

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312035

基于在机测量的曲面共形电路 3D 打印误差补偿方法*

刘清涛¹, 魏栋杰¹, 杨鹏涛¹, 尹恩怀², 吕景祥¹

(1. 长安大学道路施工技术与装备教育部重点实验室 西安 710064; 2. 西安瑞特三维科技有限公司 西安 710061)

摘要: 基于 3D 打印技术制备曲面共形电路具有广阔的应用前景, 然而, 由于曲面基材加工误差和导电路径定位误差的影响, 导致曲面电路 3D 打印头高度难以精确控制, 进而影响打印精度。为此, 本文以气动式直写打印为研究对象, 提出了一种“在机测量+线路模型重构”的打印头高度误差补偿方法。设计了一种曲率自适应测量点选取方法, 利用 NURBS 曲线反算法对测量数据进行重构, 还原真实线路模型。通过生成真实线路的打印轨迹, 替换原始理论打印轨迹, 补偿了打印头高度误差。自主搭建了一套集成了在机测量系统的曲面共形电路 3D 打印平台, 设计了直线、圆弧与 NURBS 自由曲线 3 种形状的线路, 进行补偿前后电路打印的对比实验。结果表明, 未进行补偿前, 在线路曲率较大的地方, 线路在基板上的波峰处会产生拉丝现象, 波谷处会产生堆叠现象, 而补偿后的导线线宽比较均匀; 进一步对每条导线的电阻进行测量, 发现各条线路补偿前的电阻值波动较大, 补偿后的电路的电阻值均匀, 且相较补偿前平均降低 65.99%, 最大电阻降幅达 85.75%。

关键词: 曲面共形电路; 3D 打印; 在机测量; 误差补偿; 模型重构; NURBS 曲线

中图分类号: TH164

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460

Error compensation method for 3D printing of curved conformal circuits based on-machine measurement

Liu Qingtao¹, Wei Dongjie¹, Yang Pengtao¹, Yin Enhui², Lyu Jingxiang¹

(1. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of MoE, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Xi'an Ruite 3D Technology Co., Ltd., Xi'an 710061, China)

Abstract: Surface conformal circuit based on the 3D printing technology has broad application prospects. However, due to the influence of machining errors in curved substrates and positioning errors in conductive circuits, it is difficult to accurately control the height of the 3D printing head for surface circuits, which affects printing accuracy. Therefore, this article takes pneumatic direct writing printing as the research object and proposes a print head height error compensation method of “on machine measurement + line model reconstruction”. A curvature adaptive measurement point selection method is designed, which uses the inverse NURBS curve algorithm to reconstruct the measurement data and restore the real line model. By generating the print trajectory of the real circuit and replacing the original theoretical print trajectory, the print head height error is compensated. A 3D printing platform for surface conformal circuits is established independently by integrating with an on-machine measurement system. A comparative experimental plan is also designed on circuit printing before and after compensation with three shapes of circuits: straight lines, arcs, and NURBS-free curves. The results show that before compensation, in areas with high line curvature, the wire drawing phenomenon occurs at the peak of the line on the substrate, and the stacking phenomenon occurs at the valley of the line. The wire width after compensation is relatively uniform. Further measuring the resistance of each wire shows that the resistance values of each line fluctuated significantly before compensation, and the resistance values of the compensated circuit are uniform, with an average decrease of about 65.99% compared to before compensation, and a maximum resistance decrease of 85.75%.

Keywords: curved conformal circuit; 3D printing; on machine measurement; error compensation; model reconstruction; NURBS curves

0 引言

曲面共形电路是指与零部件表面完美贴合,并具有传感、通讯、计算、控制等一定功能的电路^[1]。曲面共形电路可以充分利用物体的空间结构,大大缩小了体积,减轻了重量,是未来实现机电产品集成化和结构功能一体化的重要手段^[2],在航空航天、柔性电子和智能穿戴等领域具有广阔的应用前景^[3-4]。曲面共形电路往往有机、电、光、磁等一体化特点,结构非常复杂,如何实现曲面电路的高精度共形制造一直是该领域的研究热点和难点。曲面映射法^[5-6],裁剪拼接法^[7-8]和表面选区金属化法^[9-10]等传统制备方法大多适用于简单微曲面电路的共形制造,对于实现复杂曲面电路的高精度共形制造则难度较大。而电子3D打印技术能够将导电材料和半导体材料通过挤出、喷涂等工艺,直接沉积在物体表面形成导电线路或电子元器件^[11],具有直接一体化成型、对复杂结构不敏感、污染小等优势,弥补了传统方法的不足。

喷墨打印在电路3D打印中应用较多。Meng等^[12]通过将三维曲面分解为多个互连的二维三角形面片,在刚性弯曲曲面上进行喷墨打印,简化了打印过程,提高了打印精度。然而,用于喷墨打印的导电材料必须是特定表面张力范围内的低黏度溶液,在非平面上很容易流动,因此,喷墨打印技术通常适用于平面电路的制备。于是,Chen等^[13]使用气溶胶喷射打印的办法,以纳米铜墨水为打印材料,在圆柱形玻璃管上预制出导电图案,然后采用激光烧结技术对导线进行固化后处理,制备出螺旋形和方波形曲面电路。Jun等^[14]等人使用气溶胶喷射技术在熔融沉积3D打印的手环模型上沉积出共形天线电路。Gu等^[15]开发了一种用于圆角过渡结构的气溶胶喷射打印的算法,并采用紫外线固化聚合物墨水,实现阶梯形表面之间的平稳过渡。在打印时,喷嘴的直径较小,通常需要施加大压力来克服材料挤出时产生的高毛细管力。电流体动力喷射打印能够在一定程度上克服这一问题,即通过在喷嘴和底板之间施加电场,利用电场力将材料从喷嘴中抽出。Seong等^[16]采用电流体喷射打印技术在曲面玻璃表面制备了宽度为7 μm 的不可见Ag网透明电极。Liu等^[17]研究了一种可编程电流体动力光刻技术,可在微米厚/弯曲基底上打印超薄共形电极,并利用银纳米溶液在半球透明玻璃上打印出S形金属共形电极,银线的宽度可以控制在0.83 μm 。Zou等^[18]开发了一种无掩模电流体动力喷射打印方法,采用稳定的锥喷和电喷雾2种方式印制出紫外光固化的分层微/纳米结构,并在柔性聚合物基底上打印出定制的金属电极阵列。

综上所述,与曲面电路传统制备法相比,这些3D打印技术以非接触、低温条件和按需供料的方式将各种导

电材料直接沉积在零部件结构表面,为人们提供了一种高效简便的曲面电路生产方式。然而,在实践中发现,这些技术存在一些共性问题:一方面,曲面3D打印通常先在计算机零件模型的承载表面上设计共形电路,然后生成电路打印轨迹,这些轨迹在理论上是与承载表面共形的,打印过程中打印头距离零件表面的高度是恒定的。但现实中实际零件表面与计算机模型表面之间存在加工误差,打印过程中打印头的实际高度在不断变化,难以保持理想的恒定值,这将会影响线路的打印精度,甚至导致线路断路;另一方面,电路的打印轨迹是基于工件坐标系生成的。因此,在打印前,需要先对零件装夹位姿进行定位,在这个过程中会产生零件定位误差,从而引起整个打印轨迹偏离其工件坐标系,导致整个电路产生错位。为解决零件加工误差及定位误差的影响,本文以气动式直写打印为研究对象,提出了一种基于“在机测量+线路重构”的误差补偿方法,开发了一套集成在机测量系统的3D打印平台,有效提高了曲面电路3D打印的共形精度。

1 基于在机测量的误差补偿方法

该方法的具体流程如图1所示,其思想的实质是基于在机测量系统,采用误差补偿模块代替原始打印编程模块。首先,从刀位文件的一系列刀位点中提取部分点作为测量点,并进行后处理生成测量G代码。将测量G代码导入到3D打印机中,驱动接触式测头运动,完成对工件表面测量。由于测量G代码是由描述电路打印路径的刀位文件转换而来的,测量的只是工件表面上沿着电路轨迹的形貌点,并不是整个工件表面的形貌。测量完毕后,得到了描述线路真实形状的点云数据。然后利用点云重构技术对点云数据进行插值,还原出真实的线路模型,再通过CAM软件进行后置处理,生成基于真实线路的打印G代码。基于重构的线路模型生成的打印G代码相比基于原始计算机模型生成的打印G代码而言,包含了零件形状误差与几何误差。因此,用重构的打印轨迹G代码替换原始打印轨迹G代码,可以补偿因零件加工误差带来的打印头工作高度误差。最后,将新的电路打印G代码导入到电子3D打印机中,驱动打印头在承载件上打印曲面共形电路。在机测量系统与打印系统虽然集成安装在主轴上,共用同一个运动结构,但工作原理却不一样,通用后处理所生成的打印G代码无法直接用于测量。因此,需要先对这些测量点进行数目确定、测量路径规划,生成测量G代码,通过测量获得点云数据,进而完成真实线路重构。打印系统根据零件真实形貌生成可识别的G代码,完成曲面共形打印。在这个过程中,测量点的布局规划及线路重构是该方法的关键。

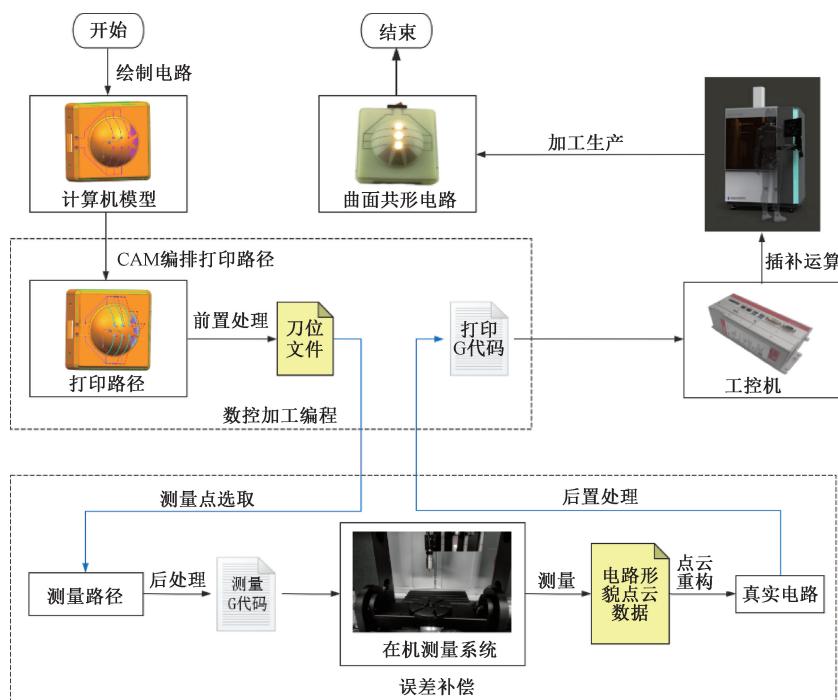


图1 曲面共形电路3D打印误差补偿方法

Fig. 1 Compensation method for 3D printing error of curved surface conformal circuit

2 测量点布局规划及线路重构

2.1 测量点数目确定

测量点的数目主要取决于曲线曲率变化程度、测量精度要求。曲线曲率变化大,测量精度要求高,测量点需要选取的密集些才能更好地反映实际曲线形状;如果曲线曲率变化平缓,测量精度要求不高,少量的测量点即可满足需求。测量点的数量与公差范围和加工能力有关^[19],可由式(1)确定。

$$N = \frac{1}{2} \left[\frac{1+K}{1-K} Z_{\gamma} \right]^2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{2}{1-K} - 1 \right) Z_{\gamma} \right]^2 \quad (1)$$

式中: N 是测量点数目; Z 服从标准正态分布; K 是工艺能力系数,它是公差范围及其分散范围之比; Z_{γ} 为标准正态概率分布的 γ 分位数。

由式(1)可以看出,测量点数目 N 与工艺水平 K 成反比,工艺精度高,测量点就可以选得少一些。由于公差范围与工艺水平正相关,因此,测量点数目与公差范围也成反比,即采样点数量也随着公差范围增大而减小。根据加工精度要求确定公差范围后,代入式(1)便可以求得所需的测量点数目。

2.2 测量点的选取

合理的测量点规划可以在相同测量精度要求下使用更少的测量点,以提高测量效率。目前最常见的测量点

规划方法是均匀选取法,这种方法在确定出测量点数目后,根据曲线长度便可确定测量点间距的大小。设置好测量点间距即可快速生成测量点,如图2(a)所示。在曲率变化平缓的部分,测量点可以较真实地反映原曲线,但在虚线框曲率变化明显的地方,测量点丢失了有关曲率变化的重要信息,无法准确反映真实曲线,显然这种方法不适合曲率变化复杂的自由曲线。因此,本文采用一种曲率自适应测量点选取方法,如图2(b)所示。测量点的分布随曲率变化而变化,曲率变化平缓处测量点选取得比较稀疏,曲率变化明显的地方,测量点分布的相对密集。这种方法兼顾了测量精度的同时,提高了测量效率。

以某一小段自由曲线测量点的确定为例进行说明,图中光滑线条是设计的原始样条曲线,是理想的轮廓,折线线条是CAM软件生成的加工轨迹。如果直接将这些刀位点作为测量点,由于数量过多,测量效率会非常差。因此,基于测量误差要求,依据曲率变化,从这些点中筛选出一些点作为测量点。

参考NURBS曲线插补原理,用弓高误差来衡量测量点选取误差的大小。定义某线段的测量点弓高误差为该线段中间序列点离该线段最长的距离。曲率自适应测量点选取方法原理流程如图3所示。

首先选取曲线端点 C_1 作为第一个测量点,以该点为测量步长计量起点,连接 C_1C_3 (i 为测量弦起点, j 为测量弦末端点,此时, $i=1, j=3$),计算点 C_2 与线段 C_1C_3 的距

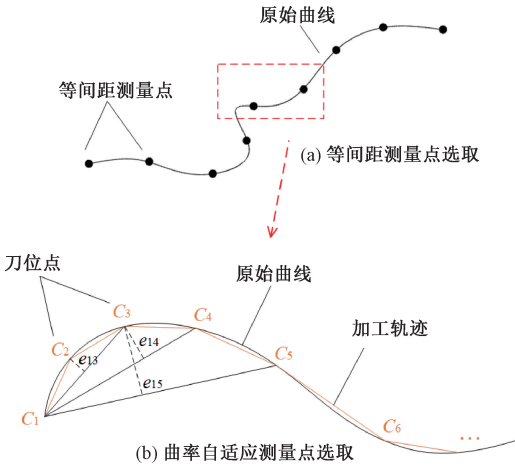


图 2 两种测量点选取方法比较

Fig. 2 Comparison of two methods for selecting measurement points

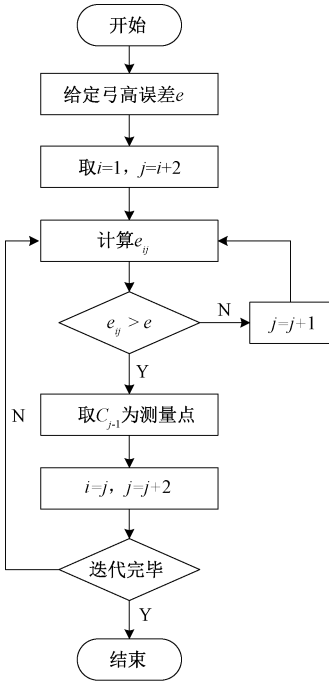


图 3 曲率自适应测量点选取流程

Fig. 3 The selection of curvature adaptive measurement point

离,作为线段 C_1C_3 的弓高误差 e_{13} ,并与给定弓高误差 e 对比。若 $e_{13} > e$,则选取点 C_2 为第 2 个测量点, $|C_1C_2|$ 即为满足弓高误差的测量步长;若 $e_{13} < e$,则连接 C_1C_4 ,分别计算点 C_2, C_3 与 C_1C_4 的距离,比较它们的距离大小,以最远距离作为线段 C_1C_4 的弓高误差 e_{14} (此时假设 C_3 与 C_1C_4 的距离最远),若 $e_{14} > e, e_{13} < e$,则选取前一个点 C_3 作为第 2 个测量点, $|C_1C_3|$ 即为满足弓高误差的测量步长;若 $e_{14} < e$,则以此类推继续计算线段 C_1C_5 的弓高误差 e_{15} ,与给定弓高误差 e 作比较。第 2 个测量点确定后,以第 2

个测量点为测量步长的起点,继续迭代计算第 3 个测量点,如此反复迭代,直至所有点迭代完毕。

2.3 线路重构

测量点确定后,需要根据电路在机测量结果重构出电路曲线模型。本文采用三次 NURBS 曲线对电路进行重构。NURBS 曲线在产品设计和制造中能够精确描述自由曲线和曲面几何轮廓,被国际标准化组织认定为工业产品几何形状描述的唯一数学方法。因篇幅有限, NURBS 曲线的定义及插补原理不再赘述。

基于 NURBS 曲线的定义和获得的测量点,推导实际曲线重构过程如下:

- 1) 基函数次数为 k ;
- 2) $l+1$ 个型值点: $D = (d_0, d_1, \dots, d_l)$;
- 3) 控制点个数 $n+1$ 与节点个数 $m+1$ 满足 $m = n + k + 1$;
- 4) 节点向量非递减,且两端节点值重复 $k+1$ 次,即满足如下公式:

$$\begin{cases} u_0 = u_1 = \dots = u_{k-1} = u_k = 0 \\ u_{k+1} \leq u_{k+2} \leq \dots \leq u_{n-1} \leq u_n \in [0, 1] \\ u_{n+1} = u_{n+2} = \dots = u_{n+k} = u_{n+k+1} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

结合 NURBS 曲线的定义可以看出,当参数 u 取一具体值 u_j 时, $N_{i,k}(u_j)$ 是一确定值,也就唯一确定了曲线上的一个型值点。因此, u 取完定义域内所有值时,即可得到整条完整的样条曲线。此时,未知参数为节点值、权因子以及控制点坐标。如图 4 所示,若构造出合理的节点向量 $U = \{u_0, u_1, \dots, u_m\}$ 与型值点满足 $D(u_{i+k}) = d_i$ 的一一对应关系,就可以求得与 u 对应的有理基函数。然后,确定一组对应的权因子后,即能反算出控制点列表 $D = \{p_0, p_1, \dots, p_{n-1}, p_n\}$ 。在满足 NURBS 曲线定义的前提下,就可以构造出一条 k 次 NURBS 曲线依次经过的所有型值点。

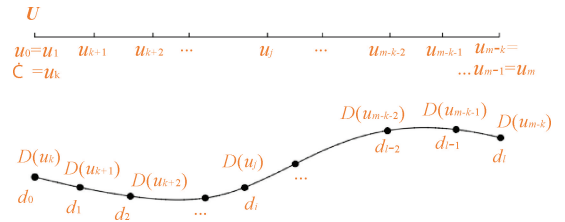


图 4 节点值与 NURBS 曲线型值点对应关系

Fig. 4 Correspondence between node values and NURBS curve type value points

构造节点向量的过程也称为型值点的参数化。因为首末节点重复度为 $k+1$,所以 d_0 应该与 $D(u_k)$ 对应,而 d_l 与 $D(u_{m-k})$ 对应,这样才能实现曲线首末端点、首末控制顶点和给定的首末型值点重合。由图 4 可以推断出型值

点个数,节点个数与控制点个数之间满足如下关系:

$$\begin{cases} m=l+2k \\ n=l+k-1 \end{cases} \tag{3}$$

式中: m 为最后一个节点的下标, n 为最后一个控制点的下标, l 为最后一个型值点的下标, k 为曲线阶数。

得出型值点后,即可重构出零件实际形貌的样条曲线,打印系统根据零件实际形貌实时调整打印头高度,完成打印作业。

3 实验验证

为验证本文所提方法的有效性,设置了在机测量及误差补偿前后的曲面电路打印对比实验。

3.1 实验平台搭建

本文依托自主研发的集成在线测量系统的曲面电子电路 3D 打印设备开展相关研究,如图 5 所示。该设备机身主要由运动系统、主轴、打印和测量一体化装置、工作台、气压动力系统和控制系统等组成。其中,运动系统由龙门式三轴运动系统和双转轴工作台组成。三轴运动系统包括 X 、 Y 、 Z 等 3 个方向,由旋转电机经滚珠丝杠传动来带动各轴实现直线往复运动。 X 、 Y 、 Z 各运动轴装有光栅尺,采用 4 细分,识别精度达到 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。打印机配有刀尖点控制(rotation tool center point, RTCP)功能,改变零件位姿的同时,可实现打印头跟随。打印机主轴固定打印和测量一体化装置并带动其运动,主轴上有 5 个工位,包括 1 个在机测量工位,2 个气动直写打印工位,2 个空



图 5 实验平台

Fig. 5 Experimental platforms

工位(可根据需要调整改装)。各工位之间既相互独立又协调工作,可实现多材料复合打印。测量系统采用触发式测头,可同时满足 X 、 Y 、 Z 3 个方向的测量,也可以对零件侧壁进行测量。打印材料为导电银浆。打印头采用锥形打印头。

3.2 实验方案设计

本次实验设计的曲面共形线路模型图如图 6 所示,由承载零件和线路 2 部分构成,尺寸为 $40\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 。图 6(a)是零件轴测图,图 6(b)是零件俯视图。该零件除了上表面是 NURBS 自由曲面外,其余 5 个面均为平面。零件的上表面均匀布置了 9 条线路,这 9 条线路紧紧贴合在零件上表面,形成曲面共形电路。从图 6(a)来看,所有线路均为空间自由曲线。从图 6(b)来看,线路一共分为 3 种线型,1、2、3 号线为直线,4、5、6 号线为半径为 40 mm 的圆弧,7、8、9 号线为 NURBS 自由曲线。线路是由直线到圆弧再到曲线依次变化,考虑了线型对实验结果的影响。图 6(b)中 XM-YM-ZM 为工件坐标系,每条线之间的间隔为 4 mm ,线路的位置距离短边 6 mm ,长边 4 mm 。

实验流程如下:

- 1) 首先采用 FDM 式 3D 打印机打印出承载零件。打印材料选择 PLA 丝材。为区分对比实验,打印出两组导线,第 1 组导线不设置补偿,第 2 组导线设置补偿。
- 2) 打印出零件以后,使用软件编排打印路径。线路的打印材料选用本诺 1820A2。导线定位要准确,每条线的间距以及位置严格按照图 6 所示进行。
- 3) 设置每条导线的打印高度,原则为“同种导线高度不同,同一高度线型不同”。设置 1、4、7 号线的打印头

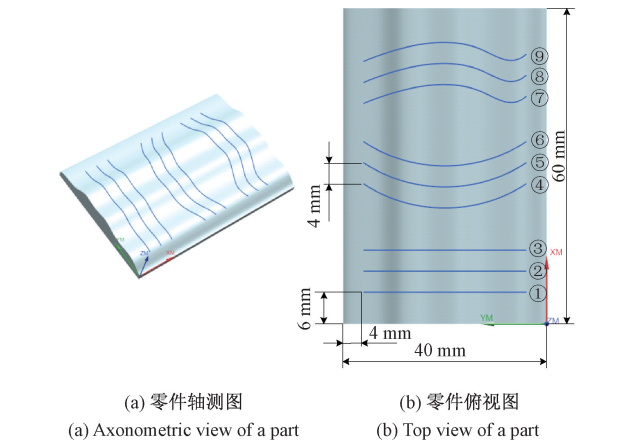


图 6 实验用曲面共形线路模型

Fig. 6 Experimental curved conformal circuit model diagram

高度为 0.08 mm ,2、5、8 号线的打印头高度为 0.10 mm ,3、6、9 号线的打印头高度为 0.11 mm 。

4) 打印完线路后用显微测距仪测量每条线路的线宽,导线首末端点直线距离为 32 mm ,每隔 1 mm 测量一个并记录线宽,故每条线需记录 32 个线宽值。

5) 使用电阻率测量仪对每条线路的电阻进行测量并记录,测量过程重复 3 次取平均值。

3.3 实验结果

选择几处比较有代表性的导线线段,用电子显微镜对其进行观察,图 7 展示了几处局部线路电子显微镜照片。由图 7(a)与(b)中(i)区域矩形框选的导线首端放大图可以看到,补偿前后的导线端部都比较粗。这是由

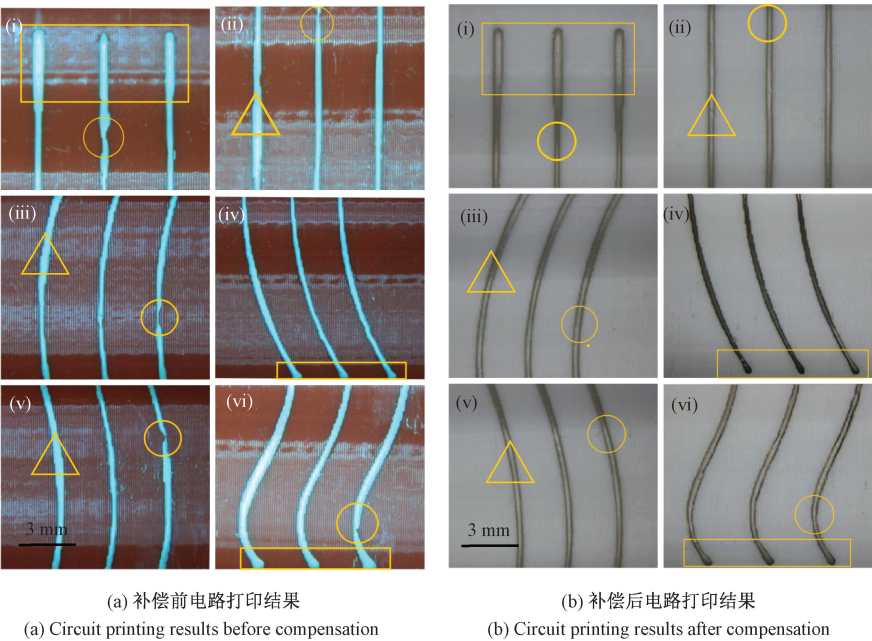


图 7 电子显微镜下曲面共形电路打印结果

Fig. 7 Printed results of curved conformal circuits under electron microscopy

于电磁换向阀启动瞬间,压缩空气会产生一定的冲击,导电材料在瞬时高压作用下喷射而出,此时材料挤出流量会偏大所导致。由图 7(a)与(b)中(vi)区域矩形框选的导线尾端放大图可以看到,补偿前后的导线端部均产生了堆积现象。这是由于电磁换向阀关闭瞬间,在残余气压作用下仍有少量材料会沿着针头流出,而打印头此时处于抬刀状态,即XY位置不变,只有Z方向抬高,因此在尾部形成了圆点状堆积块。这两种现象均是气压直写打印自身的缺陷导致,是目前亟待解决的问题。

图 7(a)中(i)、(ii)、(iii)、(v)、(vi)区域圆圈标记的导线处产生了拉丝现象,线路几乎断路,原因是打印头行进到零件基板波峰处,由于打印头高度误差,材料实际挤出长度小于打印头前进距离,材料与零件波峰接触时被零件拉伸而产生应变,所以导致拉丝现象。而图 7(b)

中(i)、(ii)、(iii)、(v)、(vi)区域圆圈标记位置没有拉丝现象,说明对打印头工作高度误差进行补偿后,解决了这一问题,提高了导线精度。

图 7(a)中(ii)、(iii)、(v)区域三角形标记的导线处产生了堆积现象,这是因为打印头行进到零件基板波谷处,由于打印头高度误差,材料实际挤出长度大于打印头前进距离,材料之间相互挤压而产生堆积现象。而图 7(b)中(ii)、(iii)、(v)区域三角形标记位置线宽均匀,解决了堆积问题。

记录每条导线的线宽变化数据,计算均值与标准差,并绘制出折线图,分析线宽变化情况及均匀度。两组导线线宽的均值与标准差计算结果如表 1 所示。由表 1 可以看出,第 2 组导线的线宽均值与线宽标准差均小于第 1 组导线,说明第 2 组导线的导线线宽波动程度较小,粗细更加均匀。

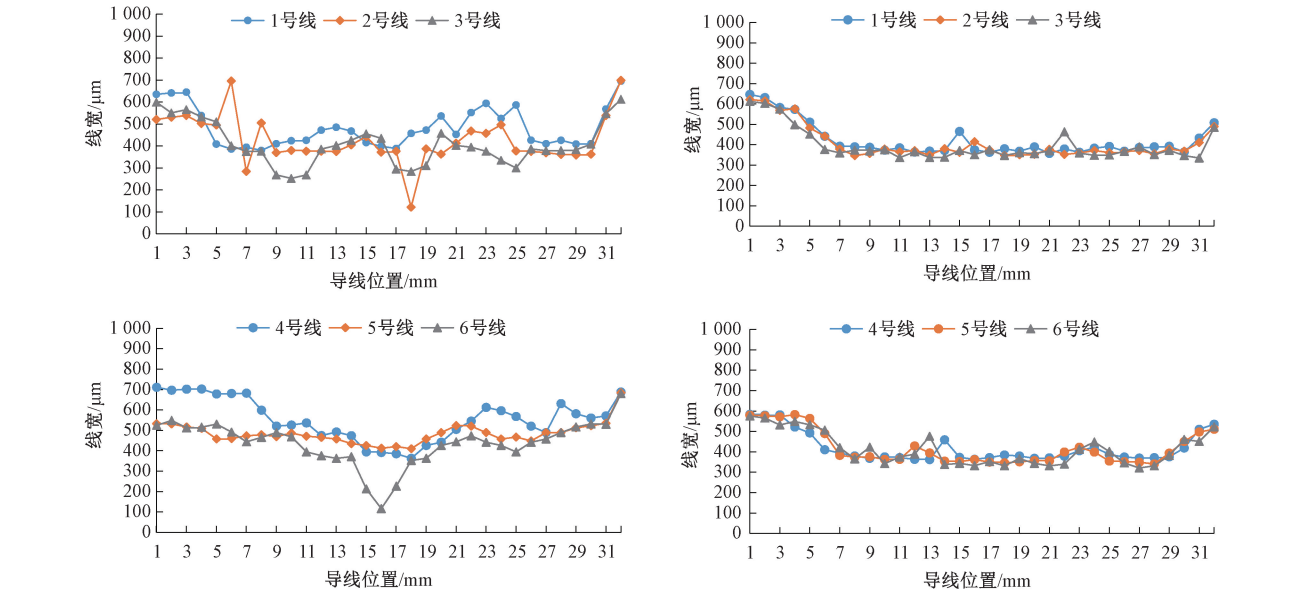
表 1 两组导线线宽的均值与标准差计算结果

Table 1 Mean value and standard deviation of two groups of conductors widths

评价指标	线号	1 号线	2 号线	3 号线	4 号线	5 号线	6 号线	7 号线	8 号线	9 号线
均值/ μm	第 1 组导线	482.51	427.82	407.82	554.54	484.33	437.94	614.27	449.11	517.05
	第 2 组导线	421.17	406.28	395.99	418.84	416.99	412.70	405.06	396.42	370.48
标准差/ μm	第 1 组导线	88.98	108.28	96.68	103.34	50.18	106.52	104.17	88.11	110.82
	第 2 组导线	80.80	79.59	76.34	70.82	81.00	79.59	69.81	67.83	71.30

两组零件导线线宽随长度变化折线图如图 8 所示。图 8(a)是补偿前导线线宽变化,图 8(b)是补偿后的导线线宽变化,对比两组图可以发现补偿后的导线宽度虽然仍有几处波动,但波动程度小,整体变化比补偿之前更加稳定,说明粗细更加均匀。证明本文所提的打印头工作高度误差补偿方法是有效的。另外,两组导线大致在的首端 1~5 mm,尾端 28~32 mm 位置之间的导线平均线

宽比较粗,这也对应了图中的矩形框选的导线首末端的堆积现象,进一步证明了堆积现象并非由打印头高度误差所导致。第 1 组导线中,2 号线 5~8 mm、17~19 mm,6 号线 14~18 mm、9 号线 11~13 mm、29~31 mm 处的波动值很大,正好对应了图中圆圈中的导线局部缺陷部分,其中最细的线宽只有 0.1~0.2 mm,这是由拉丝现象导致的。



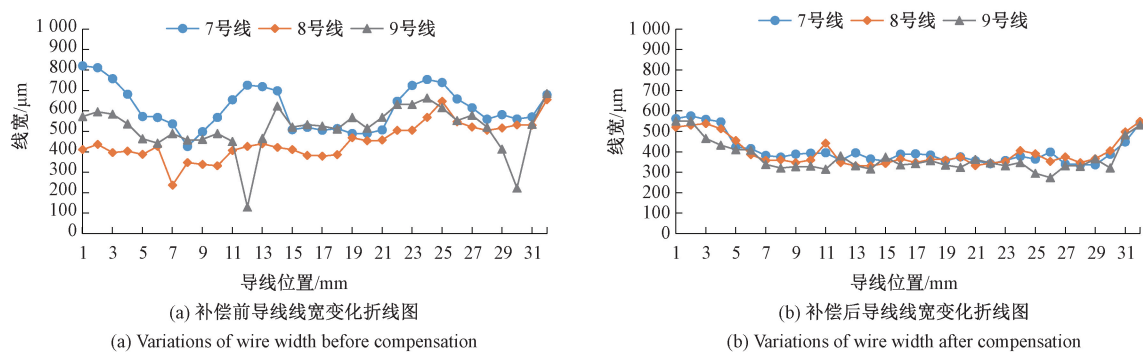


图 8 补偿前后导线线宽变化折线图

Fig. 8 Wire width variations before and after compensation

进一步对两组导线的电阻值进行测量,结果如表 2 所示。第 1 组导线的 2 号、6 号、9 号导线电阻值分别为 3.245、4.519、4.946 Ω ,其他导线电阻值均未超过 1 Ω ,2 号、6 号、9 号导线电阻相较其他导线的电阻非常大,这是因为拉丝现象导致局部线路的横截面积变得远小于横截面积均值。由于电阻值与横截面积成反比,因此这几

处导线的电阻值变得很大。
对比两组导线的电阻值,2 号、6 号、9 号导线电阻分别下降了 2.613、3.825、4.241 Ω ,说明经过打印头高度误差补偿后明显改善了导线的局部缺陷。各条导线的电阻平均降幅达 65.99%,最大电阻降幅达 85.75%。可见,该方法能够显著降低导线电阻,改善导电性,提高打印精度。

表 2 两组导线电阻测量结果

Table 2 Measurement results of two sets of wire resistance

测量参数	线号									平均电阻值
	1 号线	2 号线	3 号线	4 号线	5 号线	6 号线	7 号线	8 号线	9 号线	
第 1 组导线电阻/ Ω	0.856	3.245	0.824	0.892	0.902	4.519	0.922	0.935	4.946	2.005
第 2 组导线电阻/ Ω	0.648	0.632	0.676	0.679	0.685	0.694	0.721	0.699	0.705	0.682
电阻降幅/%	24.30	80.52	17.96	23.88	24.06	84.64	21.80	25.24	85.75	65.99

4 结 论

曲面共形电路在航空航天、柔性电子和智能穿戴等领域具有广阔的应用前景,本文围绕如何提高 3D 共形打印质量,提出了一种基于在机测量的误差补偿方法,自主开发了一套集成在机测量系统的 3D 打印平台,通过实验验证了所提方法的有效性。该方法能够依据生成的真实零件形貌轨迹模型进行打印,有效避免了承载零件的加工误差,以及零件转移测量带来的重复定位误差,显著改善了电路的线宽均匀性和导电性,为实现高精度曲面共形电路打印提供了一种可行方案。本文只研究了共形导电路径的单一直接打印,下一步应在多工位切换功能的基础上,研究多工艺多材料复合打印技术,这对于多层垂直互联、多材料异质、内部空腔、细微结构等复杂曲面电路的打印具有重要意义。

参考文献

[1] 黄进,赵鹏兵,王建军,等. 共形电子的增材制造技

术[J]. 电子机械工程, 2022,38(6): 6-16.
HUANG J, ZHAO P B, WANG J J, et al. Additive manufacturing technology of conformal electronics [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2022, 38(6): 6-16.
[2] 兰红波,李红珂,钱垒,等. 电场驱动喷射沉积微纳 3D 打印及其在先进电路和电子制造中的应用[J]. 机械工程学报, 2023,59(9): 230-251.
LAN H B, LI H K, QIAN L, et al. Electric-field-driven Jet deposition micro-nano 3D printing and its applications in manufacturing advanced circuits and electronics [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59 (9): 230-251.
[3] 赵云桐,刘长林,孙一铭,等. 基于曲面共形电路多轴联动打印控制系统设计[J]. 制造业自动化, 2021, 43(3): 115-121.
ZHAO Y T, LIU CH L, SUN Y M, et al. Design of multi-axis linkage printing control system based on curved conformal circuit [J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(3): 115-121.

- [4] ZHANG H, HUI J Z, LYU J X, et al. A novel method to combine fused deposition modelling and inkjet printing in manufacturing multifunctional parts for aerospace application [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 4405-4426.
- [5] CARLSON A, BOWEN A M, HUANG Y G, et al. Transfer printing techniques for materials assembly and micro/nanodevice fabrication [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(39): 5284-5318.
- [6] SIM K, CHEN S, LI Z W, et al. Three-dimensional curvy electronics created using conformal additive stamp printing [J]. *Nature Electronics*, 2019, 2(10): 471-479.
- [7] XU S, ZHANG Y H, CHO J, et al. Stretchable batteries with self-similar serpentine interconnects and integrated wireless recharging systems [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1543.
- [8] LIU J P, JIANG S, XIONG W N, et al. Self - healing kirigami assembly strategy for conformal electronics [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32 (12): 2109214.
- [9] ZHAN J, TAMURA T, LI X T, et al. Metal-plastic hybrid 3D printing using catalyst-loaded filament and electroless plating [J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 36: 101556.
- [10] DIXIT N K, SRIVASTAVA R, NARAIN R. Improving surface roughness of the 3D printed part using electroless plating [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L-Journal of Materials, Design and Applications*, 2019, 233(5): 942-954.
- [11] HONG W T, AN J, CHUA C K, et al. Metallic nanoparticle inks for 3D printing of electronics [J]. *Advanced Electronic Materials*, 2019, 5(5): 1800831.
- [12] MENG F B, HUANG J, ZHAO P B. 3D-printed conformal array patch antenna using a five-axes motion printing system and flash light sintering [J]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2019, 6(2): 118-125.
- [13] CHEN I M, LIU Y T, YU X W, et al. Aerosol printing and flash sintering of conformal conductors on 3D nonplanar surfaces [J]. *Manufacturing Letters*, 2022, 31: 119-123.
- [14] JUN S Y, ELIBIARY A, SANZ-IZQUIERDO B, et al. 3D printing of conformal antennas for diversity wrist worn applications [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 2018, 8(12): 2227-2235.
- [15] GU Y, HINES D R, YUN V, et al. Aerosol-Jet printed fillets for well-formed electrical connections between different leveled surfaces [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2017, 2(11): 1700178.
- [16] SEONG B, YOO H, NGUYEN V D, et al. Metal-mesh based transparent electrode on a 3-D curved surface by electrohydrodynamic jet printing [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, 24 (9): 097092.
- [17] LIU J P, XIAO L, RAO Z F, et al. High-performance, micrometer thick/conformal, transparent metal-network electrodes for flexible and curved electronic devices [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3 (8): 1800155.
- [18] ZOU W H, YU H B, LV X F, et al. Electrohydrodynamic direct-writing fabrication of microstructure-enhanced microelectrode arrays for customized and curved physiological electronics [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2022, 9(31): 2201197.
- [19] 吴石, 李容义, 刘献礼, 等. 基于自适应采样的曲面加工误差在机测量方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2015, 37(1): 83-90.
- WU SH, LI R Y, LIU X L, et al. On-machine measurement method of processing error based on the mould surface adaptive sampling [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 37(1): 83-90.

作者简介



刘清涛, 2006 年于华北水利水电大学获得学士学位, 2009 年于长安大学获得硕士学位, 2011 年于长安大学获得博士学位, 现为长安大学副教授, 主要研究方向为电子增材制造、低碳制造。

E-mail: qtaoliu@chd.edu.cn

Liu Qingtao received his B.Sc. degree from North China University of Water Resources and Electric Power in 2006, received his M. Sc. degree from Chang'an University in 2009, and received his Ph. D. degree from Chang'an University in 2011. He is currently an associate professor at Chang'an University. His main research interests include electronic additive manufacturing and low carbon manufacturing.



吕景祥 (通信作者), 2008 年于浙江大学获得学士学位, 2014 年于浙江大学获得博士学位, 现为长安大学副教授, 主要研究方向为电子增材制造、先进制造与装备集成。

E-mail: lvjx @chd.edu.cn

Lyu Jingxiang (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Zhejiang University in 2008, and received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2014. He is currently an associate professor at Chang'an University. His main research interests include electronic additive manufacturing, advanced manufacturing, and equipment integration.