefano P, Guardiani E. Search for the optimal build direction in additive manufacturing technologies: a review [J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2020, 4(3): 71.
- [14] Hu K L, Jin S, Wang C C L. Support slimming for single material based additive manufacturing [J]. *Computer-Aided Design*, 2015, 65: 1-10.
- [15] Vanek J, Galicia J A G, Benes B. Clever support: efficient support structure generation for digital fabrication[J]. *Computer Graphics Forum*, 2014, 33(5): 117-125.
- [16] Zhang N, Zhang L C, Chen Y, et al. Local barycenter based efficient tree-support generation for 3D printing[J]. *Computer-Aided Design*, 2019, 115: 277-292.
- [17] Zhou Y, Lu H, Ren Q R, et al. Generation of a tree-like support structure for fused deposition modelling based on the L-system and an octree[J]. *Graphical Models*, 2019, 101: 8-16.
- [18] Jiang J C, Weng F, Gao S M, et al. A support interface method for easy part removal in directed energy deposition [J]. *Manufacturing Letters*, 2019, 20: 30-33.
- [19] Alexa M, Hildebrand K, Lefebvre S. Optimal discrete slicing [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(4): 1-16.
- [20] Jiang J C, 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, 34(2): 195-211.
- [21] 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.
- [21] Wu C M, Dai C K, Wang C L, et al. Recent progress on multi-DOF 3D printing: a survey[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2019, 42(9): 1918-1938.
- [22] Urhal P, Weightman A, Diver C, et al. Robot assisted additive manufacturing: a review[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, 59: 335-345.
- [23] Xu J, Gu X Z, Ding D H, et al. A review of slicing methods for directed energy deposition based additive manufacturing [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2018, 24(6): 1012-1025.
- [24] Lehmann T, Rose D, Ranjbar E, et al. Large-scale metal additive manufacturing: a holistic review of the state of the art and challenges [J]. *International Materials Reviews*, 2021: 1-50.
- [25] Zhao D H, Guo W Z. 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): 61-71.
- [26] Nayyeri P, Zareinia K, Bougherara H. Planar and nonplanar slicing algorithms for fused deposition modeling technology: a critical review [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022: 1-26.
- [27] Ding D H, Pan Z X, Cuiuri D, et al. Advanced design for additive manufacturing: 3D slicing and 2D path planning [M] // *New trends in 3D printing*. London: InTech, 2016: 63042.
- [28] 岑伟洪, 汤辉亮, 张江兆, 等. 提升分区搭接质量的激光选区熔化扫描策略[J]. *中国激光*, 2021, 48(18): 1802018.
- [28] Cen W H, Tang H L, Zhang J Z, et al. Scanning strategy to improve the overlapping quality of partition in selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(18): 1802018.
- [29] Singh P, Dutta D. Multi-direction slicing for layered manufacturing [J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2001, 1(2): 129-142.
- [30] Zhang J, Liou F. Adaptive slicing for a multi-axis laser aided manufacturing process[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2004, 126(2): 254-261.
- [31] Ren L, Sparks T, Ruan J Z, et al. Process planning strategies for solid freeform fabrication of metal parts [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2008, 27(4): 158-165.
- [32] Singh P, Dutta D. Offset slices for multidirection layered deposition [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2008, 130(1): 011011.
- [33] Lee K, Jee H. Slicing algorithms for multi-axis 3-D metal printing of overhangs [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015, 29(12): 5139-5144.
- [34] Ding D H, Pan Z X, Cuiuri D, et al. Automatic multi-direction slicing algorithms for wire based additive manufacturing [J].

- Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 37: 139-150.
- [35] Ding Y Y, Dwivedi R, Kovacevic R. Process planning for 8-axis robotized laser-based direct metal deposition system: a case on building revolved part [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 44: 67-76.
- [36] Zhao G, Ma G C, Feng J W, et al. Nonplanar slicing and path generation methods for robotic additive manufacturing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(9/10/11/12): 3149-3159.
- [37] Ren L, Sparks T, Ruan J Z, et al. Integrated process planning for a multi-axis hybrid manufacturing system [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2010, 132(2): 021006.
- [38] Wang M Q, Zhang H G, Hu Q X, 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.
- [39] Hu Q X, Feng D, Zhang H G, et al. Oriented to multi-branched structure unsupported 3D printing method research [J]. Materials, 2020, 13(9): 2023.
- [40] Wang X Y, Chen L F, 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(1/2): 327-350.
- [41] Wu C M, Dai C K, Fang G X, et al. RoboFDM: a robotic system for support-free fabrication using FDM [C] // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 29-June 3, 2017. Singapore, Singapore. New York: IEEE Press, 2017: 1175-1180.
- [42] Gao Y S, Wu L F, Yan D M, et al. Near support-free multi-directional 3D printing via global-optimal decomposition [J]. Graphical Models, 2019, 104: 101034.
- [43] Wu C M, Dai C K, Fang G X, et al. General support-effective decomposition for multi-directional 3-D printing [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020, 17(2): 599-610.
- [44] Liu H, Liu L, Li D W, et al. An approach to partition workpiece CAD model towards 5-axis support-free 3D printing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(1/2): 683-699.
- [45] Xu K, Chen L F, Tang K. Support-free layered process planning toward 3+2-axis additive manufacturing [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019, 16(2): 838-850.
- [46] Xiao X Y, Joshi S. Process planning for five-axis support free additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2020, 36: 101569.
- [47] Wu C M, Liu Y J, Wang C C L. Learning to accelerate decomposition for multi-directional 3D printing [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(4): 5897-5904.
- [48] Dai C K, Wang C C L, Wu C M, et al. Support-free volume printing by multi-axis motion [J]. ACM Transactions on Graphics, 2018, 37(4): 1-14.
- [49] Zhao H S, Gu F L, Huang Q X, et al. Connected Fermat spirals for layered fabrication [J]. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(4): 1-10.
- [50] 张帆, 魏培祥, 赵圆圆, 等. 基于体素的机械臂连续碳纤维 3D 打印路径规划 [J/OL]. 计算机集成制造系统, 2021: 1-18(2021-08-18) [2021-12-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20210818.1516.012.html>.
Zhang F, Wei P X, Zhao Y Y, et al. Voxel-based path planning method for continuous carbon fiber 3D printing with robot arm [J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021: 1-18(2021-08-18) [2021-12-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20210818.1516.012.html>.
- [51] Xu K, Li Y G, Chen L F, et al. Curved layer based process planning for multi-axis volume printing of freeform parts [J]. Computer-Aided Design, 2019, 114: 51-63.
- [52] George P L, Seveno E. The advancing-front mesh generation method revisited [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1994, 37(21): 3605-3619.
- [53] Li Y M, He D, Wang X Y, et al. Geodesic distance field-based curved layer volume decomposition for multi-axis support-free printing [EB/OL]. (2020-03-12) [2021-05-06]. <https://arxiv.org/abs/2003.05938>.
- [54] Crane K, Weischedel C, Wardetzky M. The heat method for distance computation [J]. Communications of the ACM, 2017, 60(11): 90-99.
- [55] Fang G X, Zhang T Y, Zhong S K, et al. Reinforced FDM: multi-axis filament alignment with controlled anisotropic strength [J]. ACM Transactions on Graphics, 2020, 39(6): 1-15.
- [56] Shan Y J, Gan D M, Mao H C. Curved layer slicing based on isothermal surface [J]. Procedia Manufacturing, 2021, 53: 484-491.
- [57] Xie F B, Jing X S, Zhang C Y, et al. Volume decomposition for multi-axis support-free and gouging-free printing based on ellipsoidal slicing [J]. Computer-Aided Design, 2022, 143: 103135.
- [58] Mitropoulou I, Bernhard M, Dillenburger B. Nonplanar 3D printing of bifurcating forms [J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2021: 0023.
- [59] Kapil S, Joshi P, Kulkarni P M, et al. Elimination of support mechanism in additive manufacturing through substrate tilting [J]. Rapid Prototyping Journal, 2018, 24(7): 1155-1165.
- [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(5/6/7/8): 2111-2120.
- [61] Liu B, Shen H Y, Zhou Z Y, et al. Research on support-free WAAM based on surface/interior separation and surface segmentation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 297: 117240.
- [62] Dai F S, Zhang H O, Li R S. Process planning based on cylindrical or conical surfaces for five-axis wire and arc additive manufacturing [J]. Rapid Prototyping Journal, 2020, 26(8): 1405-1420.
- [63] Dai F S, Zhang S F, Li R S, et al. Multi-axis wire and arc additive manufacturing for overhangs based on conical substrates [J]. Rapid Prototyping Journal, 2022, 28(1): 126-142.
- [64] Tyberg J, Böhn J H. Local adaptive slicing [J]. Rapid Prototyping Journal, 1998, 4(3): 118-127.
- [65] Zhang K, Li D Y, Gui H, et al. An adaptive slicing algorithm for laser cladding remanufacturing of complex components [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(9/10/11/12): 2873-2887.
- [66] Mani K, Kulkarni P, Dutta D. Region-based adaptive slicing [J]. Computer-Aided Design, 1999, 31(5): 317-333.
- [67] Wasserfall F, Hendrich N, Zhang J W. Adaptive slicing for the FDM process revisited [C] // 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering, August 20-23, 2017, Xi'an, China. New York: IEEE Press, 2017: 49-54.
- [68] Etienne J, Ray N, Panozzo D, et al. CurviSlicer [J]. ACM Transactions on Graphics, 2019, 38(4): 1-11.
- [69] Yigit I E, Lazoglu I. Helical slicing method for material extrusion-based robotic additive manufacturing [J]. Progress in Additive Manufacturing, 2019, 4(3): 225-232.
- [70] Bhatt P M, Malhan R K, Rajendran P, et al. Building free-form thin shell parts using supportless extrusion-based additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2020, 32: 101003.
- [71] Davis J D, Kutzer M D, Chirikjian G S. Algorithms for multilayer conformal additive manufacturing [J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2016, 16(2): 021015.
- [72] Bhatt P M, Kulkarni A, Kanyuck A, et al. Automated process planning for conformal wire arc additive manufacturing [J]. The

- International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022: 1-26.
- [73] Bruzzo F, Catalano G, Demir A G, et al. Surface finishing by laser re-melting applied to robotized laser metal deposition[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 137: 106391.
- [74] 张荣伟, 万乐, 石拓, 等. 薄壁空心球体的多自由度随形激光熔渣沉积制备工艺与精度[J]. 中国激光, 2021, 48(22): 2202018. Zhang R W, Wan L, Shi T, et al. Multi-degree of freedom conformal laser metal deposition process and precision of thin-walled hollow sphere[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(22): 2202018.
- [75] Dávila J L, Neto P I, Noritomi P Y, et al. Hybrid manufacturing: a review of the synergy between directed energy deposition and subtractive processes [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(11/12): 3377-3390.
- [76] Jiang J C, Stringer J, Xu X, et al. Investigation of printable threshold overhang angle in extrusion-based additive manufacturing for reducing support waste [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2018, 31(10): 961-969.
- [77] 王续跃, 江豪, 徐文骥, 等. 变 Z 轴提升量法圆弧截面倾斜薄壁件激光熔覆成形研究[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1003007. Wang X Y, Jiang H, Xu W J, et al. Laser cladding forming of arc-section inclined thin-walled parts with variable Z-increments [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(10): 1003007.
- [78] Wang X L, Deng D W, Hu Y B, et al. Overhang structure and accuracy in laser engineered net shaping of Fe-Cr steel [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 106: 357-365.
- [79] 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.
- [80] Wüthrich M, Elspass W J, Bos P, et al. Novel 4-axis 3D printing process to print overhangs without support material [M]// Meboldt M, Klahn C. Industrializing additive manufacturing. Cham: Springer, 2021: 130-145.
- [81] Wüthrich M, Gubser M, Elspass W J, et al. A novel slicing strategy to print overhangs without support material [J]. Applied Sciences, 2021, 11(18): 8760.
- [82] Hao J B, Meng Q D, Li C C, et al. Effects of tilt angle between laser nozzle and substrate on bead morphology in multi-axis laser cladding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 43: 311-322.
- [83] Cortina M, Arrizubieta J I, Ruiz J E, et al. Latest Developments in Industrial Hybrid Machine Tools that Combine Additive and Subtractive Operations [J]. Materials, 2018, 11(12): 2583
- [84] Chen L Y, Yu T B, Chen Y, et al. Slicing strategy and process of laser direct metal deposition (DMD) of the inclined thin-walled part under open-loop control [J]. Rapid Prototyping Journal, 2022, 28(1): 68-86.
- [85] Shi T, Shi J J, Xia Z X, et al. Precise control of variable-height laser metal deposition using a height memory strategy [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57: 222-232.
- [86] Song X, Pan Y Y, Chen Y. Development of a low-cost parallel kinematic machine for multidirectional additive manufacturing [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2015, 137(2): 021005.
- [87] Goh G D, Sing S L, Yeong W Y. A review on machine learning in 3D printing: applications, potential, and challenges [J]. Artificial Intelligence Review, 2021, 54(1): 63-94.
- [88] Chen L F, Chung M F, Tian Y B, et al. Variable-depth curved layer fused deposition modeling of thin-shells [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 57: 422-434.
- [89] Xie F B, Bi D J, Tang K. A potential field based multi-axis printing path generation algorithm [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2020, 33(12): 1277-1299.
- [90] 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.
- [91] Dai C K, Lefebvre S, Yu K M, et al. Planning jerk-optimized trajectory with discrete time constraints for redundant robots [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020, 17(4): 1711-1724.
- [92] Craig J J. Introduction to robotics: mechanics and control [M]. 3rd ed. Uttar Pradesh: Pearson Education India, 2009.
- [93] Zhang T Y, Chen X J, Fang G X, et al. Singularity-aware motion planning for multi-axis additive manufacturing [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(4): 6172-6179.
- [94] 徐金亭, 牛金波, 陈满森, 等. 精密复杂曲面零件多轴数控加工技术研究进展 [J]. 航空学报, 2021, 42(10): 524867. Xu J T, Niu J B, Chen M S, et al. Research progress in multi-axis CNC machining of precision complex curved parts [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(10): 524867.
- [95] 汤鹏飞, 赵先锋, 史红艳, 等. 多轴 3D 打印技术研究进展 [J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-21 (2021-12-01) [2022-12-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20211130.1409.002.html>. Tang P F, Zhao X F, Shi H Y, et al. Research progress of multi-axis 3D printing technology [J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems: 1-21 (2021-12-01) [2022-12-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20211130.1409.002.html>.
- [96] Berger E, Conley K, Faust J, et al. ROS-introduction [EB/OL]. [2021-02-23]. <https://wiki.ros.org/ROS/Introduction>.
- [97] Pan J, Chitta S, Manocha D. FCL: a general purpose library for collision and proximity queries [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 14-18, 2012, Saint Paul, MN, USA. New York: IEEE Press, 2012: 3859-3866.
- [98] University of Oslo master's student creates amazing open source 5-axis 3D printer [EB/OL]. (2015-06-30) [2021-02-23]. <https://3dprint.com/77400/5-axis-3d-printer/>.

Latest Research Progress and Prospect of Process Planning Algorithms of Multiaxis Support-Free 3D Printing for Complex Structure

Zhang Jiangzhao, Tang Huiliang, Wang Chu, Wu Xiaoxuan, Long Yu*

Institute of Laser Intelligent Manufacturing and Precision Processing, School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China

Abstract

Significance Additive manufacturing (also known as 3D printing) is widely used in automotive, aerospace, shipbuilding, medicine, and other industries. Despite the name, most commercial 3D printing systems currently in use

operate in 2.5-D mode, in which materials are accumulated layer upon layer in planes with a fixed direction (usually the opposite direction of gravity). Although this approach has lower hardware complexity and software development costs, it is faced with staircase effects, the need for support structures, and even a lack of manufacturability. Multiaxis 3D printing methods remove the problem of support structure required by traditional methods, showing extremely high manufacturing flexibility. It also offers a wide range of applications in support-free 3D printing of complex structures. This article reviews multiaxis support-free 3D printing process planning methods. These methods are classified as overhang structure decomposition, skeletonization, constraint optimization, curved layer decomposition, and inner or outer volume decomposition based on their capacity to deal with complex models. Following that, the issues and challenges of multiaxis support-free 3D printing are examined in terms of surface quality, overhanging area manufacturability, precision control, path planning, and so on. Finally, in view of the current problems and challenges, the prospects for multiaxis support-free 3D printing are discussed for future development.

Progress The method based on overhang structure decomposition was the first proposed process planning method for multiaxis support-free 3D printing. The core of this method is to distinguish between the core (or buildable) and overhang (or unbuildable) volumes, which requires the overhanging feature to have strong concave edges or loops. To improve the ability to deal with complex geometric parts even further, the researchers obtained the centroid axis, or skeleton, from the geometric information of the input model by following the intrinsic characteristics of the part, and then used the skeleton to guide the decomposition into subvolumes without supports. This method can implement the support-free fabrication of multibranch or tree-like structures (as shown in Fig. 11), but it cannot effectively handle models without obvious skeleton features, implying that depending just on the skeleton for guided slicing is insufficient. Combining constrained optimization methods to minimize the area of the support structure yields a better decomposition result. Following that, a variety of methods, including the ant colony algorithm, beam-guided search algorithm, and downward flooding search algorithm, were proposed to find the optimal solution. In Table 2, the characteristics of constraint-based optimization methods are compared. However, to manufacture on a 3+2 axis platform, most of the above methods use a plane as both a dividing plane and a base plane. This planner layer-based constraint imposes constraints on the fabrication of more complex parts, and new approaches are attempted to fully utilize the flexibility provided by multiple degrees of freedom. The curved layer decomposition method attempts to divide the volume into a series of roughly equal-thickness surfaces while satisfying support-free and manufacturability constraints. There is a possibility of nozzle collision and local embedding if the resulting surface layer is concave. As a result, obtaining the convexly curved layers becomes the focal point of this method. Recently, an ellipsoid-based curved layer decomposition algorithm was proposed. Due to the ellipsoid's convexity, the problem of nozzles' local embedding was successfully avoided. However, this method is overly convoluted. To achieve a balance between algorithm, control complexity, and manufacturing efficiency, an inner or outer volume decomposition method was proposed, in which 5- and 2.5-axis depositions were applied externally and internally, respectively, to obtain a denser internal entity, which was important for metal parts. Table 4 summarizes the characteristics of the proposed multiaxis support-free 3D printing process planning method and their impact on the manufacturing process.

This paper also summarizes some current issues and challenges. First, previous work has focused on path generation with suboptimal surface quality under support-free and collision-free constraints. To improve surface quality, methods such as microcurved slicing, helical slicing, conformal printing, remelting, and hybrid fabrication have recently been proposed. Second, to improve the overhang area's manufacturability, methods, such as changing Z -direction increments and tilting the nozzle, are used to expand the maximum permitted overhang angle. Third, while most of the current multiaxis 3D printing systems are in an open-loop state, the control quantities in the printing process are usually coupled with each other. Researchers try to smooth the uneven top surface caused by the variable height deposition strategy with the PI controllers. Finally, as illustrated in Fig. 24, the path generation is further optimized to meet the collision requirements while avoiding singularities as much as possible.

Conclusion and Prospects To summarize, the process planning methods of multiaxis support-free 3D printing for complex structures has yielded intriguing results, including the ability to decompose and print volumes with nonsharp edges, but it is still in its early stages. The following aspects are expected to be prioritized in the development of multiaxis support-free 3D printing methods. The first is more widespread process applications. At the moment, most methods are concentrated on the FDM process. To realize support-free printing of complex metal components, the process requirements and metal additive manufacturing characteristics must be further combined. The second is improved precision and performance printing. Feedback control is used to improve the robot's positioning accuracy and to further optimize the motion trajectory to improve manufacturing accuracy. Simultaneously, by introducing requirements, such as mechanical properties into process planning, the mechanical properties of the parts will be improved even further.

Additionally, functionally gradient structure printing of complex structures is a potential research topic. Another option is to use multi-axis hybrid manufacturing. The CNC machine has a high level of precision and efficiency in manufacturing. Combining with a CNC machine can improve manufacturing flexibility even further. There will also be a more open community. Hardware and software compatibility, as well as device openness, have an impact on multi-axis support-free process planning. However, some open source motion and process planning methods have emerged, and more opportunities are expected in the future.

Key words laser technique; multi-axis 3D printing; support-free 3D printing; process planning; robot assisted additive manufacturing