

基于预测控制的微滴喷射天线形貌补偿方法

平 补, 孟凡博, 黄 进*

(西安电子科技大学高性能电子装备机电集成制造全国重点实验室, 陕西西安 710071)

摘要: 微滴喷射在印刷电子领域有广阔的应用前景,可以在一台设备上完成天线介质基板与导电图案的一体化成形. 打印功能器件的表面形貌质量对其电性能有着显著的影响. 本文针对微滴喷射三维打印中存在的表面形貌质量难以控制的问题,提出了一种基于预测控制的打印零件形貌补偿方法. 首先,基于液滴的逐层堆积行为,建立打印零件形貌预测模型,该模型使用矩阵元素更新描述零件形貌逐层演化,从而准确预测多层打印零件存在的边缘塌陷与表面粗糙度大等形貌缺陷. 然后,基于该模型建立预测控制器,通过调整后续层打印图形,实现打印零件形貌缺陷的高效率补偿. 采用开环打印与补偿打印的对比实验验证了该方法的有效性. 实验结果表明,补偿打印方法使打印零件表面粗糙度下降了66.80%,边缘塌陷量下降了43.22%,有效补偿了打印零件的表面形貌缺陷. 最后,采用微滴喷射三维打印工艺制作了微带贴片天线. 采用本文提出的补偿打印方法制造的介质基板表面粗糙度低于开环打印样品,从而保证了天线射频层的高质量连接. 经测试,其回波损耗参数与方向图更接近仿真结果,从而证明了本研究在印刷电子中的意义.

关键词: 三维打印;形貌演化;微滴喷射;打印补偿;预测控制

基金项目: 国家自然科学基金(No.52035010, No.52205411);国防重点实验室基金(No.2022-JCJQ-LB018);陕西省青年基金(No.2022JQ-366);陕西省创新团队(No.2018TD-012);111引智基地(No.B14042);陕西省产业链项目(No.2020ZDLGY14-08)

中图分类号: TP272;TN455

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)04-1173-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI:10.12263/DZXB.20230968

Predictive Control-Based Morphology Compensation Method for Microdroplet Injection Antennae

PING Bu, MENG Fan-bo, HUANG Jin*

(State Key Laboratory of Electromechanical Integrated Manufacturing of High-performance Electronic Equipments,
Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, China)

Abstract: Microdroplet injection has a promising application in the field of printed electronics, which can complete the integrated molding of antenna dielectric substrates and conductive patterns in a single device. The surface topography quality of printed functional devices has a significant impact on their electrical properties. In this paper, for the problem of difficult to control the surface topographic quality in microdroplet jet 3D printing, a predictive control-based topographic compensation method for printed parts is proposed. Firstly, based on the layer-by-layer stacking behavior of the droplets, a topography prediction model of the printed part is established, which uses the matrix element update to describe the layer-by-layer evolution of the part topography, so as to accurately predict the existence of topographic defects in the multilayer printed part, such as the edge collapse and the large surface roughness. Then, a prediction controller is built based on this model to realize efficient compensation of topographic defects of the printed part by adjusting the print pattern of subsequent layers. Comparison experiments between open-loop printing and compensated printing are used to verify the effectiveness of the method. The experimental results show that the compensated printing method reduces the surface roughness of the printed part by 66.80% and the edge collapse by 43.22%, which effectively compensates for the surface morphology defects of the printed part. Finally, the microstrip patch antenna was fabricated using the microdroplet jet 3D printing process. The surface roughness of the dielectric substrate fabricated with the compensated printing method proposed in this paper is lower than that of the open-loop printed samples, which ensures the high-quality connection of the RF layer of the an-

tenna. The return loss parameters were tested to be closer to the simulation results, thus demonstrating the significance of this study in printed electronics.

Key words: three-dimensional printing; morphology evolution; microdroplet injection; print compensation; predictive control

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.52035010, No.52205411); National Defense Science and Technology Key Laboratory Fund under Grant (No.2022-JCJQ-LB-018); Natural Science Foundation of Shaanxi Province (No.2022JQ-366); Shaanxi Provincial Innovation Team (No.2018TD-012); 111 Intelligence Introduction Base (No.B14042); Shaanxi Key Industry Chain Project (No.2020ZDLGY14-08)

1 引言

射频器件向着小型化与结构与功能一体化的方向发展. 以智能蒙皮天线为例, 其将传感、射频、控制、散热承载等多种模块集成于蒙皮中, 兼具射频探测、状态感知、信号传递和散热承载等多种功能^[1,2]. 对于此类器件, 传统的制造方式为各功能结构单独制造, 此后进行机械装配, 属于机、电分离制造, 存在工艺流程复杂、制造效率低的问题^[3]. 与之相比, 通过增材制造技术实现一体化成形, 是一种另辟蹊径且极具潜力的方式. 微滴喷射是增材制造技术的一种, 其中, 压电驱动按需喷射型微滴喷射技术有着高精度与高分辨率成形的优势, 可以使用一台设备对蒙皮、承载层、射频单元层、馈电网络等功能结构进行逐层打印、烧结、固化, 从而完成高集成度智能蒙皮的一体化成形. 与传统制造方式相比, 该技术有着工艺流程简单/制造效率高的优势^[4]. 目前, 基于打印和烧结已经实现了偶极天线等射频器件的制造^[5]. 华盛顿州立大学 Rahul Panat 团队基于气溶胶打印和激光烧结实现了三维结构毫米波天线制造^[6]. 文献[7]通过逐层堆积获得了 13.9 GHz 的透镜天线. 在国内, 研究人员采用打印工艺制作了柔性带通频率选择表面^[8], 压力传感器^[9]等.

然而, 目前的打印过程通常以开环的方式运行, 即每层打印的液滴图案预先确定, 不根据反馈测量的结果进行调整. 这种打印方式会使打印过程受到一些不确定因素的影响, 如液滴位置、形状和尺寸的不确定性, 以及打印过程中液滴的流动、融合等^[10], 从而可能导致打印零件形貌存在缺陷, 如边缘塌陷、打印表面不平整等, 进而影响到打印器件的性能发挥. 对于打印的电子功能器件而言, 零件的边缘塌陷将直接决定多层电路结构的层间互联质量, 而零件的表面粗糙度天线、射频器件的电性能有着显著的影响. 对于微带天线而言, 当介质基板的粗糙度过大时, 其表面的辐射单元的形貌与阻抗会随之而发生改变, 进而导致器件无法满足设计要求.

针对上述问题, 研究人员通过建模与控制的方式来改善打印零件表面质量. 最早在文献^[11]中, Doumanidis 等将单个液滴的形状建模为一个球形帽, 提出了一

种与传质物理相一致的由基本球元组成的单元沉积分布叠加的沉积模型. 但该模型忽略了液滴之间的相互作用, 无法准确描述液滴之间的融合行为. Guo 等人提出了一个叠加模型^[12], 其中高度演变被假设为液滴高度的叠加. 然而, 该模型忽略了打印过程中的材料流动, 无法捕捉边缘塌陷效应. Wu 等人提出的传播模型, 通过基于相邻液滴的高度差传播体积和覆盖面积, 计算高度剖面, 有效地减少了高度预测的误差. 该模型在仅限于一维打印图案的模型中从传播的体积和面积计算高度轮廓, 有效地减少了高度预测的误差^[13,14]. 在他们随后的研究中, 模型被扩展到二维^[15]. 然而, 为了预测多层喷墨三维打印的轮廓高度, 有必要进一步扩展模型到三维图案. 在打印过程闭环控制方面, Cohen^[16]最早使用贪婪几何反馈方法来调控零件形状, 通过对整个零件形貌进行测量, 并将液滴沉积在测量值与期望高度之间的差值相对较大的位置, 从而实现补偿打印. 但是, 贪婪算法只能保证每一步的决策都能达到局部最优, 而整体上不一定是全局最优. 此外, 该工作没有对液滴的沉积进行建模, 故没有改善打印零件表面平整度, 且无法考虑液滴对其邻近区域的影响. Huang 等^[17,18]针对圆柱和棱柱两种形状的零件, 建立了预测建模和补偿的方法. 但是, 没有考虑打印过程的不确定性. Lu 等^[19,20]基于打印层更新的经验模型提出了反馈控制算法确定最佳打印图案. 但是, 该控制算法使用暴力搜索来最小化成本函数, 导致计算量大, 且可扩展性较差. Guo 等人将微滴喷射三维打印的过程建模为一个循环神经网络, 使用基于数据驱动的控制算法进行闭环控制^[21]. 然而, 数据模型的建立与实际物理过程的充分结合, 导致模型泛化能力不足, 因此不具备普适性.

综上所述, 本文针对传统开环微滴喷射三维打印中存在的零件边缘塌陷与表面粗糙度大的问题, 对打印过程进行数学建模, 采用矩阵更新描述液滴的逐层堆积, 基于液滴的沉积、流动等动力学行为, 准确预测打印零件的表面形貌. 在此基础上, 采用预测控制理论来求解后续的打印图形, 通过在线调整打印图形, 从而有效改善打印零件的边缘塌陷, 降低零件表面粗糙度, 实现三维打印零件形貌缺陷的高效率补偿. 最后, 采用

开环打印与补偿打印的对比实验及微带贴片天线的打印实验证明了该方法的有效性。

2 理论分析

在微滴喷射三维打印中,液滴的沉积位置、铺展形状,以及液滴之间的流动与融合等因素都会影响最终三维打印零件的表面形貌,从而影响打印功能器件的性能优良。当然,如果对微滴喷射三维打印过程建立合适的模型,并将反馈测量结果纳入控制算法,对现有的打印过程实施闭环控制,则将进一步提升打印功能器件的质量及打印系统的稳定性。因此,需要对建模及控制方法进行理论分析。

2.1 形貌预测模型

微滴喷射三维打印是一个液滴逐层堆积的过程,使用矩阵更新描述打印零件的高度演化。首先,对打印区域进行离散化,将打印区域内所有位置的高度抽象为一个矩阵。如图 1 所示,采用矩阵 Z 描述该区域内打印样件的高度轮廓。此时,矩阵元素 $Z(i, j)$ 在某一时刻的值表示在该时刻位置 (i, j) 处打印样件的高度。

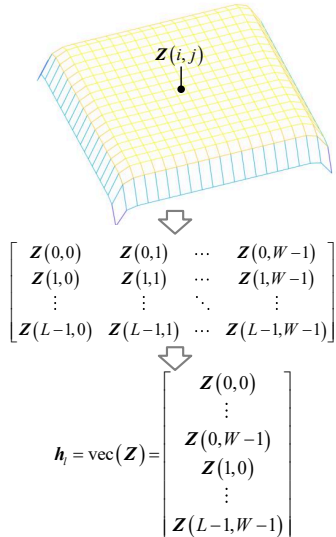


图1 打印区域离散化及矩阵向量化示意图

然后,将矩阵 Z 向量化为一个矢量,在图 1 中, vec 为向量化算子, $h_l \in \mathbb{R}^N$ 是空间动力学系统的状态变量,其中, $N=L \times W$, 表示打印区域内总的离散点数,下标 l 表示打印的层数。随着打印过程的逐层进行, l 在不断增加。形貌预测模型需要描述的,就是当打印层数由 l 变化到 $l+1$ 时,对应的零件形貌 h_l 如何变化到 h_{l+1} 。

在 Z 矩阵建立好之后,每一层的打印图形(即液滴图案)可对应于与 Z 矩阵相同尺寸的矩阵 F ,如图 2 所示。其中,矩阵中的元素 1 代表该处沉积一个液滴,0 代表该位置没有沉积液滴。

在一个液滴沉积前后,矩阵 Z 的更新过程可用式(1)

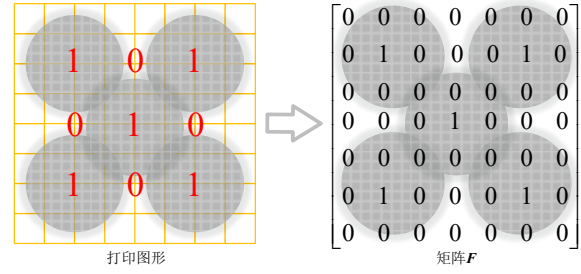


图2 打印图形与矩阵 F 的对应关系示意图

来描述。

$$Z_l^{k+1} = Z_l^k + P_1^k \cdot D \cdot P_2^k \quad (1)$$

其中, $P_1^k \in \{0, 1\}^{L \times N_d}$, $P_2^k \in \{0, 1\}^{N_d \times W}$, 里面包含一个单位矩阵,其余元素均为 0。单位阵的位置取决于第 k 个液滴对应于液滴图案矩阵 F 中的索引, P_1^k 和 P_2^k 中单位矩阵的中心分别对应 F 中第 k 个液滴的行索引与列索引。矩阵 $D \in \mathbb{R}^{N_d \times N_d}$ 为单个液滴的高度矩阵,图 2 中 $N_d=3$ 。

令矩阵 $B^k = P_1^k \cdot D \cdot P_2^k$, 表示一个液滴在整个打印区域中的高度,并假设第 l 层打印图形由 K 个液滴组成。因此,每个 B^k 在数学上是一个稀疏矩阵,大部分元素为 0。随着每个液滴的沉积,矩阵的更新过程如式(2)与式(3)所示。

$$Z_l^1 = Z_l^0 + B^1 \quad (2)$$

$$Z_l^2 = Z_l^1 + B^2 \quad (3)$$

⋮

其中, Z_l^0 表示在第 l 层液滴沉积之前, Z 矩阵的初始值,也就是第 $(l-1)$ 层图形打印完成后的轮廓高度。在该层的第 K 个液滴沉积完后,有

$$Z_l^K = Z_l^{K-1} + B^K \quad (4)$$

此时, Z_l^K 就是第 l 层的图形打印完后打印零件的高度轮廓。将其向量化后,在该层图形打印前后,状态变量 h_l 的迭代过程如式(5)所示。

$$h_{l+1} = h_l + \text{vec}\left(\sum_{k=1}^K B^k\right) \quad (5)$$

其中, vec 为向量化算子。

将每个 B^k 向量化为 b^k , 则 $b^k \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ 。对于打印区域内的 N 个离散位置,每个位置对应一个 b^k ,没有液滴沉积的位置对应 b^k 为全零向量。故 b^k 描述了节点 k 处沉积一个液滴之后,对打印区域内所有节点高度的影响。然后,组成矩阵 $B_l = [b^1 \ b^2 \ \dots \ b^N]$,并将液滴图案矩阵 F 向量化为 f_l ,代表第 l 层对应的打印图形。因此, B_l 与 f_l 的乘积则用来描述一层图形被打后,由材料沉积造成的高度叠加。

当液滴沉积之后,相邻位置会有局部墨流的存在,打印材料总是会从高度较高的节点流向高度较低的节点。由于局部墨流的存在,每个节点处的高度会重新分

布. 然而,局部墨流的物理过程极其复杂,打印材料的流动与其粘度、表面张力系数等有关. 当材料流动时,密度作为惯性力主导的材料属性,会有利于流动的发生,而粘度则阻碍着材料流动. 表面张力的存在则阻碍液滴发生变形. 因此,可能只有当两个节点处打印材料的高度差超过某一阈值,这两个节点才会有局部墨流的发生,在本文中, $\eta_s(k_i, \lambda)$ 为考虑流动过程的粘性力与表面张力而引入的阈值函数. 其中, k_i 为基板上节点*i*处的切平面与水平面的夹角. 只有当 k_i 大到某一值 λ 时,基板本身的形状才会对墨流量有影响. 当基板为平面时, $k_i=0$;当基板为曲面时,曲面 Σ 由方程 $F(x, y, z)=0$ 表示,节点*i*处的坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,那么 k_i 可用式(6)进行计算.

$$k_i = \arccos \frac{|F_z'(z_i)|}{\sqrt{F_x'(x_i)^2 + F_y'(y_i)^2 + F_z'(z_i)^2}} \quad (6)$$

因此,打印区域内,某一节点*i*处的高度变化 Δh_i 由式(7)表示.

$$\Delta h_i = \sum_{j \in M} \left\{ \frac{2}{\pi} \eta_s(k_i, \lambda) \cdot [h_i - h_j] \right\} \quad (7)$$

其中, M 为节点*i*的所有相邻节点*j*的集合; h_i 和 h_j 为节点*i*和*j*处零件高度. $\eta_s(k_i, \lambda)$ 前面乘 $\frac{2}{\pi}$,是为了归一化,使 $\frac{2}{\pi} \eta_s(k_i, \lambda)$ 的值在0~1之间.

令 d_{ij} 表示由于局部墨流导致的节点(*i, j*)的高度变化量 Δh_i 与原始高度 h_i 的比值. 每个节点处的 d_{ij} 按照主对角线排列形成 $N \times N$ 对角矩阵 \mathbf{D}_g ,如式(8)所示:

$$\mathbf{D}_g = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & d_{12} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & d_{LN} \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (8)$$

因此,综合以上对液滴逐层堆积、局部墨流等打印中物理过程的建模,形貌预测模型在数学上可以表达为式(9):

$$\mathbf{h}_{l+1} = \mathbf{h}_l + (\mathbf{I}_{N \times N} + \mathbf{D}_g) \mathbf{B}_l \mathbf{f}_l \quad (9)$$

2.2 补偿打印方法

利用当前层的测量轮廓和下一层的参考轮廓,计算出合适的控制输入,使得下一层的轮廓以最小的误差跟踪参考轮廓. 在第2.1节建立的形貌预测模型在形式上是一个离散系统的状态空间方程,如式(10)和式(11)所示:

$$\mathbf{h}_{l+1} = \mathbf{A} \mathbf{h}_l + \mathbf{B} \mathbf{f}_l \quad (10)$$

$$\mathbf{y}_l = \mathbf{h}_l \quad (11)$$

其中, \mathbf{h}_l 与 \mathbf{h}_{l+1} 分别用来描述第*l*层与第*l+1*层的零件表面形貌,这也是系统的状态变量; \mathbf{f}_l 用来描述第*l*层的

打印图形,对应于系统的控制输入;矩阵 \mathbf{A} 与 \mathbf{B} 分别对应系统矩阵与控制输入矩阵,用来描述在沉积过程中液滴的逐层堆积、流动等动力学行为对打印零件高度轮廓的影响. 在该系统中,系统矩阵 \mathbf{A} 为单位阵,输入矩阵 \mathbf{B} 满秩. 系统输出取状态变量,输出矩阵为单位阵,因此,系统是一个能控能观系统.

本文采用预测控制理论来实现补偿打印. 首先通过离散化状态方程,依次对未来*m*层的打印过程中 \mathbf{h}_l 的更新过程进行预测,结果可表示为式(12).

$$\mathbf{H}_l = \mathbf{A} \mathbf{h}_l + \boldsymbol{\Omega} \mathbf{F}_l \quad (12)$$

其中, \mathbf{H}_l 为 $(m+1)n \times 1$ 列向量; \mathbf{A} 为 $(m+1)n \times n$ 矩阵; $\boldsymbol{\Omega}$ 为 $(m+1)n \times mn$ 矩阵; \mathbf{F}_l 为 $mn \times 1$ 列向量. 其中,*m*为预测区间,*n*为状态向量的行数. 各个矩阵的表达式如下:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n \times n} \\ \mathbf{A}_{n \times n} \\ \mathbf{A}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{A}^m \end{bmatrix}, \boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbf{B} & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbf{A}\mathbf{B} & \mathbf{B} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}^{m-1}\mathbf{B} & \mathbf{A}^{m-2}\mathbf{B} & \cdots & \mathbf{B} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}_l = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{l|l} \\ \mathbf{h}_{l+1|l} \\ \mathbf{h}_{l+2|l} \\ \vdots \\ \mathbf{h}_{l+m|l} \end{bmatrix}, \mathbf{F}_l = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{l|l} \\ \mathbf{f}_{l+1|l} \\ \mathbf{f}_{l+2|l} \\ \vdots \\ \mathbf{f}_{l+m-1|l} \end{bmatrix} \quad (13)$$

打印零件的形貌控制过程,可以看作是一个跟踪给定参考的过程. 因此,打印补偿问题可以化为一个优化问题. 定义参考轮廓构成的序列如下:

$$\mathbf{R}_l = [\mathbf{r}_{l|l}^T \quad \mathbf{r}_{l+1|l}^T \quad \cdots \quad \mathbf{r}_{l+m|l}^T]^T \quad (14)$$

根据跟踪误差、控制输入以及终端误差来构建成本函数,如式(15)所示:

$$J(\mathbf{F}_l) = \sum_{i=1}^{m-1} \left\{ [\mathbf{h}_{l+i|l} - \mathbf{r}_{l+i|l}]^T \mathbf{Q} [\mathbf{h}_{l+i|l} - \mathbf{r}_{l+i|l}] + \mathbf{f}_{l+i|l}^T \mathbf{R} \mathbf{f}_{l+i|l} \right\} + [\mathbf{h}_{l+m|l} - \mathbf{r}_{l+m|l}]^T \mathbf{F} [\mathbf{h}_{l+m|l} - \mathbf{r}_{l+m|l}] \quad (15)$$

其中,矩阵 \mathbf{Q} 、 \mathbf{R} 、 \mathbf{F} 都是对角正定矩阵,在成本函数中作为各个误差项的权重系数.

因此,本文将微滴喷射三维打印的打印补偿通过建立一个模型预测控制器来实现. 通过在线求解一个二次规划问题,最小化成本函数,实时调整打印图形,使打印零件的轮廓跟踪参考轮廓. 根据该方法建立的补偿打印方式的执行流程如图3所示.

3 结果与讨论

3.1 实验系统与方法

为了验证本文提出的补偿打印方法的有效性,研制了一台微滴喷射三维打印系统,如图4所示. 该系统

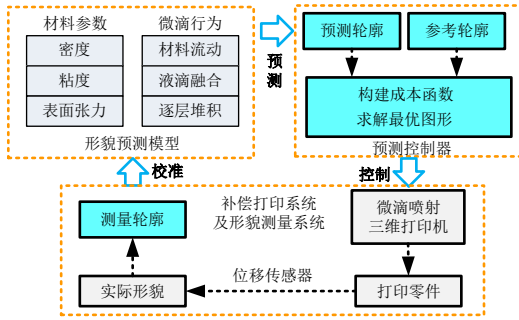


图3 补偿打印系统执行流程示意图

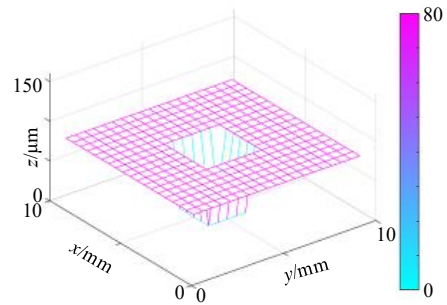
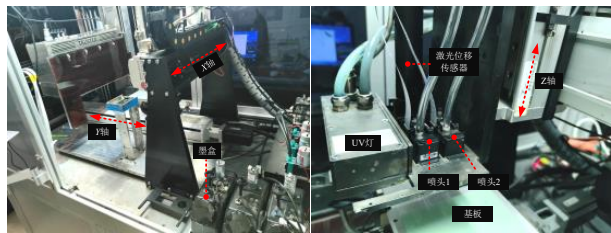


图5 样品期望轮廓

可以完成多层打印零件的一体化喷射固化成形以及表面形貌的测量。



(a) 微滴喷射三维打印系统 (b) 零件成形与形貌测量系统

图4 实验系统实物

在本文中，使用的喷嘴是理光阵列喷嘴 (GH2220)，外部尺寸为 61.8 mm×25.88 mm×16 mm。阵列喷嘴共有 384 个喷嘴孔，分两行排列；每行有 192 个喷嘴孔，每一行中孔距为 0.169 mm，喷头宽度为 32.4 mm。用于打印的光固化墨水由光固化墨水 (TR300) 按照体积比 1:2 稀释于苯乙烯中而成，吸收紫外光的波长为 395~405 nm。在运动方向和喷头方向的打印分辨率均为 300 dpi，喷射液滴的铺展直径约为 60 μm。在打印过程中，基板被加热到 80 °C，以便及时挥发溶剂。对于紫外光固化墨水，在每层打印完毕后，启动 UV 灯 (波长为 395 nm，有效发光面尺寸为 55 mm×20 mm) 来固化打印的图形。

3.2 结果分析

本文中，打印零件为 10 mm×10 mm 的方形样品，样品内部包含一个方形孔。样品的期望轮廓如图 5 所示。

根据第 2.1 节建立的预测模型，传统开环打印方式得到的预期零件轮廓如图 6 所示。可以看出，由于液滴的流动以及三维打印逐层堆积的制造特性，开环打印方式得到的预测结果中，随着打印层数的增加，在样品的边缘处以及内部孔洞边缘处，均会出现边沿塌陷的现象，表面质量较差。然而，当采用补偿打印的方式进行成形时，动态调整后续层的打印图形，边沿塌陷与表面粗糙的问题得到了较好的解决。

图 7 显示了开环打印与补偿打印两种方式成形零件的面粗糙度 Sa 与 Sz 的变化过程。其中，Sa 直接反映

了打印零件的表面粗糙度，Sz 为最高波峰与最低波谷之间的距离。可以看出，在打印 200 层后，开环打印零件达到了 Sa=2.65 μm，而补偿打印零件对应的指标为 Sa=0.86 μm，面粗糙度降低了 67.5%。这表明，补偿打印方法能有效地改善打印零件的表面质量。

为了直观地观察补偿打印的效果，采用均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 来对比多层开环打印与补偿打印的效果。均方根误差可以反映打印零件每一点高度偏离平均高度的程度，从而反映轮廓表面的不平整度，其计算式如式 (16) 所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (h_i(i,j) - \bar{h}(i,j))^2} \quad (16)$$

其中， $h_i(i,j)$ 表示在打印区域内位置 (i,j) 处打印零件的轮廓高度； $\bar{h}(i,j)$ 表示零件平均高度。在计算时，只取有高度的零件区域进行。如图 8 所示，随着打印层数的增加，开环打印零件轮廓的 RMSE 逐层增加。与之相比，补偿打印在打印图形不断调整的过程中，轮廓表面均方根误差趋于稳定，并没有增加。

为了验证补偿打印方法在实际成形中的有效性，在打印设备上分别采用开环打印与补偿打印两种方式进行了样品打印。使用激光位移传感器 (CSD-500) 进行打印零件的轮廓精确测量与调控。如图 9 所示，对于打印零件的边缘塌陷，开环打印零件边沿处上下表面距离达到了 118 μm，而补偿打印将边缘塌陷降低至 67 μm，塌陷量下降了 43.22%；测量其表面轮廓，开环打印零件表面粗糙度 Ra=2.47 μm，与之相比，经过补偿，轮廓粗糙度下降至 Ra=0.82 μm，下降了 66.80%。

3.3 微带贴片天线打印

为了验证本文提出的补偿打印方法在电子印刷方面应用的可靠性，设计了 X 波段矩形微带贴片天线，馈电方式采用微带线馈电，天线结构如图 10 所示。微带天线的仿真中心频率为 10.0 GHz，回波损耗峰值为 -28.72 dB。分别使用传统开环打印与本文提出的补偿打印方式制作了微带天线基板，结果如图 11(a) 和图 11(b)

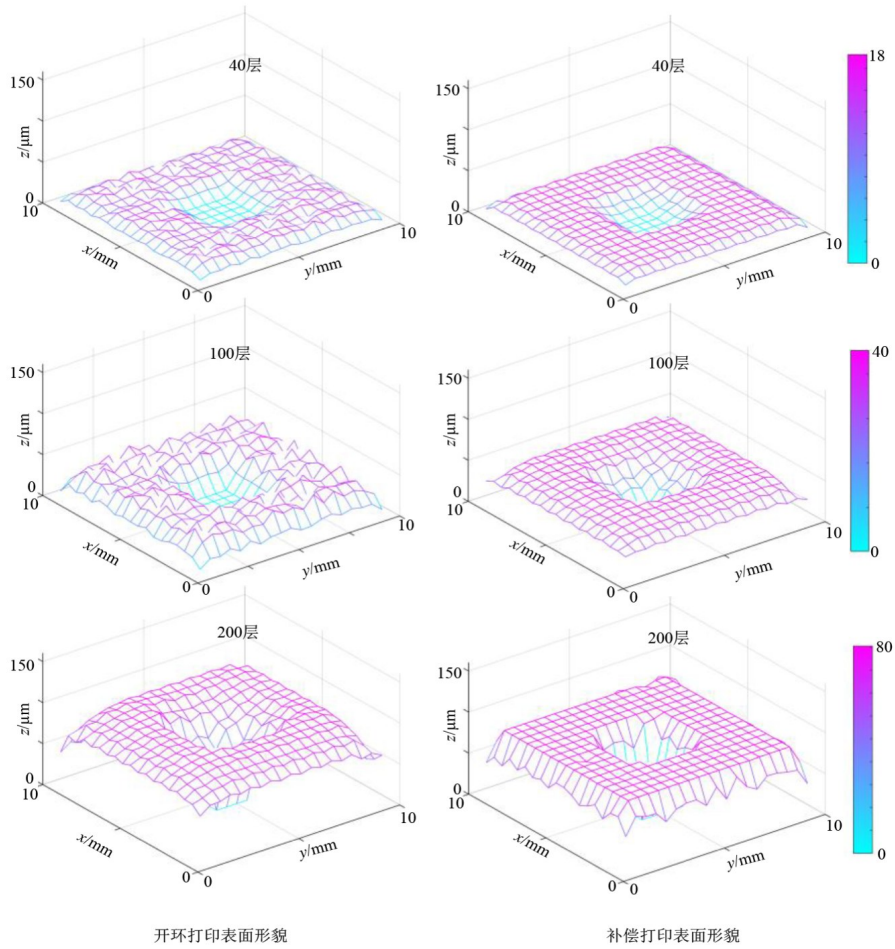


图6 开环打印与补偿打印模拟结果

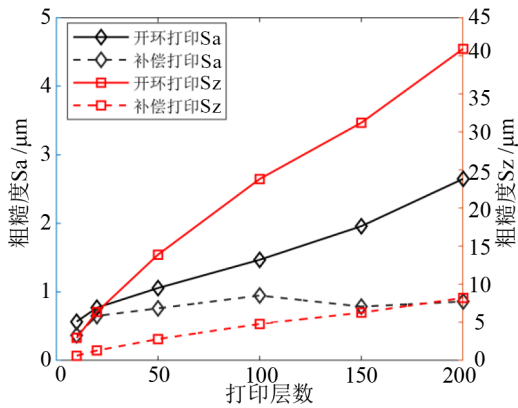


图7 开环打印与补偿打印指标对比

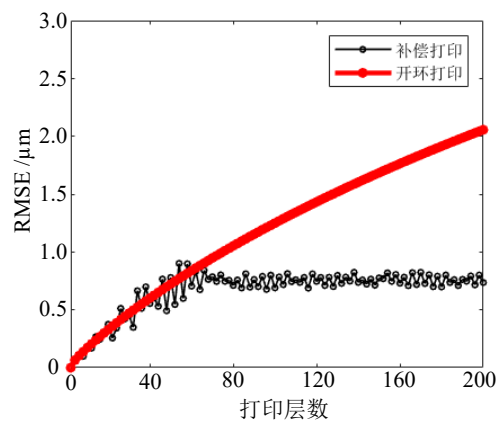


图8 开环打印与补偿打印轮廓表面RMSE值

所示. 介质基板使用光固化墨水打印制作而成, 其中, 介质基板介电常数为2.75, 损耗角正切值为0.02. 辐射单元、微带线和接地板使用纳米银墨水喷墨打印并在150 °C环境下保温30 min完成烧结使其导电. 墨水型号为BroadCON-INK550, 银粒径为30~50 nm, 固含量在25%~30%. 最后, 在馈线处插入SMA(SubMiniature version A)接头, 完成天线的装配. 制作的微带天线实物如

图11(c)和图11(d)所示.

使用矢量网络分析仪(R&S ZNC)测试天线的回波损耗. 经实测分析, 如图11(e)所示, 由于介质基板表面粗糙度较大, 无法保证导电图形的可靠连接, 严重情况下导致辐射单元连接发生断开, 某一开环打印天线样件的频率偏移到10.17 GHz. 而补偿打印的微带天

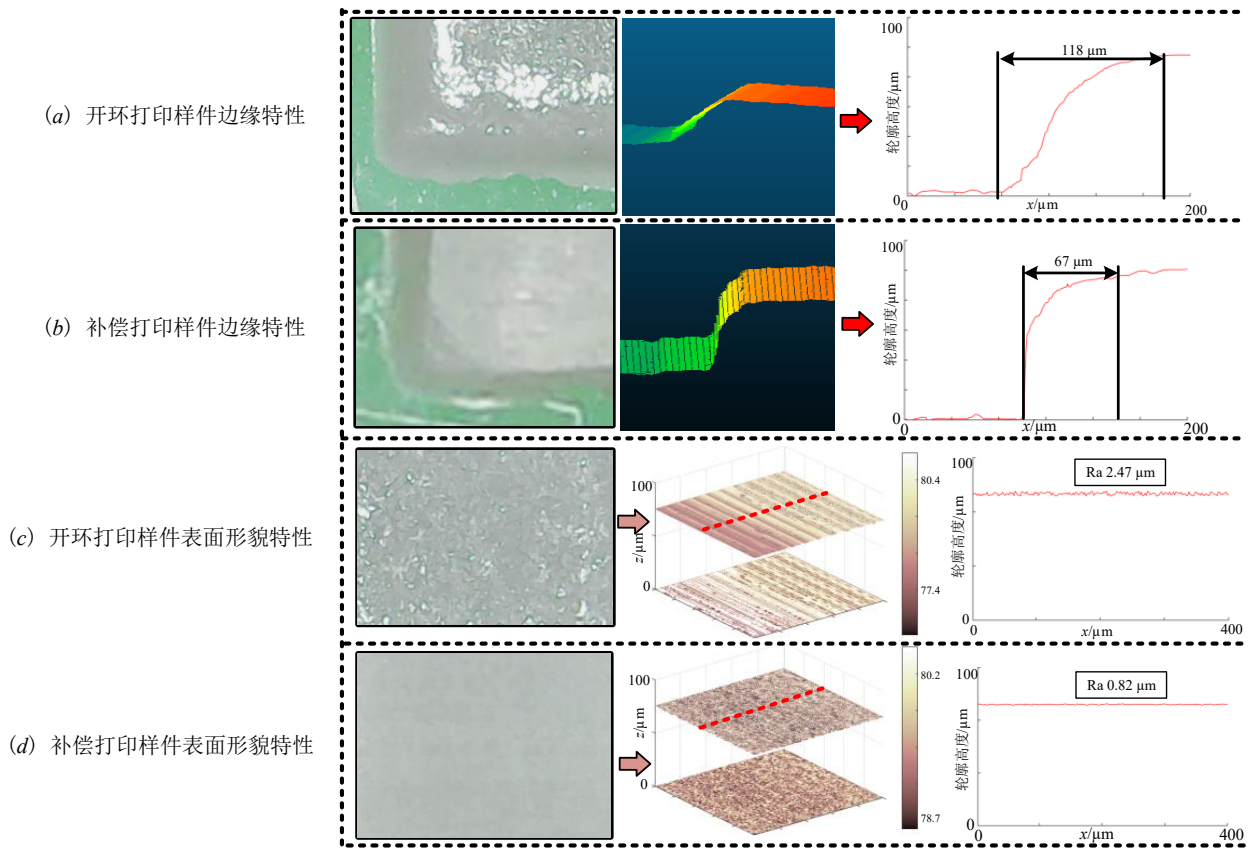


图9 开环打印与补偿打印实验结果

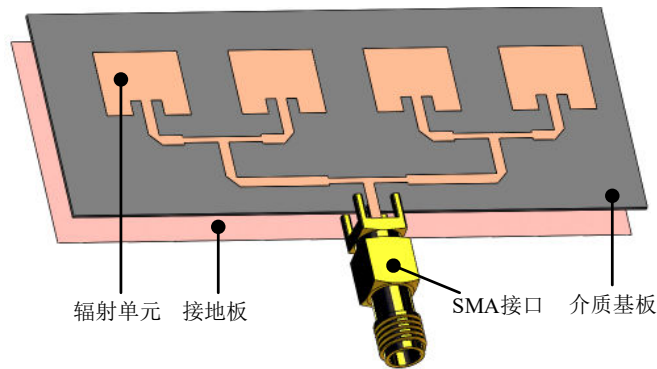


图10 微带天线打印结构示意图

线中心频率为 10.02 GHz, 回波损耗峰值为 -20.93 dB, 与仿真结果更接近。

采用四探针测量仪 (RTS-9) 测量纳米银图形的电导率, 如图 12(a) 所示。其中, 电流量程为 100 mA, 导电图形厚度 20 μm, 探针平均间距 1.0 mm。分别测量了 4 个开环打印样件与补偿打印样件的 4 个辐射单元的方块电阻, 共 16 个测试样本。测试结果如图 12(b) 所示, 开环打印样件纳米银图形电导率平均值为 2.90×10^5 S/m, 补偿打印样件对应电导率平均值为 1.08×10^7 S/m。使用

微波暗室对天线方向图进行测试, 结果如图 12(c)~(f) 所示。天线增益的仿真结果为 10.6 dB, 由于开环打印天线样件的导电图形电导率低, 增益仅为 4.21 dB。与之相比, 补偿打印可以有效保证良好的介质基板表面形貌, 进而使得其上微波电路的导电性得以保证。天线样件增益为 10.46 dB, 方向图与仿真结果更为接近。测试结果表明, 实施补偿打印可以通过降低介质基板表面粗糙度, 进而确保辐射单元及微带线的良好互联, 从而保证微带天线的射频性能。

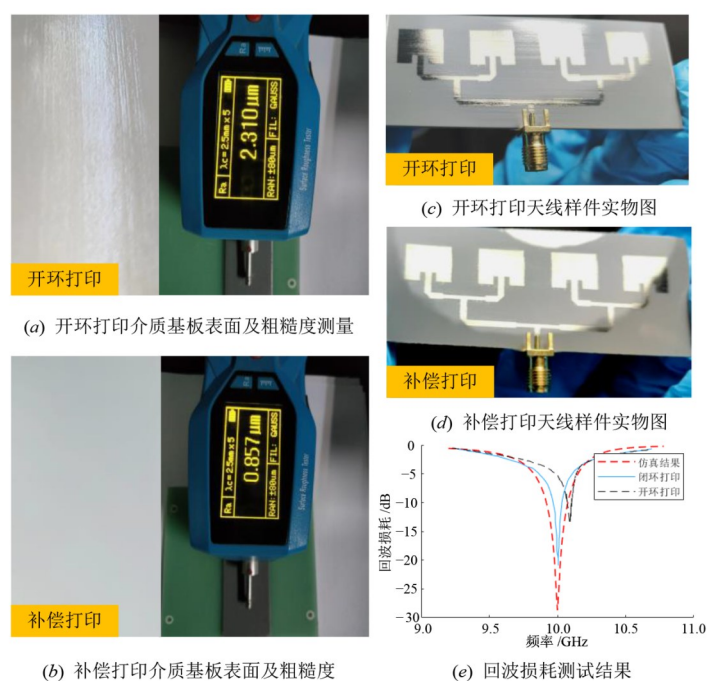


图 11 微带天线打印及测试结果

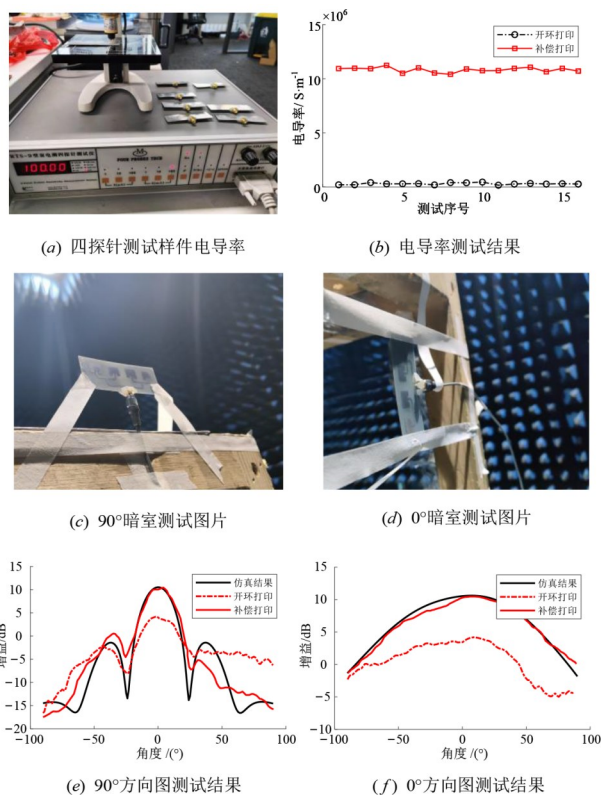


图 12 纳米银电导率测试及天线方向图测试

4 结论

本文针对传统开环微滴喷射三维打印中存在的边缘塌陷与粗糙度大的问题,展示了一种预测建模及智能补偿打印方法,以提高打印零件的表面质量. 经对比

实验,进一步验证了该补偿打印方法的有效性. 测试结果表明,所提出的补偿打印方法可以有效改善多层打印零件的边缘塌陷,降低表面粗糙度,有利于实现高精度、高质量、高稳定性微滴喷射三维打印的目标.

参考文献

- [1] 吴波, 谈腾. 机载智能蒙皮天线技术的研究进展[J]. 军民两用技术与产品, 2018(7): 55-58, 61.
WU B, TAN T. Research progress of airborne smart skin antenna technology[J]. Dual Use Technologies & Products, 2018(7): 55-58, 61. (in Chinese)
- [2] TIAN T, HUANG X J, XU Y L, et al. A wideband energy selective surface with quasi-elliptic bandpass response and high-power microwave shielding[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2024, 66(1): 224-233.
- [3] GIBSON R F. A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures[J]. Composite Structures, 2010, 92(12): 2793-2810.
- [4] 刘秀丽, 苑博, 孙凤林. 3D打印在智能蒙皮天线中的应用发展[J]. 电子工艺技术, 2020, 41(6): 311-313, 332.
LIU X L, YUAN B, SUN F L. Application and development of 3D printing in smart skin antenna[J]. Electronics Process Technology, 2020, 41(6): 311-313, 332. (in Chinese)
- [5] MUTLU F, ÖNOL C, KARAOSMANOĞLU B, et al. Ink-jet-printed cage-dipole antennas for radio-frequency applications[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2017, 11(14): 2016-2020.
- [6] RAHMAN T, RENAUD L, HEO D, et al. Aerosol based direct-write micro-additive fabrication method for sub-mm 3D metal-dielectric structures[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2015, 25(10): 107002.
- [7] BUDHU J, RAHMAT-SAMII Y, HODGES R E, et al. Three-dimensionally printed, shaped, engineered material inhomogeneous lens antennas for next-generation spaceborne weather radar systems[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(11): 2080-2084.
- [8] 程开, 黄贤俊, 梁圆龙, 等. 基于增材工艺的柔性带通频率选择表面[J]. 电子学报, 2021, 49(6): 1204-1209.
CHENG K, HUANG X J, LIANG Y L, et al. Flexible band-pass frequency selective surface based on additive patterning and electroplating[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(6): 1204-1209. (in Chinese)
- [9] 洪成雨, 鲍成志, 武亚军, 等. 增材制造制备性能可控的FBG压力传感器研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 30-38.
HONG C Y, BAO C Z, WU Y J, et al. Study on fabrication of FBG pressure sensors with controllable measurement performance using additive manufacturing technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4): 30-38. (in Chinese)
- [10] DERBY B. Inkjet printing ceramics: From drops to solid[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2011, 31(14): 2543-2550.
- [11] DOUMANIDIS C, SKORDELI E. Distributed-parameter modeling for geometry control of manufacturing processes with material deposition[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2000, 122(1): 71-77.
- [12] GUO Y J, MISHRA S. A predictive control algorithm for layer-to-layer ink-jet 3D printing[C]//2016 American Control Conference (ACC). Piscataway: IEEE, 2016: 833-838.
- [13] WU Y M, CHIU G. Modeling height profile for drop-on-demand print of UV curable ink[C]//Proceedings of ASME 2019 Dynamic Systems and Control Conference. Park City: ASME, 2019: DSCC2019-9242.
- [14] WU Y M, CHIU G. An improved model of height profile for drop-on-demand print of ultraviolet curable ink[J]. ASME Letters in Dynamic Systems and Control, 2021, 1(3): 031010.
- [15] WU Y M, CHIU G. An improved height difference based model of height profile for drop-on-demand 3D printing with UV curable ink[C]//2021 American Control Conference (ACC). Piscataway: IEEE, 2021: 491-495.
- [16] COHEN D L, LIPSON H. Geometric feedback control of discrete-deposition SFF systems[J]. Rapid Prototyping Journal, 2010, 16(5): 377-393.
- [17] HUANG Q, ZHANG J Z, SABBAGHI A, et al. Optimal offline compensation of shape shrinkage for three-dimensional printing processes[J]. IIE Transactions, 2015, 47(5): 431-441.
- [18] HUANG Q, NOURI H, XU K, et al. Statistical predictive modeling and compensation of geometric deviations of three-dimensional printed products[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136(6): 061008.
- [19] LU L, ZHENG J, MISHRA S. A model-based layer-to-layer control algorithm for ink-jet 3D printing[C]//Proceedings of ASME 2014 Dynamic Systems and Control Conference. San Antonio: ASME, 2014: DSCC2014-5914.
- [20] LU L, ZHENG J, MISHRA S. A layer-to-layer model and feedback control of ink-jet 3-D printing[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(3): 1056-1068.
- [21] INYANG-UDOH U, MISHRA S. A learning-based approach to modeling and control of inkjet 3D printing[C]//2020 American Control Conference (ACC). Piscataway: IEEE, 2020: 460-466.

作者简介

平 补 男, 1999年2月出生于内蒙古自治区包头市. 现为西安电子科技大学在读博士. 研究方向为三维打印控形理论与方法.

E-mail: bidouyouzi@qq.com

孟凡博 男, 1993年出生, 博士, 副教授. 主要研究方向为共形增材制造设备研发. 中国电子学会会员编号: E190090850M.

E-mail: fbmeng@mail.xidian.edu.cn

黄 进 男, 1968年出生, 博士, 教授. 主要研究方向为异质异构功能件的三维打印技术、光机电一体化系统的建模与控制. 中国电子学会会员编号: E190005188F.

E-mail: jhuang@mail.xidian.edu.cn