DOI: 10.3901/JME.2021.21.269

基于微滴喷射的3DP工艺中渗透误差补偿算法*

杨伟东^{1,2} 高翔宇¹ 刘卫胜^{1,2} 檀润华² 张争艳^{1,2}

(1. 河北工业大学机械工程学院 天津 300401;

2. 河北工业大学国家技术创新方法与实施工具工程技术研究中心 天津 300401)

摘要: 在微滴喷射3DP工艺中,由于粘结剂渗透引起的误差是影响打印模型精度的主要因素之一,为了得到高精度的打印模型,减小渗透误差的影响,需要对渗透误差进行补偿。因此,针对微滴喷射工艺渗透误差提出了一种补偿算法,将渗透误差分解成为Z方向以及XY方向的两个分量后,依次对它们进行补偿。采用基于点偏移的补偿方法对Z方向渗透误差分量进行补偿,保证了STL模型补偿前后的完整性,简化了计算模型,实现了Z方向误差的补偿。然后采用基于分层平面偏移的分层补偿方法对XY方向渗透误差分量进行补偿,在分层过程中依据STL模型每个层面上三角面片角度特征进行相对应的分层平面偏移的补偿计算,实现了STL模型XY方向渗透误差分量的补偿。经过试验验证:通过先后对设计样件进行Z方向渗透误差分量补偿与XY方向渗透误差分量补偿计算,实现了对STL模型的渗透误差补偿功能。补偿后的尺寸误差以及圆度误差明显减少,综合补偿后打印样件尺寸更加接近设计尺寸,使其精度得到了提升。

关键词: 3DP工艺; 渗透误差; 误差补偿; 打印精度

中图分类号: TH164

The Compensation Algorithm of Infiltration Error of the Droplet Injection in 3DP Technique

YANG Weidong^{1,2} GAO Xiangyu¹ LIU Weisheng^{1,2} TAN Runhua² ZHANG Zhengyan^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401;

2. National Engineering Research Center for Technological Innovation Methods and Tool, Hebei University of Technology, Tianjin 300401)

Abstract: In the 3DP process based on microdroplet jetting, the error caused by binder penetration is one of the main factors affecting the accuracy of the printing model. In order to obtain a high-precision printing model and reduce the influence of the infiltration error, the infiltration error should be compensated. For this reason, a compensation algorithm for the permeability error of microdroplet injection process is put forward. The penetration error is decomposed into two components of Z direction and XY direction, and then they were compensated one by one. The compensation method based on point migration is adopted to compensate error component in Z direction infiltration, which ensures the integrity of STL model before and after compensation, simplifies the calculation model, and realizes the high-efficiency compensation of Z direction error. Then, the stratified compensation method based on the stratified plane migration is used to compensate the infiltration error component in XY direction. In the stratification process, the corresponding stratified plane migration is calculated according to the angle characteristics of the triangular surfaces on each layer of the STL model, and the compensation of the infiltration error component in XY direction of the STL model is realized. The experiments verify that the function of infiltration error compensation for STL model can be realized through the calculation of infiltration error component compensation in Z direction and XY direction for the design sample successively. After compensation, the size error and roundness error are significantly reduced. After comprehensive compensation, the sizes of the printed sample are closer to the design sizes, so that their precision is improved.

Key words: 3DP process; infiltration error; error compensation; printing accuracy

* 国家自然科学基金青年基金(61802108)、河北省自然科学基金专项(E2017202296)和河北省自然科学基金(E201602297)资助项目。20201201收到初稿, 20210608收到修改稿

0 前言

3DP 工艺首先通过离散的方式将要进行打印的模型切片化,然后将每一层中需要打印的路径输入到计算机中,通过计算机控制打印机的逐层打印。由于成型工艺的不同,所以相对于传统的制造工艺,3DP 工艺包括了三维模型建造、切片化、逐层打印、后处理等工艺。但是受打印工艺的限制,3DP 工艺的质量会受到多方面因素的影响,其打印精度不高,打印制件的误差较大。为了减小打印误差,提高制件精度,国内外学者进行了大量相关研究。

目前大部分 3DP 工艺使用 STL 格式的文件进行样件制造。STL 文件格式是使用一系列离散的三角面片来拟合 CAD 模型曲面模型,STL 文件没有保留完整的 CAD 模型的几何信息,导致在三角面片贴合模型曲面时会产生近似误差^[1]。当拟合曲面的三角面片越大,其误差越大,而缩小三角面片则会增加 STL 文件的数据量,增加处理难度。为了消除 STL 模型自身性质带来的近似误差,文献[2-6]不再使用 STL 模型,而是直接对 CAD 几何模型进行处理,得到打印所需的层面信息。对于无法得到原始 CAD 文件的情况,张争艳等^[7]提出基于 R-B 树的点聚合算法以及应用 Hermite 空间插值将 STL 模型全局细分方法,进一步提高了 STL 模型的精度,解决了需要打印 STL 模型时精度无法满足要求的问题。

基于微滴喷射的 3DP 工艺过程中粘结剂渗透误差是影响打印精度的一个非常重要的因素。文献[8-10]从粘结剂喷射 3D 打印过程中粘结剂含量等相关参数入手分析了粘结剂饱和度对打印零件表面精度的影响,并通过控制打印过程中渗透打印材料的粘结剂含量来提高表面精度。马旭龙^[11]针对 PCM 工艺中液滴渗透各向异性的尺寸误差提出渗透半椭球误差模型,并给出了基于 STL 模型各向异性补偿方法,减小了 PCM 工艺中由粘结剂渗透引起的各向异性误差,提高了模型的成形精度。

对 STL 模型自身性质带来的近似误差,国内外学者的研究已经比较成熟,但针对微滴喷射 3DP 工艺粘结剂渗透误差的补偿处理,国内相关研究相对比较欠缺。本文将从微滴喷射 3DP 工艺的渗透误差方面入手,提出相应的补偿算法,并在打印前对 STL

模型进行误差补偿处理。

文献[12-14]使用两相流水平集方法建立了粘结剂喷射、渗透以及多层多液滴对粉床铺展渗透的模型,研究粘结剂喷射及渗透过程,分析了渗透误差的变化规律,本文依据这些研究,将粘结剂在粉床中的渗透所引起的误差分为两个分量:由重力及渗透作用引起的 Z 向渗透误差分量和由上层液滴挤压及渗透作用引起的 XY 向渗透误差分量。在这两个误差分量中,Z 向渗透误差分量对模型影响较大,但其补偿算法较容易实现,文中进行了简要说明,本文的研究重点是针对 XY 方向渗透误差分量补偿算法进行研究。

1 基于点偏移的 Z 方向误差分量补偿

对 STL 模型进行 Z 方向补偿目前有两种方式:对三角面片进行平移和对点进行平移^[15]。对点进行平移操作具有计算简单,逻辑清晰,移动后不易产生缝隙或三角面片交叉等错误的优势,故本文采用基于点偏移的 Z 方向误差分量补偿算法。

1.1 三角面片偏移计算

渗透误差模型如图 1 所示,深色区域为符合设计要求尺寸的理想打印区域,浅色部分为渗透误差,使用 h 表示层厚, d_z 表示 Z 方向渗透误差分量, d_{xy} 表示 XY 方向渗透误差分量。如图 2 所示在两个误差分量的影响下模型的理论打印轮廓(实线表示)与模型理想轮廓(虚线表示)之间会产生一个误差,记作 $f(\theta)$,表示理论打印轮廓与理想轮廓之间的距离偏差,其计算如式(1)所示。

图1 误差分量标识示意图

图2 Z方向误差补偿模型

$$f(\theta) = \begin{cases} d_{xy} \sin(\theta) - h \cos(\theta) & \theta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right) \\ 0 & \theta = \frac{\pi}{2} \\ \max(d_x \sin(\theta), d_z \cos(\theta)) & \theta \in \left(\frac{\pi}{2}, \pi\right] \end{cases} \quad (1)$$

其中 θ 为三角面片的角度, 设 $F(f_x, f_y, f_z)$ 为该三角面片的法向量, θ 为法向量 F 与 Z 轴负方向的夹角, 如图 3 所示。

图 3 三角面片的角度定义

设单个三角面片 Z 方向补偿函数 C_z , C_z 与 $f(\theta)$ 的关系如图 4 所示, 它是与 d_{xy} 、 d_z 、 θ 以及层厚 h 相关的函数。

$$C_z(\theta) = \frac{f(\theta)}{\cos(\theta)} \quad (2)$$

图 4 三角面片 Z 方向补偿函数 C_z 示意图

将该三角面片上的三个点的 Z 坐标都向上偏移 C_z , 即可实现单个三角面片的 Z 方向的渗透误差补偿。

1.2 基于点偏移的 Z 方向渗透误差分量补偿算法

在层厚 h 确定的条件下, 由于补偿函数 C_z 与三角面片相关, 不同角度的相邻三角面片的补偿函数 C_z 不同, 直接将三角面片顶点偏移操作, 会使原来相邻的三角面随着它们各自顶点的偏移而分离, 从而使 STL 模型上产生了缝隙。为了消除缝隙与不连续性, 对每个点的 Z 方向偏移量取与之相接的全部三角面片的补偿量的均值。

首先确定点与三角面片的相对关系, 对 STL 模

型建立拓扑关系并删除冗余数据, 参考已有算法^[16-22]使用哈希表储存 STL 模型的拓扑信息。然后对每个点分别进行计算。

为保证模型的水平平面性质不发生改变, 误差补偿过程中与 XOY 平行的水平平面($f_z=-1$, $\theta=0^\circ$)所包含的全部的点的补偿量直接设置为这个平面的补偿量 $C_z(0)$, 无需进行其他计算; 而对于非水平平面上某一点(X, Y, Z), 设与之相接的三角面片有 m 个, 第 i 个三角面片的角度为 θ_i ($\theta_i \neq 0$), 其补偿量为 $C_z(\theta_i)$, 则与该点相接的全部三角面片的补偿量的均值 δ 为

$$\delta = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^m C_z(\theta_i)}{m} & \forall \theta_i \neq 0 \\ C_z(0) & \exists \theta_i = 0 \end{cases} \quad (3)$$

将该点 Z 坐标偏移 δ , 实现该点的 Z 方向的渗透误差补偿。对于 STL 模型中全部点进行点偏移运算后即可完成 STL 模型的 Z 方向补偿。补偿前后情况理论对比如图 5 所示, 其中灰色区域表示模型理论轮廓与理论打印轮廓的偏差, 补偿后可使 Z 方向渗透误差减小, 达到补偿目的。

图 5 补偿前后情况理论对比

2 基于分层平面偏移的 XY 方向渗透误差分量补偿

2.1 分层平面偏移补偿原理

现有针对水平方向的补偿算法主要是针对分层后的线框模型进行补偿操作, 即在 STL 模型分层之后, 对每个分层层面轮廓线进行等量的偏移, 这种方法没有考虑模型角度变化对渗透误差的影响, 并且在计算过程中需要先进行分层之后再行补偿, 所需计算资源较多。

如图 6 所示, 在打印过程中, 确定分层厚度之后, 使用一系列间距为层厚的平行分层平面切割 STL 模型进行分层处理。将 STL 模型与分层平面的交线作为该分层平面的打印轮廓线(与模型理想

轮廓重合), 这样处理后进行打印, 由于没有考虑渗透误差的影响, 打印结束后的模型尺寸往往与理想值存在偏差, 因此需要进行进一步处理来消除该误差。

图 6 分层原理示意图

本文提出一种基于分层平面偏移的 XY 方向误差补偿算法(图 7), 在 STL 模型进行分层处理的同时进行误差补偿。根据 STL 模型表面三角面片的角度特征, 在分层前将分层平面进行偏移, 然后计算偏移后的分层平面与模型的交线, 再将新得到的轮廓线投影到原有分层平面上作为该层偏移后的分层轮廓线, 使用该层偏移后的分层轮廓进行打印, 可使打印模型在渗透误差的影响下打印轮廓与理想轮廓基本重合, 从而达到补偿渗透误差的目的。对每一层均使用这种方法计算分层轮廓, 直到完成全部层面的分层, 同时也完成补偿的操作。

图 7 基于分层平面偏移的补偿方案示意图

2.2 分层平面偏移计算的数学模型

为了更准确地计算得到分层补偿量, 以下对其进行定量计算并建立数学模型。在考虑渗透误差的影响下使分层平面偏移, 分层平面的偏移量称为分层补偿量, 用 h_i 表示, 规定当分层平面向上偏移时, $h_i > 0$, 当分层平面向下偏移时, $h_i < 0$, 如图 8 所示。通过改变 h_i 的大小可以控制打印轮廓的偏移, 进而控制最终打印误差的大小。

图 8 分层补偿量定义

对打印模型的某个区域, 在相同的层厚以及渗透误差条件下, 分别设置不同的分层补偿量 h_{i1}, h_{i2}, h_{i3} , 它们对应的打印误差分别为 E_1, E_2, E_3 , 如图 9 所示, 其中 $h_{i1} < h_{i2} < 0 < h_{i3}$, 而在该区域中打印误差 $E_1 < E_2 < E_3$ 。改变 h_i 的大小可以控制打印轮廓的偏移, 进而控制最终打印误差的大小。可通过调节 h_i 使最终打印误差最小, 实现误差补偿的目的。

图 9 不同 h_i 的大小对应不同误差大小

如图 10 所示, 取某个层面上与分层平面相交的一个三角面片为研究对象, 定义层厚为 h , Z 方向渗透误差分量为 d_z , XY 方向渗透误差分量为 d_{xy} , 分层补偿量为 h_i , θ 为法向量与 Z 轴负方向的夹角, 三角面片与分层平面交线长为 l , 渗透形态侧面面积为 S_c , 则这个三角面片在该层面上的渗透误差体积为

$$V_e = S_c l \quad (4)$$

取交线长度 l 的微分形式 Δl , 计算单位误差

$$V_{ue} = S_c \Delta l \quad (5)$$

根据三角面片方向(法向量 f_z 正负)不同, 可将三角面片分为四类: 与 XOY 平面平行的水平三角面片($f_z = \pm 1$)、与 XOY 平面垂直的垂直三角面片($f_z = 0$)、向上三角面片($f_z > 0$)与向下三角面片($f_z < 0$)。其中水平三角面片由 Z 方向补偿方法进行处理, 本小节算法中不作考虑; 分层平面偏移补偿方法不适用于对单个垂直三角面片的补偿, 不讨论其单位误差; 向上三角面片主要受到 XY 方向渗透误差分量影响, 而受 Z 方向渗透误差分量影响较小; 向下三角面片

会受到 Z 方向与 XY 方向渗透误差分量的综合影响。因此需要针对后两种情况的三角面片分别进行分析计算。

图 10 XY 方向误差补偿模型

2.2.1 向下三角面片单位误差

三角面片向下, $f_z < 0$ 时, θ 为法向量与 Z 轴负方向的夹角 ($0 < \theta < \pi/2$), 以模型理论轮廓线为边界, 超出边界的部分为正误差, 其侧面面积记作 S_{cd}^+ ; 未能超出边界的部分为负误差, 其侧面面积记作 S_{cd}^- 。则该截面的单位误差 $V_{ue} = S_{cd}^+ \Delta l + S_{cd}^- \Delta l$, 如图 11 所示。

图 11 $f_z < 0$ 时误差示意图

当 h_t 与 d_z 的大小变化时, 单位误差有不同的计算方式, 具体可分为以下四种情况。

(1) Z 方向渗透误差分量小于一个层厚 h , 分层补偿量 $h_t > 0$, 且单位截面内只存在正误差, 如图 12a 所示, 其单位误差为 V_{ued1} , 其计算如式(6)所示。

(2) Z 方向渗透误差分量小于一个层厚 h , 分层补偿量 $h_t > 0$ 如图 12b 所示, 其单位误差为 V_{ued2} , 其计算如式(7)所示。

(3) Z 方向渗透误差分量小于一个层厚 h , 分层补偿量 $h_t < 0$ 如图 12c 所示, 其单位误差为 V_{ued3} 其计算如式(8)所示。

(4) Z 方向渗透误差分量大于一个层厚 h , 分层补偿量 $h_t < 0$ 如图 12d 所示, 其单位误差为 V_{ued4} , 其计算如式(9)所示。

$$V_{ued1} = \left[\frac{1}{2} \frac{h_t^2}{\tan \theta} + h d_{xy} + \frac{h}{\tan \theta} d_z - d_{xy} d_z - \frac{1}{2} \frac{(h - h_t)^2}{\tan \theta} \right] \Delta l \quad (6)$$

图 12 $f_z < 0$ 时不同情况单位误差计算示意图

$$V_{ued2} = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{h_t}{\tan \theta} + d_{xy} \right)^2 \tan \theta + d_z \frac{h_t}{\tan \theta} + \frac{d_z^2}{\tan \theta} - \frac{1}{2} \left(\frac{h - h_t - d_z}{\tan \theta} - d_{xy} \right)^2 \tan \theta \right] \Delta l \quad (7)$$

$$V_{ued3} = \left[d_z \frac{h}{\tan \theta} + d_{xy} (h - d_z) - \frac{1}{2} \frac{(h - h_t)^2}{\tan \theta} + \frac{1}{2} \frac{h_t^2}{\tan \theta} \right] \Delta l \quad (8)$$

$$V_{ued4} = \left[\frac{1}{2} \frac{(d_z + h_t)^2}{\tan \theta} - \frac{1}{2} \frac{(h + h_t - d_z)^2}{\tan \theta} + \frac{1}{2} \frac{(2d_z - h + 2h_t)h}{\tan \theta} \right] \Delta l \quad (9)$$

综上所述, 三角面片向下时, 其单位误差 V_{ued} 为

$$V_{ued} = \begin{cases} V_{ued1} & d_z < h, h_t > 0, \frac{(h - h_t - d_z)}{\tan \theta} < dx \\ V_{ued2} & d_z < h, h_t > 0, \frac{(h - h_t - d_z)}{\tan \theta} > dx \\ V_{ued3} & d_z < h, h_t < 0 \\ V_{ued4} & d_z > h, h_t < 0 \end{cases} \quad \theta \in \left(0, \frac{\pi}{2} \right) \quad (10)$$

2.2.2 向上三角面片单位误差

三角面片向上, $f_z > 0$ 时, θ 为法向量与 Z 轴负方向的夹角 ($\pi/2 < \theta < \pi$), 以模型理论轮廓线为边界, 超出边界的部分为正误差, 其侧面面积记作 S_{cu}^+ ; 未能超出边界的部分为负误差, 其侧面面积记作 S_{cu}^- 。则该截面的单位误差 $V_{ue} = S_{cu}^+ \Delta l + S_{cu}^- \Delta l$, 如图 13 所示。

当 h_t 的大小不同时, 单位误差计算方式不同, 具体可分为以下两种情况。

图 13 向下三角面片单位误差示意图

当 $h_t > 0$, 误差如图 14a 所示, 误差为 V_{ueu1} , 其计算如公式(11)所示; 当 $h_t < 0$, 误差如图 14b 所示, 误差为 V_{ueu2} , 其计算如公式(12)所示。

图 14 $f_2 > 0$ 时不同情况单位误差计算示意图

$$V_{ueu1} = \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h-h_t}{-\tan(\theta)} + d_{xy} \right)^2 \tan(\theta) + \frac{1}{2} \left(d_{xy} + \frac{h_t}{\tan(\theta)} \right)^2 \tan(\theta) \right] \Delta l \quad (11)$$

$$V_{ueu2} = \left[-\frac{1}{2} \frac{(h-h_t)^2}{\tan(\theta)} + \frac{1}{2} \frac{h_t^2}{\tan(\theta)} + h d_{xy} \right] \Delta l \quad (12)$$

综上所述, 三角面片向上时, 其单位误差 V_{ueu} 为

$$V_{ueu} = \begin{cases} V_{ueu1} & h_t > 0 \\ V_{ueu2} & h_t < 0 \end{cases} \quad \theta \in \left(\frac{\pi}{2}, \pi \right) \quad (13)$$

2.2.3 STL 模型总误差

对整个 STL 模型, 三角面片角度范围为 $[0, \pi]$, 为方便编程计算, 将角度做离散化处理, 角度范围区间进行 n 等分, 对应角度 $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3 \dots \theta_j \dots \theta_n$, 当三角面片角度 θ 满足式(14)时, 令 $\theta = \frac{j\pi}{n}$ 。

$$\theta_j \in \left[\frac{j\pi}{n}, \frac{(j+1)\pi}{n} \right] \quad (14)$$

三角面片单位误差为 V_{ue} , 计算公式为

$$V_{ue} = \begin{cases} V_{ued} & (\theta > 0) \\ V_{ueu} & (\theta < 0) \end{cases} \quad (15)$$

分层后共得到 N 层轮廓, 第 k 层层面上的轮廓线包含 m 条线段, 其中第 i 条线段长度为 l_{ki} , 线段所对应的三角面片角度为 θ_{ki} , 则该线段所对应的误

差为

$$V_{eki} = \int_0^{l_{ki}} V_{ue} dl \quad (16)$$

第 k 层对应的单层误差为

$$V_{S_k} = \sum_{i=1}^m V_{eki} = \sum_{i=1}^m \int_0^{l_{ki}} V_{ue} dl \quad (17)$$

STL 模型总误差为每一层误差叠加总和

$$V_w = \sum_{k=1}^N V_{S_k} = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m V_{eki} = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m \int_0^{l_{ki}} V_{ue} dl \quad (18)$$

上述公式中单位误差 V_{ue} 是与分层厚度 h 、三角面片角度 θ 和分层补偿量 h_t 相关的函数, 其中分层厚度 h 由工艺要求确定, 三角面片角度 θ 为 STL 模型自身的属性, h 与 θ 无法改变, 而分层补偿量 h_t 是分层补偿算法中的关键参数, 可通过调节分层补偿量 h_t 的大小来控制单位误差 V_{ue} 的大小, 通过调节 h_t 使得 V_{ue} 最小, 进而控制总误差 V_w 达到最小。

由于分层补偿算法是依据分层平面偏移采样实现, 若相邻三角面片的分层补偿量不同会造成分层后线框不连续而产生错误, 所以要求同一层面上的分层补偿量 h_t 的大小相同。根据单层误差公式 V_{S_k} , 在 Matlab 软件中绘制 $V_{S_k} - h_t$ 的函数曲线图, 其中 $h_t \in [-h, h]$, 当 V_{S_k} 曲线位于最低点时, 对应的 h_t 即为该层的分层补偿量。对于整个 STL 模型而言, 每一层面上三角面片分布不同, 线段长短也不相同, 所以需根据 STL 模型的每一层层面的数据情况单独提供其相对应的分层补偿量 h_t , 即对每一层都进行该层面 V_{S_k} 最小值的求取, 获得该层面的分层补偿量 h_t , 如此 STL 计算全部分层层面后保证了每一层的 V_{S_k} 值最小, 最终使模型的 V_w 达到最小, 实现误差的补偿。

3 试验验证

3.1 渗透误差参数确定试验

通过打印实际样件确定在相同工艺参数下其渗透误差的数值, 设计样件模型如图 15 所示, 为 $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的立方体, 在立方体内部有 18 个宽度不等的以中心线为对称轴的狭缝, 狭缝宽从左至右分别为 0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、4.5、4、3.5、3、2.5、2、1.5、1、0.5 (单

位为 mm)。

图 15 Z 方向渗透误差验证试验样件

如图 16 以模型长边为基准方向(箭头 f), 改变 f 与 Z 轴的夹角 θ , 设置 θ 分别为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° 、 90° , 并按照层厚 $h=0.3$ mm, Z 轴向上进行打印, 得到一组 10 个砂型样件。使用微深科技 VTOP600T 工业级面结构光式三维扫描仪扫描打印完成的试件, 其中成型试验样件扫描结果如图 17 所示。

图 16 试验样件摆放角度

图 17 成型试验样件扫描图片

使用三维检测和测量软件 Geomagic Control X 对比原始设计文件与打印件扫描点云文件, 测量二者每条狭缝的尺寸大小及偏差。当摆放角度 $\theta=0^\circ$ 时, 测得 Z 方向尺寸误差为 0.96 mm, 当摆放角度 $\theta=90^\circ$ 时, 测得 XY 方向尺寸误差为 0.57 mm, 在打印设备及参数相同的条件下不考虑打印设备等其他因素引起的误差, 近似认为 Z 方向渗透误差 $d_z=0.96$ mm, XY 方向渗透误差 $d_{xy}=0.57$ mm, 将 d_z 和 d_{xy} 代入式(1), 绘制曲线如图 18a 所示。将扫描狭缝位置信息与标准样件狭缝位置坐标相比较, 得到不同角度下误差测量值散点图如图 18b 所示, 与理论曲线比较, 试验测量值与理论曲线变化趋势与大小基本一致, 吻合度较高。因此本文将 $d_z=0.96$ mm、 $d_{xy}=0.57$ mm 作为后续补偿函数中误差的数值使用。

(a) $d_z=0.96$ mm、 $d_{xy}=0.57$ mm 时 $f(\theta)$ 理论曲线

(b) 模型测量误差散点图

图 18 打印模型数据分析

3.2 渗透误差补偿算法试验验证

在 Visual Studio2019 软件中, 基于 C 语言编写渗透误差补偿处理软件实现基于点偏移的 Z 方向渗透误差补偿以及分层平面偏移补偿的 XY 方向渗透误差补偿算法。设计试验样件如图 19a 所示, 右侧方孔与小圆凸台作为定位基准, 中间工字部分及左侧圆孔、右侧圆柱, 其中“工”字部分四个角的 Z 方向尺寸分别记为尺寸 1~4, 工字部分整体高度

记为尺寸 5。

根据第 3.1 节中所确定的渗透误差参数： $d_z=0.96\text{ mm}$, $d_{xy}=0.57\text{ mm}$, 层厚仍设置为 $h=0.3\text{ mm}$, 使用渗透误差补偿软件依次进行 Z 方向渗透误差补偿和 XY 方向渗透误差补偿。未经过补偿的原始试验样件以及补偿后的试验样件各打印 5 个, 原始试验样件以及补偿后的试验样件的打印工艺参数完全相同, 10 个样件采用广州爱司凯科技股份有限公司风暴 S800 砂型打印机一次打印成形完成。将其编号为 1~10, 其中样件 1~5 为未补偿的样件, 样件 6~10 为补偿后的样件。打印结果如图 19b 所示。使用微深科技 VTOP600T 扫描样件, 并使用 Geomagic Control X 测量各个尺寸的误差。“工”字部分尺寸误差测量结果如表 1 表和 2 所示, 圆孔与圆柱的尺寸误差与圆度误差测量结果如表 3 表和 4 所示, 其中表 1 和表 3 为未经补偿的样件测量数据, 表 2 和表 4 为经过补偿的样件测量数据。

(a) 试验样件

(b) 样件打印成品

图 19 渗透误差补偿验证试验样件

表 1 未补偿的“工”字部分尺寸误差(mm)

编号	标准值	1	2	3	4	5	平均值
尺寸 1	5.00	-0.68	-1.06	-0.64	-0.59	-0.75	-0.74
尺寸 2	5.00	-0.75	-0.77	-0.78	-0.61	-0.69	-0.72
尺寸 3	5.00	-0.68	-0.91	-0.93	-0.75	-0.92	-0.84
尺寸 4	5.00	-0.89	-0.63	-0.85	-0.78	-0.93	-0.82
尺寸 5	30.00	0.28	0.24	0.22	0.40	0.11	0.25

表 2 补偿后的“工”字部分尺寸误差(mm)

编号	标准值	6	7	8	9	10	平均值
尺寸 1	5.00	0.29	0.11	0.17	0.18	0.22	0.19
尺寸 2	5.00	0.00	0.18	0.17	-0.09	-0.12	0.03
尺寸 3	5.00	0.15	0.06	0.22	-0.10	0.17	0.10
尺寸 4	5.00	-0.20	0.07	0.12	-0.25	-0.14	-0.08
尺寸 5	30.00	0.20	0.14	0.05	0.04	0.13	0.11

表 3 未补偿的圆孔、圆柱尺寸及圆度误差(mm)

编号	标准值	1	2	3	4	5	平均值
圆孔半径	25.00	-0.48	-0.39	-0.54	-0.37	-0.60	-0.48
圆度	0	0.43	0.34	0.52	0.42	0.63	0.47
圆柱半径	25.00	0.21	0.36	0.22	0.61	0.32	0.34
圆度	0	0.38	0.4	0.34	0.37	0.26	0.35

表 4 补偿后的圆 1、圆 2 尺寸及圆度误差(mm)

编号	标准值	6	7	8	9	10	平均值
圆孔半径	25.00	0.12	0.13	0.01	0.04	-0.12	0.04
圆度	0.00	0.19	0.11	0.07	0.17	0.17	0.14
圆柱半径	25.00	-0.11	-0.11	-0.27	-0.26	-0.25	-0.20
圆度	0.00	0.07	0.12	0.15	0.09	0.11	0.11

对于尺寸 1~尺寸 4, 其标准尺寸均为 5.00 mm, 未经补偿的样件测量总体平均误差为 -0.78 mm, 经过补偿后的样件测量总体平均误差为 0.06 mm, 误差量减少约为 92%; 对于尺寸 5, 标准尺寸为 30.00 mm, 未经补偿的样件测量平均误差为 0.25 mm, 经过补偿后的样件测量平均误差为 0.11 mm, 误差量减少约为 54%。可见采用渗透补偿算法的补偿效果较好, 有助于提高样件的精度, 尤其对于小尺寸样件补偿效果更加明显。

圆孔半径为 25.00 mm, 未经补偿的圆孔平均半径为 24.52 mm, 圆度平均误差为 0.47 mm, 经过补偿后的圆孔平均半径为 25.03 mm, 圆度平均误差 0.14 mm; 圆柱半径为 25.00 mm, 未经补偿的圆柱平均半径为 25.35 mm, 圆柱圆度平均误差 0.35 mm, 经过补偿后的圆柱平均半径为 24.80 mm, 圆柱圆度平均误差 0.11 mm。对于圆孔类部分的误差补偿后尺寸误差减少约 92%, 圆度误差减少约 69%; 对于圆柱类的误差补偿后尺寸误差减少约 42%, 圆度误差减少约 69%。

试验结果表明, 补偿算法对渗透误差具有较好的补偿能力, 补偿后的尺寸误差以及圆度误差明显减少, 可使打印样件更接近设计尺寸。

4 结论

对微滴喷射 3DP 打印工艺渗透误差进行了研究, 将渗透误差分解为 Z 方向渗透误差以及 XY 方向渗透误差。针对 Z 方向渗透误差分量采用了基于点偏移的补偿算法, 简化了补偿计算方法; 针对 XY 方向渗透误差分量提出了分层平面偏移的补偿算法, 在分层过程中对渗透误差进行补偿计算, 提升了补偿效率。将基于点偏移的 Z 方向渗透误差分量的补偿算法与分层平面偏移补偿算法相结合使用, 首先使用基于点偏移的补偿算法对误差较大的 Z 方向渗透误差分量进行补偿, 在此基础上使用分层平面偏移补偿算法对 XY 方向误差分量进行补偿, 并生成 3D 打印机可用的层面轮廓信息文件。经过试验验证, 经过两次补偿后的样件尺寸误差以及圆度误差减少明显, 提高了其打印精度和质量。

参 考 文 献

- [1] FADEL G M, KIRSCHMAN C. Accuracy issues in CAD to RP translations[J]. Rapid Prototyping Journal, 1996, 2(2): 4-17.
- [2] CAO W, MIYAMOTO Y. Direct slicing from AutoCAD solid models for rapid prototyping[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(10-11): 739-742.
- [3] ROHIT V, SAM A. Image Processing assisted tools for pre- and post-processing operations in additive manufacturing[J]. Procedia Manufacturing, 2016, 5: 958-973.
- [4] ALLAVARAPU S, PAUL R, ANAND S. A new additive manufacturing file format using bezier patches[J]. Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME, 2013, 41: 580-590.
- [5] 陈松茂, 白石根. 基于 CAD 模型外轮廓线的 3D 打印自适应分层算法[J]. 华南理工大学学报, 2018, 46(2): 38-43.
CHEN Songmao, BAI Shigen. Adaptive slicing algorithm based on contour line of CAD model in 3D printing[J]. Journal of South China University of Technology, 2018, 46(2): 38-43.
- [6] 李娜, 程继红, 杨继全. 3DP 分层切片中基于点云射线投影的 NURBS 曲面切片算法[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(2): 242-246.
LI Na, CHENG Jihong, YANG Jiquan. Research on Ray-NURBS slicing method directly from point cloud for 3DP[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(02): 242 - 246.
- [7] 张争艳, 陈萍, 杨丽, 等. 快速成型中粗糙 STL 模型细分算法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 178-186.
ZHANG ZhengYan, CHEN Ping, YANG Li, et al. The subdivision algorithm of STL model with low precision in rapid prototyping process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7): 178-186.
- [8] NATHAN B, CRANE. Impact of part thickness and drying conditions on saturation limits in binder jet additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2020, 33: 101127.
- [9] FAYAZFAR H, SALARIAN M, ROGALSKY A, et al. A critical review of powder-based additive manufacturing of ferrous alloys: Process parameters, microstructure and mechanical properties[J]. Materials & Design, 2018, 144: 98-128.
- [10] HODDER KJ, NYCHKA JA, CHALATURNYK RJ. Process limitations of 3D printing model rock[J]. Progress in Additive Manufacturing, 2018, 3: 173-182.
- [11] MA X, LIN F, ZHANG L. The heterogeneous compensation for the infiltrative error of binder jetting additive manufacturing processes[C]//26th International Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin: The University of Texas at Austin, 2015: 200-208.
- [12] 高翔宇, 杨伟东, 王媛媛, 等. 微滴喷射工艺参数与液滴形态关系的数值模拟[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(3): 475-480
GAO Xiangyu, YANG Weidong, WANG Yuanyuan, et al. Numerical simulation on the relationship between process parameters of droplet ejection and droplet morphology[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(3): 475-480.
- [13] GAO X, YANG W, XIAN H, et al. Numerical simulation of multi-layer penetration process of binder droplet in 3DP technique[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2020, 124(1): 227-241.
- [14] 杨伟东, 牛子佳, 贾鹏飞, 等. 3DP 工艺中粘结剂撞击与渗透仿真研究[J]. 河北工业大学学报, 2018, 47(3): 53-58.
YANG Weidong, NIU Zijia, JIA Pengfei, et al. Simulation research on impact and infiltration of binder in 3DP process[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2018, 47(3): 53-58.
- [15] 马旭龙. 铸造砂型三维打印工艺中渗透误差分析及补偿技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.

- MA Xulong. The heterogeneous compensation for the infiltrative error of the binder jetting additive manufacturing processes[D]. Beijing : Tsinghua University, 2016.
- [16] 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.
- [17] 张应中, 谢馥香, 罗晓芳, 等. 采用半边编码的三角网格拓扑数据结构[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(2): 328-334.
- ZHANG Yingzhong, XIE Fuxiang, LUO Xiaofang, et al. A topological data structure using coding of half-edges for triangle meshes[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(2): 328-334.
- [18] 王彦云, 陈鸿, 谢明师, 等. 基于哈希表的 STL 格式文件拓扑重建的算法[J]. 现代制造工程, 2015(12): 61-64.
- WANG Yanyun, CHEN Hong, XIE Mingshi, et al. Algorithm of topological reconstruction for STL format file based on Hash table[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2015(12): 61-64.
- [19] 王增波. STL 格式文件的快速拓扑重建算法[J]. 计算机应用, 2014, 34(9): 2720-2724.
- WANG Zengbo. Fast topological reconstruction algorithm for a STL file[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(9): 2720-2724.
- [20] 田仁强, 张义飞. 快速成型中 STL 模型直接切片新算法研究[J]. 机床与液压, 2019, 47(16): 55-59.
- TIAN Renqiang, ZHANG Yifei. A new algorithm for direct slicing of STL model in rapid prototyping[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(16): 55-59.
- [21] 杨晟院, 杜亚娟, 舒适. 基于 STL 文件的曲面网格重建算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(4): 10-11+14.
- YANG Shengyuana, DU Yajuanb, SHU Shi. Reconstruction algorithm of surface meshes based on STL files[J]. Computer Engineering, 2011, 37(4): 10-11+14.
- [22] 杨晟院, 舒适. 基于数据相关性的 STL 曲面网格快速重建算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(1): 67-71.
- YANG Shengyuan, SHU Shi. Fast reconstruction of STL surface meshes based on data correlation[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2009, 21(1): 67-71.
-
- 作者简介:** 杨伟东, 男, 1972 年出生, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为增材制造, 机器视觉。
E-mail: yangweidong@hebut.edu.cn
- 高翔宇, 男, 1995 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为增材制造。
E-mail: xiangyu9508@163.com
- 刘卫胜(通信作者), 男, 1963 年出生, 讲师。主要研究方向为机电一体化。
E-mail: ws.liu@163.com
- 檀润华, 男, 1958 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为创新设计。
E-mail: rhtan@hebut.edu.cn
- 张争艳, 男, 1984 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为增材制造。
E-mail: zzy@hebut.edu.cn