DOI: 10.3901/JME.2019.13.129

基于双倾斜度概率的流形模型 3D 打印层切优化方法*

徐敬华 任新华 陈前勇 张树有 谭建荣
(浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310027)

摘要: 3D 打印在现代医学、高端制造领域应用广泛。现有的 3D 打印尚难以满足复杂形态的成形精度和效率需求。为此, 本文提出了基于双倾斜度概率(Dual Inclinations Probability, DIP)的流形模型 3D 打印层切优化方法, DIP 模型同时考虑了层切面倾斜和增厚方向倾斜的双重因素, 以表征丝杠螺母运动副旋合误差、反向旋合背隙、伺服系统热效应等不确定因素。先构建流形模型的沿坐标轴的凸包围盒, 通过最小体积外接圆柱获得高径比, 再通过面片正交投影, 获得向 Oxy 、 Oxz 和 Oyz 面的投影面积, 以此确定 3D 打印最优层切方向(z 向)。然后, 构建关于层切面倾斜度的复合变量, 建立广义卡方分布的层切倾斜度概率模型, 用特定点与两面角法建立非水平面的有界面坐标方程。进一步, 建立了增厚方向倾斜的倒圆锥正态概率分布模型。通过层切面梯度变化规律确定有界面切面 z 向最大值和最小值, 运用网格面片区间分块法和层次智能筛选面片, 确定与各层切平面相交的面片。提取关联的面片集合与该面片集合在有界面切面的正投影的拓扑同胚关系, 通过每层截面的截交线复合环, 获得 3D 打印流形模型的有向多连通域。根据 Cavalieri 原理, 计算每层多面棱柱体积, 以体积误差和残余高度为判定准则, 对分层切片策略进行迭代优化, 最终, 通过 DIP 模型得到对不确定因素容差最大的最优鲁棒分层切片策略。以人体颈椎骨为例进行物理实验验证, 打印件残余高度最大降低 10.12%, 阶梯效应得到抑制, 证明本文方法可提高不确定因素扰动下的 3D 打印成形精度。

关键词: 3D 打印; 双倾斜度概率; 流形模型; 层切面倾斜; 增厚方向倾斜; 拓扑同胚; 不确定因素扰动

中图分类号: TP391

A Slicing Optimization Method of Manifold Model for 3D Printing Based on Dual Inclinations Probability

XU Jinghua REN Xinhua CHEN Qianrong ZHANG Shuyou TAN Jianrong
(State Key Lab of Fluid Power & Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: 3D printing is widely used in modern medicine and high-end manufacturing fields. The existing 3D printing method is still difficult to meet precision and efficiency requirements for complex shape. Therefore, a slicing optimization method of manifold model for 3D printing based on dual inclinations probability (DIP) is proposed. Both the slicing inclinations and additive inclinations are synchronously considered. Uncertainty factors such as leadscrew nut screwing error, reverse engagement back clearance and heat effect of servo system are characterized. First, the Axis-aligned Bounding Boxes of the manifold model is constructed. The height-diameter ratio is obtained by minimum bounding cylinder. The projection area in Oxy 、 Oxz and Oyz plane is obtained by orthogonal projection of facets to determine the optimal direction (z direction) of 3D printing. A compound variable of the inclination angle of slicing plane is derived. The probability density function and probability model of generalized chi-squared distribution are built. The bounded coordinate equations of the non-horizontal worktable are deduced by a certain point and double angle method. Further, the maximum and minimum z value of the bounded slicing planes is determined according to the gradient rule of the slicing plane. The triangular facets that intersect with different slicing planes are found out by building interval partition blocks and layered intelligent screening facet. Based on the topological homomorphism of associated facet set and its orthogonal projection on the bounded slicing plane, the directed multi-connected domains of 3D printing model is finally obtained. According to Cavalieri

* 国家自然科学基金(51775494)、浙江省科技计划(2019C01141)、浙江省公益技术应用研究(2017C31002)、浙江省高等教育课堂教学改革(kg20160014)和中央基本科研业务费专项资金(2017FZA4003)资助项目。
20180826 收到初稿, 20190123 收到修改稿

principle, the volume of polyhedral prism in each layer is calculated, and the strategy of slicing is optimized iteratively according to the criterion of volume error and cusp height. Finally, the optimal robust slicing strategy is determined with the greatest tolerance to uncertainties according to the DIP model. 3D printing experiments are carried out on human second cervical vertebra. The Part's maximum cusp height is reduced by 10.12%. The stair effect is suppressed. It is proved that this DIP method can improve the forming accuracy of 3D printing for uncertain error factors.

Key words: three-dimension printing; dual inclinations probability; manifold model slicing; slicing inclination; additive inclination; topological homeomorphism; uncertainty disturbance

0 前言

3D 打印(Three-dimensional printing)是一种快速成形技术,以数字几何模型为基础,以逐层叠加增材制造(Additive manufacturing)的方式将物体“堆积”制造。3D 打印对结构复杂、形态多变、骨架分支多的难加工形体具有显著优势,在现代医学、高端制造领域应用广泛,对精度的要求也越来越高^[1]。当前研究主要包括打印机结构形式对精度的影响、倾斜度对不同成形工艺的精度影响、不同切片算法对倾斜度的容差、不同应用领域对倾斜度补偿等。

(1) 打印机结构形式对精度的影响研究。不同打印机框架结构对非水平面切片、曲面切片提出了不同的要求。3D 打印机的结构包括:并联臂型、XYZ 型和柱坐标型等。XYZ 型特点是空间相互垂直的三个轴互相独立运动来实现打印,结构简单清晰,能够实现较高的稳定性和打印精度。并联臂型打印机在三个竖直轴方向移动不同距离来实现喷头移动,能够将喷头在 Oxy 平面内的移动映射到三个垂直的轴上。英国布里斯托大学的 ALLEN 等^[2]采用在 z 轴方向上更加灵活的 Delta 型打印机对曲面分层进行了实验,并对打印路径做出改进。若模型的形状为不规则曲面,则采用与形状相近的曲面来层切模型,可抑制阶梯效应(Staircase effect, SE),提升模型精度。英国开放大学的 LIM 等^[3]研究了曲面分层打印路径,并通过实验与平面分层打印进行了比较。

(2) 不同成形工艺对精度的影响研究。在打印工艺方面,熔融沉积成型(Fused deposition modeling, FDM)将热熔材料加热融化之后通过喷头逐层热涂在工作台上,冷却后即可固化,结构简单,成本较低。光固化成型(Stereo lithography appearance, SLA)是用液态光敏树脂为原料,用激光照射到材料表面,使之固化成型,表面精度较高。激光选区烧结(Selective laser sintering, SLS),在工作台上铺粉,激光束在控制下对截面进行烧结,层层堆积成型,其优点是材料的选择相对广泛,金属、陶瓷粉末、ABS、尼龙等都可作为烧结材料。激光选区融化 SLM(Selective laser melting, SLM)对 SLS 进行改进,

在打印过程中使金属在激光束的作用下完全融化,冷却后凝固成型。在打印时根据所需零件材料、性能需求选用不同的打印技术,美国 Carbon 3D 公司的 TUMBLESTON 等^[4]在光固化打印的基础上提出了连续液面制造技术,将 SLA 的逐点固化改为逐面固化,提升了打印速度。在金属制造领域,加州大学圣芭芭拉分校的 MARTIN 等^[5]通过引入金属晶核的纳米粒子到铝合金的粉末中,用 SLM 法打印铝合金,并且没有裂纹,甚至使制件强度接近锻造件。

(3) 不同切片与模型处理方法对精度的影响研究。为了提高模型的打印质量,对切片算法进行优化来提升分层的精度和效率^[6-8]。SONG 等^[9]采用函数表示的方法来进行实体建模,然后对其进行切片,避免了生成三角网格的步骤,通过使用区间算法来减少采样点,从而提高效率。ZENG 等^[10]研究了切片算法效率和模型精度之间的关系,对分层算法进行优化,简化了运算过程中的布尔运算和分层模型的构造来平衡效率和精度,但是没有考虑 SE 带来的误差。香港城市大学的 MA 等^[11]提出一种基于 NURBS 的自适应切片算法并且推导出一种计算表面轮廓的方法,能够打印出更加精确光滑的模型表面。新西兰奥克兰大学的 HUANG 等^[12]整合了自适应切片方法和曲面层切模型的方法,对模型分区块进行处理,通过对模型表面轮廓的曲率快速变化的检测,使用不同的分层厚度来提高精度;澳大利亚昆士兰大学的 HOPE 等^[13]把每层的边界加工成斜边的方式,减少了由于 SE 产生的误差,但是没有考虑工作台为非理想水平面的因素。在模型结构强度上 MAO 等^[14]在 3D 打印模型内部的支撑结构,使用混合结构来设计支撑方案,将模型内部不同的部分使用不同的结构并将其连接在一起。

(4) 不同应用领域对精度的影响研究。哈佛大学在生物医疗研究方面,LIND 等^[15]通过 3D 打印的方法制造心脏检测的微生理设备,设备带有传感器,可以读出心脏的组织收缩力并且对生物组织没有损伤;ZHANG 等^[16]研究了 3D 打印技术在血管、心脏、肝脏和软骨等组织器官的进展。LI 等^[17]用三维扫描出骨骼的缺陷,然后用两种水凝胶作为材料进行 3D 打印,对骨骼缺陷进行修复。韩国浦项科技

大学的 JANG 等^[18]利用 3D 打印出复杂的组织进行心脏修复。

在微观应用方面,瑞士苏黎世大学的 HIRT 等^[19]研究了微米级的金属增材制造,讨论了目前微米级金属增材制造的发展方向和潜力。美国华盛顿大学的 BHATTACHARJEE 等^[20]研究用 3D 打印技术来制造微流控系统,目前微流控系统绝大部分用的是聚二甲基硅氧烷(PDMS),通过寻找到和 PDMS 特性相近的橡胶作为原材料,运用 3D 打印的方式来制造。此外国内学者在 3D 打印方面也进行相关研究。

由此可见,提高精度始终是 3D 打印中最重要的目标之一,流形模型的自适应层切优化是 3D 打印的共性关键技术。当前适应性分层算法是根据模型表面倾斜度以及精度要求,在分层时调整参数,从而抑制 SE,尚难以满足复杂形态的成形精度和效率需求。本文在已有研究工作的基础上^[21-23],提出了基于双倾斜度概率(Dual inclinations probability, DIP)的流形模型 3D 打印层切优化方法,同时考虑了层切面倾斜和增厚方向倾斜的双重因素,实现了对不确定因素容差最大的最优鲁棒分层切片策略并进行了实验验证。

1 考虑倾斜度的 3D 打印体系的构建

1.1 3D 打印最优层切方向的确定

本文是通过对流形三角网格模型处理进行 3D 打印,对于流形网格模型,一条边只能被两个面片共有,沿着其各边进行分割并展开,流形网格模型能够展平并且不发生重叠。流形三角网格模型有以下特点:模型由其面片完全包围;流形网格模型中一条边由两个面片共有;每个面片顶点的顺序为逆时针方向,面片的法矢量指向模型的外部;模型的面片没有重合,没有悬空多余的顶点,面片之间没有相互穿越。

载入流形网格模型后,获得整个模型的数据,确定所有点坐标的集合 V' 。根据这些点的集合 V' ,构建模型的沿坐标轴的凸包围盒(Axis-aligned bounding boxes, AABB)。AABB 的主方向为包围盒过同一顶点的三条相互垂直的边的方向,AABB 沿 x 方向、 y 方向和 z 方向的长度为 l_1, l_2, l_3 。为构建流形网格模型的层切面及工作台空间方程,将流形网格模型的原始坐标系 $O'x'y'z'$ 变换为分层坐标系 $Oxyz$ 。

通过最小体积外接圆柱获得高径比,再通过面片正交投影,获得向 Oxy 、 Oxz 和 Oyz 面的投影面积,根据所打印模型的形态结构和精度的要求,以

此确定 3D 打印最优层切方向(z 向)。在 z 方向上建立模型的局部坐标系,使 AABB 处在分层坐标系的第一卦限,以此确定分层坐标系。根据分层坐标系的 x 、 y 、 z 方向与原始模型坐标系 $O'x'y'z'$ 的角度,以及 AABB 顶点在分层坐标系下的坐标,确定坐标变换矩阵 T ,模型的点云在分层坐标系下的坐标集合 $V = V' \times T$,坐标变换矩阵 T 包括比例变换矩阵、平移变换矩阵和旋转变换矩阵。

1.2 倾斜工作台空间方程的建立

工作台的水平度对精度有着重要的影响。工作台的倾斜会导致喷头与工作台发生位置干涉,影响喷头的寿命和模型精度。现有的 FDM 工艺的打印机会在打印前对工作台进行测量,若倾斜度过大对其进行调平,若倾斜度过小,很难精确调整;若调整初始层的高度,增厚最底面的填充层,则会导致底层与工作台粘结不牢而导致翘边或者变形。在打印的过程中,因为伺服电机的反向误差、热效应等因素也会造成打印面有一定的倾斜角。

在实际打印中,在构建层切面时考虑工作台的倾斜误差。首先在打印机的分层坐标系下建立工作台的空间平面方程,得到工作台的倾斜度以及倾斜方向,以工作台的平面向上偏移层厚 t 作为第一层层切面,构建不同高度的倾斜平面,对流形网格模型求交。

根据包围盒的大小,在非水平面工作台找到包围盒底面四个顶点分别为 v_0, v_1, v_2, v_3 ,通过激光水平仪来测出两条边 v_0v_1, v_0v_3 与水平面的夹角,进而根据工作台的侧边长度计算出 v_1 点在竖直方向上的高度。已知其中 $v_0(x_0, y_0, z_0)$ 位于水平面 $z = z'$ 内, $z_0 = z'$,测得工作台与水平面的二面角大小为 $\theta(\theta \in \mathbf{R})$,测得 v_1 点在 z 轴方向上的坐标为 z_1 ,与 $z = z'$ 面的偏差为 $\Delta z_1 = z_1 - z'$,假设 v_3 在 z 轴方向上的坐标为 z_3 ,与 $z = z'$ 面的偏差为 $\Delta z_3 = z_3 - z'$,则可以求得平面 P 的方程为

$$\begin{vmatrix} x - x_0 & y - y_0 & z - z_0 \\ x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ x_3 - x_0 & y_3 - y_0 & z_3 - z_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x - x_0 & y - y_0 & z - z_0 \\ x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x - x_3 & y - y_3 & z - z_3 \end{vmatrix} = 0 \quad (1)$$

式中, w , v 分别是平面上 P 从 v_0 到 v_1 、从 v_0 到 v_3 的两个矢量。

$$w = (x_1 - x_0, y_1 - y_0, z_1 - z_0) = (a_1, b_1, c_1)$$

$$v = (x_3 - x_0, y_3 - y_0, z_3 - z_0) = (a_3, b_3, c_3)$$

式中, $c_3 = \Delta z_3 = z_3 - z'$, 是未知量。

平面 P 的法矢量为平面上两个不平行向量的叉积, 可以求得一个指向水平面上方的法矢量 $\mathbf{n}$ 为

$$\mathbf{n} = \mathbf{w} \times \mathbf{v} = (b_1c_3 - c_1b_3, a_1c_3 - c_1a_3, a_1b_3 - b_1a_3) \quad (2)$$

水平面的一个法矢量为 $\mathbf{n}_0(0,0,1)$ 。

二面角 θ 的余弦可以通过 $\mathbf{n}$, $\mathbf{n}_0$ 计算得到

$$\cos\theta = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_0}{|\mathbf{n}| \cdot |\mathbf{n}_0|} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)中, 可以得到式(2)中的未知量 c_3 , 此时得到的 c_3 有正负两个值, 即 $\pm(z_3 - z_0)$, 根据 v_3 在 $z = z'$ 面的上方或者下方, 通过水平仪测得边 v_0v_3 与水平面的夹角为正值时, c_3 为正; 夹角为负值时, c_3 为负。从而得出 z_3 的值, 将其代入式(1)中即可以求得平面 P , 倾斜平面如图 1 所示。

图 1 打印坐标系中工作台的平切有界面

2 双倾斜度概率模型的层切优化方法

2.1 层切面倾斜的误差概率模型

在实际打印过程中, 由于旋合误差、反向旋合背隙、伺服系统热效应等会引起层切面倾斜角 θ 的变化, 经过多次实验, 基于统计学的规律, 可得到不确定因素扰动下每个层切面倾斜角的概率分布模型。

设喷头的位置误差为 δ , 对于 XYZ 型的打印机, 打印喷头在 x 、 y 、 z 轴方向上的误差分量为

$$\begin{cases} \Delta x = \sum_{i=1}^n \alpha_{xi} \delta_i \\ \Delta y = \sum_{i=1}^n \alpha_{yi} \delta_i \\ \Delta z = \sum_{i=1}^n \alpha_{zi} \delta_i \end{cases} \quad (4)$$

$$D_x = \sum_{i=1}^n \alpha_{xi}^2 D(\delta_i) \quad (5)$$

$$D_y = \sum_{i=1}^n \alpha_{yi}^2 D(\delta_i) \quad (6)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \alpha_{zi}^2 D(\delta_i) \quad (7)$$

式中, Δx 、 Δy 、 Δz 分别为喷头位置误差在 x 、 y 、 z 向的分量, α_{xi} 、 α_{yi} 、 α_{zi} 分别为 x 、 y 、 z 向的误差比例系数, δ_i 运动机构反向背隙、运动副旋合误差等引起的误差, $D(\delta_i)$ 为位置误差的方差, D_x 、 D_y 、 D_z 为 x 、 y 、 z 向误差的方差。

喷头的运动机构的定位误差, 是一个随机量, 喷头在误差范围内的均值为 0, 喷头的定位误差会导致在 x 、 y 方向上层切面与水平面夹角 α 、 β 的变化, 引起实际打印中层切面倾斜角 θ 的变化。根据概率理论, 误差总和由大量的相互独立的随机因素的综合影响形成的, 其中每一个因素在总体影响中起的作用都是微小的, 这种随机变量近似服从正态分布, 对包含大量层切面的整个模型考虑, z 向偏差近似服从正态分布

$$E(\Delta z) = 0 \quad (8)$$

$$D(\Delta z) = \sum_{i=1}^n \alpha_{zi}^2 D(\delta_i) \quad (9)$$

有界矩形层切面在 x 、 y 方向上的长度分别为 l_1 , l_2 , 在 x 方向上, 层切面与水平面的夹角 α 的正切值概率密度

$$\tan \alpha = \frac{2\Delta z}{l_1} \quad (10)$$

$$f(\tan \alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{(\tan \alpha - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) \quad (11)$$

$$\mu_1 = E(\Delta z) = 0 \quad (12)$$

$$\sigma_1 = \frac{4D(\Delta z)}{l_1^2} = \frac{4}{l_1^2} \sum_{i=1}^n \alpha_{zi}^2 D(\delta_i) \quad (13)$$

同理, 在 y 方向上, 层切面与水平面的夹角 β 的正切值概率密度

$$\tan \beta = \frac{2\Delta z}{l_2} \quad (14)$$

$$f(\tan \beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left(-\frac{(\tan \beta - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad (15)$$

$$\mu_2 = E(\Delta z) = 0 \quad (16)$$

$$\sigma_2 = \frac{4D(\Delta z)}{l_2^2} = \frac{4}{l_2^2} \sum_{i=1}^n \alpha_{zi}^2 D(\delta_i) \quad (17)$$

层切面和水平面的倾斜角 θ

$$\theta = \arccos \frac{1}{\sqrt{\tan^2 \alpha + \tan^2 \beta + 1}} \quad (18)$$

将式(18)变形

$$\frac{1}{\cos^2 \theta} - 1 = \tan^2 \alpha + \tan^2 \beta \quad (19)$$

令 $x = \tan^2 \alpha + \tan^2 \beta$, x 满足广义卡方分布, x 的概率密度分布

$$f(x) = \sum_{i=1}^2 \frac{\exp(-x/\sigma_i^2)}{\sigma_i^2 \prod_{j=1, j \neq i}^2 (1 - \sigma_j^2/\sigma_i^2)} \quad (20)$$

层切面倾斜角 θ 小于设定最大误差角 θ_i

$$\frac{1}{\cos^2 \theta} - 1 \leq \frac{1}{\cos^2 \theta_i} - 1 \quad (21)$$

可推算出 θ 小于设定最大误差角 θ_i 的概率

$$P(x \leq 1/\cos^2 \theta_i - 1) = \int_0^{1/\cos^2 \theta_i - 1} f(x) dx \quad (22)$$

2.2 增厚方向倾斜的倒圆锥模型

在打印的过程中, 若相邻层切面之间的模型看作是直棱柱, 其横截面与底面层切面的轮廓多边形相同。如图 2 所示, 因为喷头在 z 方向上存在误差 Δx 、 Δy , 相邻层切面之间的直棱柱有一定概率会发生倾斜, 不发生偏斜的形心点在 O_1 , 发生偏斜后的形心点在 O_1' , 使得喷头的 z 向进给运动与 z 轴正向存在一定的角度 γ , 对每个发生偏斜的棱柱, 其侧面积

$$S_s' = \sum_{i=1}^n l_i \cdot t' \quad (23)$$

式中, l_i 为棱柱第 i 个面的边长; t 为高度; S_s' 为斜棱柱的侧面积。

因为倾斜后高度和底面的面积没有发生变化, 根据 Cavalieri 原理, 其体积不变。在层切面上 Δx 、 Δy 在 z 轴为中心的区域上, 即图 2 中得圆 C 内部区域, 满足二维正态分布, 可求其联合概率密度

$$f(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\frac{(\Delta x - \mu_3)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(\Delta y - \mu_4)^2}{\sigma_2^2} - \frac{2\rho(\Delta x - \mu_3)(\Delta y - \mu_4)}{\sigma_1\sigma_2} \right] \right\} \quad (24)$$

式中, ρ 为 Δx 、 Δy 的相关系数; μ_3 、 μ_4 为 Δx 、 Δy 的均值; σ_1 、 σ_2 为 Δx 、 Δy 的方差。

喷头 z 向进给运动与 z 轴正向的夹角 γ 和 x 、 y

向误差的关系

$$\tan \gamma = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{t} \quad (25)$$

若偏斜角 γ 的阈值为 $\gamma_{\max}$, 打印时满足要求的概率

$$P(\gamma \leq \gamma_{\max}) = \iint_{\Delta x^2 + \Delta y^2 \leq t \cdot \tan^2 \gamma} f(\Delta x, \Delta y) d\Delta x d\Delta y \quad (26)$$

图 2 增厚方向倾斜的倒圆锥概率模型

2.3 计算倾斜层切面 z 向数值区间

根据要分的层数 N_{layer} , 模型包围盒 z 方向长度 l_3 , 确定平均层厚 t 。以对应高度的模型横截面形心上的点为层切面上的点, 依据概率模型计算法矢量方向, 得到层切面方程, 来截交流形网格模型。设在层数为 i 时, 层切面形心点的坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 法矢量为 $\mathbf{n}_i$, 则可以得到第 i 层的层切面方程

$$(x - x_i, y - y_i, z - z_i) \cdot \mathbf{n}_i = 0 \quad (27)$$

将所有层切面方程集合, 形成层切平面集 Ω 。再计算每个层切面中 z 向的范围。对于平面方程, 转化为 $z = f(x, y)$ 的形式, 平面的梯度

$$\text{grad} f(x, y) = \left\{ \frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right\} = f_x(x, y)\mathbf{i} + f_y(x, y)\mathbf{j} \quad (28)$$

对于有界倾斜平面, $\text{grad} f(x, y)$ 在平面上都相同, 沿着梯度的方向, z 值增大最快; 反方向, z 值减小最快, 因为层切面为矩形平行四边形, 因此使 z 出现极值的点一定在顶点上。确定层切面的最高点和最低点可求出 z 向的范围。

(1) $\mathbf{n}_i$ 中 x 坐标为正, y 坐标为负, 即 $b_1c_3 - c_1b_3 < 0$ 、 $a_1c_3 - c_1a_3 > 0$, 此时平面 z 向最大值为 v_3 点的 z 坐标, 最小值为 v_1 点的 z 坐标

$$z_{\max} = z_3 \quad z_{\min} = z_1$$

(2) $\mathbf{n}_i$ 中 x 、 y 坐标为负, 即 $b_1c_3 - c_1b_3 > 0$ 、 $a_1c_3 - c_1a_3 > 0$, 此时平面 z 向最大值为 v_2 点的 z 坐标, 最小值为 v_0 点的 z 坐标

$$z_{\max} = z_3 + l_1 \cdot \tan \alpha \quad z_{\min} = z_0$$

(3) $\mathbf{n}_i$ 中 x 、 y 坐标为正, 即 $b_1c_3 - c_1b_3 < 0$ 、 $a_1c_3 - c_1a_3 < 0$, 此时平面 z 向最值

$$z_{\max} = z_0 \quad z_{\min} = z_3 - l_1 \cdot \tan \alpha$$

(4) $\mathbf{n}_i$ 中 x 、 y 坐标为正, 即 $b_1c_3 - c_1b_3 < 0$ 、 $a_1c_3 - c_1a_3 < 0$, 此时平面 z 向最值

$$z_{\max} = z_1 \quad z_{\min} = z_0 - l_1 \cdot \tan \alpha$$

第 i 层层切平面的 z 方向范围根据条件(1)~(4)求出。

2.4 避免相邻成形层干涉的极限倾角

采用倾斜层切面的方式, 当倾斜角过大时, 可能与上下层相干涉, 引起打印粘连。因此在打印之前应自适应确定模型的极限打印方向, 以避免层切面之间发生干涉。如图 3 所示, 层切面不发生干涉时

$$\Omega_i \cap \Omega_{i+1} = \emptyset \quad i=1, 2, \dots, N_{\text{layer}} - 1 \quad (29)$$

设相邻两个层切面的法矢量为 $\mathbf{n}_i$ 、 $\mathbf{n}_{i+1}$, 层切面为有界平行四边形, 两个层切面之间的夹角

$$\varepsilon = \arccos \frac{|\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_{i+1}|}{|\mathbf{n}_i| |\mathbf{n}_{i+1}|} \quad (30)$$

在分层的过程中, 为了避免某一层切面角度过大, 对之后切面分层角度造成较大限制, 因此, 设定层切面倾斜极限角度 $\theta_{\max}$ 。对其中某一层切面, 当其上下相邻两侧切面没有发生倾斜时, 其不能与上下切面发生干涉, 当下层层切面水平, 上层层切面倾斜时, 离形心点最远的顶点首先与上下切面发生干涉

$$\tan \varepsilon_{\max} = \frac{t}{\sqrt{\left(\frac{l_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_2}{2}\right)^2}} \quad (31)$$

其中 l_1 、 l_2 为模型矩形包围盒的边长, t 为分层层厚。可以得到层切面最大倾斜角度

$$\varepsilon_{\max} = \arctan \frac{2t}{\sqrt{l_1^2 + l_2^2}} \quad (32)$$

减小层厚 t 可以减少模型打印过程中的阶梯效应, 随着层厚的减小, 相邻层切面法矢量 $\mathbf{n}_i$ 、 $\mathbf{n}_{i+1}$ 、相差角度越大, 越易发生干涉。当相邻层切面均倾斜时, 由 2.3 节可以找出有界平面 Ω_i 的最高点 $v_{\max}$, 不妨设为 $(l_1/2, l_1/2, z_{\max})$, 分别为 $AABB$ 在 x 、 y 方向的长度, O_1 的坐标为 $(0, 0, i \cdot t)$, 可以求出 $O_1v_{\max}$ 与

O_1O_2 的角度 ξ , 相邻层切面 Ω_i 与 Ω_{i+1} 的角度最大时 Ω_{i+1} 与水平面的夹角

$$\sin \theta_{i+1} = \frac{t - \cos \xi \cdot |\mathbf{o}_1|}{|\mathbf{o}_2|} \quad (33)$$

式中, $\mathbf{o}_2 = O_2v_{\max} = (l_1/2, l_2/2, z_{\max} - it - t)$, $\mathbf{o}_1 = O_1v_{\max}$ 。

此时, 平面层切面 Ω_i 与 Ω_{i+1} 有最大夹角

$$\varepsilon_{\text{limit}} = \frac{\pi}{2} - \xi + \theta_{i+1} \quad (34)$$

相邻层切面 Ω_i 与 Ω_{i+1} 之间的夹角应满足 $(0, \varepsilon_{\text{limit}})$ 才不会发生干涉。

图 3 相邻层切平面发生干涉的临界状态

3 层次智能筛选的面片集与面片环

3.1 筛选有向面片集

在确定分层切面的 z 向范围之后, 需要获得与各层切平面相交的面片, 通过分块使面片属于不同的层, 从而保证在分层处理时只有属于当前层切面的面片参与求交点运算。

(1) 首先对面片进行初步筛选。对所有的面片按照最低点的值 $z_{j,\min}$ (j 为面片编号) 进行升序排序, 最小值相同, $z_{j,\max}$ 大的面片排在前面。从下到上逐层进行层切, 分到第 i 层切面时, 首先从序列中确定在第 i 层 $z_{\min}$ 和 $z_{\max}$ 之间的 $z_{j,\min}$, 若 $z_{j,\min} > z_{\max}$, 则直接排除序列中该面片之后的所有面片, 如图 4 中面片 f_1 , $z_{1,\min} > z_{\Omega,\max}$, 则该面片不与层切片相交, 排除该面片及其序列后的面片。

(2) 若 $z_{j,\min} \leq z_{\max}$, 则比较 $z_{j,\max}$ 和 $z_{\min}$ 的大小, 若 $z_{j,\max} < z_{\min}$, 则直接排除该面片, 如图 4 中 f_2 ; 若 $z_{j,\max} \geq z_{\min}$, 说明面片有一部分在层切面的最小值和最大值之间, 进入步骤(3)。

(3) 判断面片与层切平面 Ω_i 是否相交。首先分别确定面片 f_i 中的三个顶点 z 坐标的最小值和最大值所对应的 x 、 y 轴坐标，将面片最低点 x 、 y 轴坐标，代入平面 Ω_i 的方程中，可以得到一个平面的 z 值 $z_{\Omega,1}$ ，比较 $z_{j,\min}$ 和 $z_{\Omega,1}$ 的大小，判断最低点和平面的位置关系。同理，将面片的最高点的 x 、 y 轴坐标代入平面的方程中，得到的 z 值 $z_{\Omega,2}$ ，比较 $z_{j,\max}$ 和 $z_{\Omega,2}$ ，记录这两个顶点与层切面片的位置关系，进入步骤(4)。

(4) 当面片的最低点和最高点位于平面两侧时 $(z_{j,\max} - z_{\Omega,2})(z_{j,\min} - z_{\Omega,1}) < 0$ ，则面片与平面相交，如图4中 f_3 。当面片的最高点和最低点位于平面同侧时， $(z_{j,\max} - z_{\Omega,2})(z_{j,\min} - z_{\Omega,1}) > 0$ ，将面片的第三个点的 x 、 y 轴坐标代入到平面的方程中，若三个点都在平面 Ω_i 的同一侧，则此面片不与平面相交，如图4中 f_4 、 f_5 ， f_4 的三个点都在层切面下方，不与层切面相交，需要排除。 f_5 的中间点在层切面下方，最大值和最小值点在层切面上方，与层切面相交，记录该面片。

(5) 若 $z_{j,\min} = z_{\Omega,1}$ ，或 $z_{j,\max} = z_{\Omega,1}$ 即其中一个极值点在层切面上，检测另外两个点的坐标，若另外两个点不在层切面上，则排除这个面片；若另外两个点有一个在层切面上，则面片的一条边与层切面相交；若另外两个点都在层切面上，即面片与层切面重合，进入步骤(6)。

(6) 记录满足要求的面片集 $M_i (i=1,2,\dots,N_{\text{layer}})$ 记录下来，接下来对打印顺序的下一层切面按照此方法进行筛选，直至当前层 Ω_i 分层完成。

图4 层切面与面片五种空间几何关系

3.2 构建有向面片环

拓扑同胚，是指两个拓扑空间有一对一的映射，并且这个映射是连续并且可逆的，则这两个空间同胚。在模型中的每个层切面上，层切面与面片的交线所构成的轮廓多边形，与该层切面上的所有面片所含的拓扑信息相同。

筛选出层切面的相交面片集后，为了构建出层切面的轮廓多边形，建立面片之间的邻接拓扑信息。在流形网格模型中，即每个面片都有三个共边的邻接面片。平面多边形环由相邻边的三角形依次相连，首尾面片重合的拓扑结构形成。三角面片与层切面的交线由面片与层切面交点的连线得到，将多个三角形为与层切面的交线相连即得到模型的轮廓多边形。每层筛选出的面片至少可以构成一个环，模型的形态不同，每层有一个或多个互不连通的平面域，这些面片会构成多个互不相交中环。

对于某一层切面筛选出的面片集 M_i ，面片与层切面的关系有三种：(1)面片与层切面重合；(2)面片的一条边在层切面上；(3)面片被层切面分割成上下两个部分。

设面片集 M_i 中的一个面片的两个顶点分别为 $v_4(x_4, y_4, z_4)$ 、 $v_5(x_5, y_5, z_5)$ ，可以得到其中一条边的方程为

$$\frac{x-x_4}{x_5-x_4} = \frac{y-y_4}{y_5-y_4} = \frac{z-z_4}{z_5-z_4} \quad (35)$$

将式(35)和切平面方程联立可以求出交点坐标，同理求出另外一个交点，两个交点的连线为面片与层切面的交点。

网格面片环方向的确定：首先对每一层面片建立邻接拓扑关系。两个三角形有共边邻接关系，将其邻接关系储存到哈希邻接表中。选定某一面片作为初始面片，形成的轮廓环的方向可以由分层方向和面片的法矢量的叉积来确定， $D = Z \times n_f$ 其中 Z 为分层方向， n_f 为面片的法矢量，如图5中， f_7 法矢量 n_f 指向为外侧， D 为形成的轮廓环的方向，下一个邻接面片为 f_8 。依次递归遍历求出下一个邻接面片，直到找到的为初始面片，则构建完成一个环，若同一层切面上还有面片未被遍历，则继续构建其余的面片环。直到当前层切面的面片全部被遍历，获得当前层的环的数目 N_{loop} 。

图5 层切求交网格面片环遍历方向

3.3 内外环的判别与连通域构建

在创建网格面片环时，按照一定的方向来遍历邻接面片，形成的轮廓环的方向根据模型表面面片

的指向来判断。若轮廓环是外表面,则构建的轮廓环为逆时针方向的,如图 6a 中 L_1 为外表面环,按照右手法则,逆时针方向的环形轮廓在分层坐标系中会有一个 z 轴正向法矢量,方向在图 6a 中垂直纸面向外;若为 1 层内表面环,如图 6a 中 L_5 ,则轮廓环是顺时针的方向,在分层坐标系中会有一个 z 轴负向的法矢量。判断出内外表面后,根据包含关系来确定内外,不被包含的环为最外环,从最外侧向里,一层内环一层外环来确定各环的空间位置。

(a) 多个嵌套环模型层切面轮廓

(b) 识别内外环后截面图

图 6 层切面内外环识别

通过内外环的判别方法,如图 6a 环 L_1 的形心为(79.999 8, -50.000 0),面积为 12 556.712 2 mm²。检测内外环得到的截面如图 6b 所示,其形心为(72.544 2, -49.960 5),面积为 8 699.199 3 mm²。

可以计算出轮廓多边形的周长

$$l_s = \sum_{k=1}^n l = \sum_{k=1}^n \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2} \quad (36)$$

式中, l_s 是轮廓多边形的周长; l 是轮廓多边形每个边的长度; x_k 是第 k 个顶点的 x 坐标; y_k 是第 k 个顶点的 y 坐标。多边形的顶点按照逆时针顺序排列。

3.4 残余高度及体积误差

实际打印中将相邻层切面之间的模型看成上下棱柱,这样会损失模型一部分体积信息,增大打印件 SE。在理想情况下,层切面为水平面时,模型的表面与竖直方向有一定的倾斜角度 λ ,会产生 SE,

可推算每层最大残余高度 h

$$h = t \cos \lambda \quad (37)$$

当层切面为非水平面,与水平面的夹角为 θ 时

$$h = t \cos(\theta + \lambda) \quad (38)$$

从式(38)可知残余高度 h 和分层层厚有关,分层越多,层厚越小,残余高度也越小在打印时,因为阶梯效应的原因,打印得到的实物和模型不仅在表面精度上有残余高度,也有体积误差,如图 7 所示。网格模型的体积可用下式计算。

$$V_0 = \int_V 1 = \frac{1}{3} \int_{\partial V} \mathbf{x} \cdot \mathbf{n} = \frac{1}{3} \sum_i \int_{A_i} \mathbf{a}_i \cdot \mathbf{n}_i = \frac{1}{6} \sum_i \mathbf{a}_i \cdot \mathbf{n}_i \quad (39)$$

式中, A_i 为多边形的面片, $\mathbf{a}_i$, $\mathbf{b}_i$, $\mathbf{c}_i$ 为面片的三个有序顶点,用来在数据结构中表示不同的面片, $\mathbf{n}_i = \mathbf{n}_i' / |\mathbf{n}_i'|$, $\mathbf{n}_i' = (\mathbf{a}_i - \mathbf{b}_i) \times (\mathbf{a}_i - \mathbf{c}_i)$ 为面片的法矢量。

图 7 打印模型与实际模型的分层体积误差

打印模型的体积,是将模型看成经过层切面切成多个多面体,将每个多面体近似成棱柱来计算。任一棱柱,其底面面积 S_c 为模型层切横截面的面积

$$S_c = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (x_k y_{k+1} - x_{k+1} y_k) \quad (40)$$

式中, n 为多边形的边的数量, x_k 为第 k 个顶点的横坐标, y_k 为第 k 个顶点的纵坐标。其中多边形的顶点按照逆时针顺序排列。

单层棱柱体积 V_p 的计算

$$V_p = S_c \times t \quad (41)$$

可以得到模型分层的体积误差

$$\delta_v = \frac{V_0 - V_p}{V_0} \quad (42)$$

图 8 为基于 DIP 的流形模型 3D 打印层切优化方法流程图。

图 8 基于 DIP 的流形模型 3D 打印层切优化方法流程图

4 实例

以人体颈椎(第二颈椎骨)结构模型为例, 包括齿突、横突和棘突等结构。采用基于双倾斜度概率流形模型 3D 打印层切优化方法, 在 Windows 环境下进行试验验证。图 9a 为人体颈椎医学 CT 图, 图 9b 为人体脊椎示意图, 图 9c 为流形网格模型, 初始模型的 ABB 包围盒在分层坐标系下的顶点极值坐标为 $[x_{\min}, y_{\min}, z_{\min}, x_{\max}, y_{\max}, z_{\max}] = [9.473\ 1, -35.833\ 0, 10.571\ 7, 50.120\ 9, 4.103\ 0, 38.496\ 5]$ (长度单位均为 mm, 下同), 分层行程空间 l_1, l_2, l_3 分别为 40.647 8, 39.936 0, 27.924 8, 模型的质心坐标为 (31.514 9, -10.339 0, 21.991 0), 总表面积为 3 375.515 5, 体积为 6 205.316 1。最小体积外接圆柱轴线在 z 向积聚投影为 (29.797 0, -15.865 0), 半径为 28.491 8, 高径比为 0.490 1。投影面积, 向 Oxy 面为 1 801.705 2, 向 Oxz 面为 1 768.495 3, 向 Oyz 面为 1 500.541 7。确定打印方向为模型 z 向。

图 10 是优化前后的流形网格模型切片线框图。图 10a、10c、10e 分别为优化前的分层数为 100、150、200 时的线框图, 图 10b、10d、10f 分别为优化后的 100、150、200 分层的线框图。图 10a 中, 第 11、26 层, 环数 N_{loop} 最多, 有 5 个环, 环周长 l_s (mm) 总和为 5 052.091, l_s 在第 35 层最大, 为 209.134 6。图 10b 中, 第 24 层有最多环数, l_s 总和为 5 325.260 7, l_s 在第 35 层最大, 为 198.403 9。图 10c 中, N_{loop} 在第 36 层最大, l_s 总和为 7 938.056 4, l_s 在第 55 层最大, 为 209.204 2。图 10d 中, N_{loop} 在第 36 层最大 (5 个), l_s 总和为 8 238.538 4, l_s 在第 35 层最大为 209.181 7。图 10e 中, N_{loop} 在第 31-33 层最大, l_s 总和为 9 837.356 6, l_s 在第 43 层最大, 为 209.134 6。图 10f 中, N_{loop} 在第 54 层最大, l_s 总和为 11 049.873 9, l_s 在第 73 层最大, 为 208.978 8。

从图 10 可以看出, 当模型有孔洞的时候, 本文提出的层切优化方法能够得到更平滑、一致的截交线。

图 11 为优化前后的多面体棱柱体积模型图。图 11a、11c、11e 分别为优化前 100、150、200 分层体积模型, 图 11b、11d、11f 分别为优化后 100、150、200 分层的多面体棱柱体积模型图。图 11a 中, 层切面之间多面体的体积 V_p (mm³) 在第 42 层有最大值, 为 167.449, V_p 总和为 5 962.595, V_p 的标准差为 59.1139。图 11b 中, V_p 在第 38 层有最大值, 为 165.373, V_p 总和为 6 205.443, V_p 的标准差为 56.537 1。图 11c 中, V_p 在第 55 层有最大值, 为 110.012, V_p 总和为 5 991.668, V_p 的标准差为 37.963 8。图 11d

中, V_p 在第 56 层有最大值, 为 110.016, V_p 总和为 6 205.443, V_p 的标准差为 37.501 8。图 11e 中, V_p 在第 73 层有最大值, 为 85.373, V_p 总和为 6 050.762,

V_p 的标准差为 28.053 2。图 11f 中, V_p 在第 75 层有最大值, 为 82.313 6, V_p 总和为 6 205.059, V_p 的标准差为 27.485 9。

图 9 人体枢椎(第二颈椎骨)结构模型

图 10 优化前后的流形网格模型切片线框图

图 12 是优化前后的各层最大残余高度图。图 12a、12c、12e 为优化前分层层数为 100、150、200 各层残余高度图，图 12b、12d、12f 为优化后分层层数为 100、150、200 各层残余高度图，图 12a 中，每层残余高度 $h(\text{mm})$ 的最大值在第 71 层，为 0.281

8，总和为 23.846 2，标准差为 0.060 9。图 12b 中， h 的最大值在第 37 层，为 0.281 9，总和为 23.810 9，标准差为 0.003 7。图 12c 中， h 的最大值在第 17 层，为 0.187 4，总和为 23.563 4，标准差为 0.044 5。图 12d 中， h 的最大值在第 34 层，为 0.187 1，总

图 11 优化前后的多面体棱柱体积模型图

和为 23.609 5, 标准差为 0.044 1。图 12e 中, h 的最大值在第 142 层, 为 0.140 2, 总和为 23.840 4, 标准差为 0.032 4。图 12f 中, h 的最大值在第 142 层, 为 0.140 2, 总和为 23.685 6, 标准差为 0.030 2。

通过比较可以看出, 同样的分层层数下, 采用 DIP 方法的残余高度有所降低, 相邻层切面轮廓间的变化相对较小, 在打印时相邻层之间过渡平滑,

能够减小倾斜模型的 SE。

图 13 为粉末成形 3D 打印设备及制件模型。

表 1 为层切面倾斜和增厚方向倾斜的分层方法残余高度比较, 采用本文的基于双倾斜度概率层切优化方法在分层为 100 层和 200 层时, 每层残余高度明显降低, 并且总体残余高度的方差更小, 说明采用本文方法打印出的制件的表面精度更高。

图 12 优化前后的各层最大残余高度图

图 13 层切优化方法的粉末成形 3D 打印试验

表 1 层切面倾斜和增厚方向倾斜的分层方法残余高度比较

分层层数	倾斜类型		未采用 DIP 的 切片	本文提出的 DIP 的 层切优化	改进率(%)
100	层切面倾斜变化时/(°)	最大	0.527 8	0.474 4	10.12
		平均	0.221 2	0.199 5	9.83
		方差	0.020 7	0.018 9	8.89
	增厚方向倾斜变化时/(°)	最大	0.531 8	0.486 2	8.57
		平均	0.233 8	0.215 1	7.99
		方差	0.021 8	0.020 1	7.81
200	层切面倾斜变化时/(°)	最大	0.261 3	0.238 0	8.91
		平均	0.110 1	0.100 5	8.76
		方差	0.005 1	0.004 7	8.75
	增厚方向倾斜变化时/(°)	最大	0.263 2	0.240 5	8.61
		平均	0.114 7	0.105 8	7.73
		方差	0.005 1	0.004 7	7.66

5 结论

(1) 提出了基于双倾斜度概率的流形模型 3D 打印层切优化方法, 同时考虑了层切面倾斜和增厚方向倾斜的双重因素, 对不同结构、不同性能打印机建立了 DIP 模型, 可提高 3D 打印模型的层间稳定性和表面精度。

(2) 考虑丝杠螺母运动副旋合误差、反向旋合背隙、伺服系统热效应等因素, 构建了关于倾斜角的复合变量, 建立广义卡方分布的概率密度函数和概率模型。在层切面倾斜度概率模型的基础上, 进一步建立了增厚方向倾斜的正态概率分布模型。

(3) 提出了相邻层切面干涉的检验方法, 运用面片分块法和层次智能筛选面片, 确定与各层切平面相交的面片, 实现了层切多连通域的快速构建。以人体枢椎骨为例进行 3D 打印物理试验验证, 打印件残余高度最大降低 10.12%, 阶梯效应得到抑制, 证明本文方法可提高不确定因素扰动下的 3D 打印成形精度。

参 考 文 献

- [1] WANG X, JIANG M, ZHOU Z, et al. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective[J]. *Composites Part B Engineering*, 2016, 110: 442-458.
- [2] ALLEN R J A, 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.
- [3] LIM S, BUSWELL R A, VALENTINE P J, et al. Modelling curved-layered printing paths for fabricating large-scale construction components[J]. *Additive Manufacturing*, 2016, 12: 216-230.
- [4] TUMBLESTON J R, SHIRVANYANTS D, ERMOSHKIN N, et al. Additive manufacturing. Continuous liquid interface production of 3D objects[J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1349-1352.
- [5] MARTIN J H, YAHATA B D, HUNDLEY J M, et al. 3D printing of high-strength aluminium alloys[J]. *Nature*, 2017, 549(7672): 365-369.
- [6] MINETTO R, VOLPATO N, STOLFI J, et al. An optimal algorithm for 3D triangle mesh slicing[J]. *Computer-Aided Design*, 2017, 92: 1-10.
- [7] ZHOU H F, OU Y X, HE Y H, et al. Data generation of layer slice in FDM manufacturing[M]. PARIS: Atlantis Press, 2017: 105, 419-424.
- [8] XULONG M A, FENG L, BO Y. Fast parallel algorithm for slicing stl based on pipeline[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(3): 549-555.
- [9] SONG Y, YANG Z, LIU Y, et al. Function representation based slicer for 3D printing[J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2018, 62: 276 - 293.
- [10] ZENG L, LAI M L, QI D, et al. Efficient slicing procedure based on adaptive layer depth normal image[J]. *Computer-Aided Design*, 2011, 43(12): 1577-1586.
- [11] MA W, BUT W C, HE P. NURBS-based adaptive slicing for efficient rapid prototyping[J]. *Computer-Aided Design*, 2004, 36(13): 1309-1325.
- [12] HUANG B, SINGAMNENI S B. Curved layer adaptive slicing (CLAS) for fused deposition modelling[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2015, 21(4): 354-367.
- [13] HOPE R L, ROTH R N, JACOBS P A. Adaptive slicing with sloping layer surfaces[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 1997, 3(3): 89-98.
- [14] MAO Y, WU L, YAN D M, et al. Generating hybrid interior structure for 3D printing[J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2018, 62: 63-72.
- [15] LIND J U, BUSBEE T A, VALENTINE A D, et al. Instrumented cardiac microphysiological devices via multimaterial three-dimensional printing[J]. *Nature Materials*, 2017, 16(3): 303-308.
- [16] ZHANG Y S, YUE K, ALEMAN J, et al. 3D bioprinting for tissue and organ fabrication[J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2017, 45(1): 148-163.
- [17] LI L, YU F, SHI J, et al. In situ repair of bone and cartilage defects using 3D scanning and 3D printing[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 9416.
- [18] JANG J, PARK H J, KIM S W, et al. 3D printed complex tissue construct using stem cell-laden decellularized extracellular matrix bioinks for cardiac repair[J]. *Biomaterials*, 2017, 112: 264-274.
- [19] HIRT L, REISER A, SPOLENACK R, et al. Additive manufacturing of metal structures at the micrometer scale[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(17): 1604211.
- [20] BHATTACHARJEE N, URRIOS A, KANG S, et al. The upcoming 3D-printing revolution in microfluidics[J]. *Lab on A Chip*, 2016, 16(10): 1720.
- [21] ZHANG S, XU J, GOU H, et al. A research review on the key technologies of intelligent design for customized products[J]. *Engineering*, 2017, 3(5): 631-640.
- [22] 徐敬华, 盛红升, 张树有, 等. 基于邻接拓扑的流形网格模型层切多连通域构建方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2018, 30(1): 180-190.
- XU Jinghua, SHENG Hongsheng, ZHANG Shuyou, et al. A method of constructing layered multi-connected domains for manifold mesh model based on adjacency topology[J]. *Journal of Computer-Aided Design &*

Computer Graphics, 2018, 30(1): 180-190.

- [23] 徐敬华, 李俊涛, 盛红升, 等. 一种三维打印平台的调平系统及其测距装置与调平方法: 中国, 201710461594.X[P]. 2019-01-09.

XU Jinghua, LI Juntao, SHENG Hongsheng, et al. A leveling system and distance measuring equipment and leveling method of three dimensional printing device: China, 201710461594.X[P]. 2019-01-09.

作者简介: 徐敬华, 男, 1979 年出生, 副教授。主要研究方向为增材制

造多尺度形态优化。

E-mail: xujh@zju.edu.cn

任新华, 男, 1996 年出生。主要研究方向为 3D 打印几何学。

E-mail: 21725106@zju.edu.cn

陈前勇, 男, 1993 年出生, 博士研究生。主要研究方向为计算机辅助设计。

E-mail: 11625067@zju.edu.cn

张树有(通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为产品数字化设计、计算机图形学、制造业信息化关键技术。

E-mail: zsy@zju.edu.cn

谭建荣, 男, 1954 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为产品设计理论。

E-mail: egi@zju.edu.cn