

多自由度压电喷射 3D 打印装置设计与实现

司恩 霍蛟飞 王若晨 李军翔

西京学院, 陕西省西安市, 710123;

摘要: 目前曲面上共形天线的制造方法工业上大多使用的是传统电子印刷技术, 但应用电子印刷技术来实现不规则复杂曲面上的共形天线的高精度制造难度较大, 存在制造精度有限和工艺复杂性较高等局限性, 且不能灵活的实现不同曲面共形天线的短周期制造。为此基于六自由度机械臂和压电阀喷射打印, 设计了一款多自由度压电喷射 3D 打印装置及配套打印工艺方案, 并以实际加工进行测试。实验结果表明: 所提出的打印装置及工艺方案可以实现曲面上共形电路的打印, 且电路形貌性能良好, 实验结果符合预期。

关键字: 多自由度; 压电喷射; 3D 打印; 设计

DOI:10.69979/3041-0673.25.04.043

1 引言

共形天线是一种贴合载体外形的天线阵列, 广泛应用于飞机^[1]、导弹、卫星等高速载体, 优点在于其与载体外形高度融合, 不破坏气动布局和隐身特性, 同时节省内部空间, 提升载荷能力, 增强探测和通信性能。针对曲面上共形天线的制造方法工业上大多使用的是传统电子印刷技术^[2], 但应用电子印刷技术来实现不规则复杂曲面上的共形天线的高精度制造难度较大, 存在制造精度有限和工艺复杂性较高等局限性, 且不能灵活的实现不同曲面共形天线的短周期制造。针对上述问题, 有部分人群采取的策略是深入探究增材制造技术在该领域内的应用可能性。

夏驰、刘灏强等^[3-4]构建并集成了激光烧结系统、机械臂运动控制系统、点胶系统, 实现表面共形 3D 打印成型; XIE 等^[5]基于势场算法, 综合考虑打印效率与机械臂运动学, 实现在机器人多轴打印机上自动生成打印任意自由曲面的路径; 张帆等^[6]针对机械臂增材制造中运动与挤出的协同问题进行了研究, 通过 EtherCAT 总线方式, 改善了挤出与运动间的同步性。总体而言, 多自由度 3D 打印正处于新兴态势, 相关工作和理论仍处于起步阶段, 未形成系统全面的解决方案, 且受打印设备限制, 不能实现在大型复杂曲面上电子电路的 3D 打印。基于以上原因, 本研究提出了一种基于六自由度机械臂的压电喷射 3D 打印装置及方法, 专门用于大幅面曲面复杂电子线路的制造。该装置结合了六自由度机械臂的高灵活性、压电喷射打印的高精度以及多级过滤模

块的稳定性, 能够实现复杂曲面电子线路的高精度、高效制造。通过三维建模仿真、TCP 坐标校准、轨迹规划、分区打印以及后处理等一系列工艺步骤, 本装置能够精确地将电子线路打印在任意曲面结构上, 满足现代微纳电子制造对复杂结构和高精度的需求。

2 机械方案设计

2.1 机械臂设计

本研究使用的机械臂为 UR10e 机械臂, 通过六个轴的协同运动, 该六自由度机械臂能够在三维空间内实现高精度、多姿态的运动控制, 其具体参数如下表 1 所示, 能够满足复杂曲面电子线路打印任务对机械臂灵活性和精度的严格要求。

表 1 机械臂参数

规格	参数
有效载荷	10 kg (22 lbs)
工作半径	1300 mm (51.2 in)
精确度	2.0 N / 0.02 Nm
准确度	5.5 N / 0.60 Nm

2.2 压电喷射系统设计

本装置的压电阀选用的是铭赛 KPS2000 压电阀喷射系统, 压电喷射阀头由进料组件、流道组件、喷头组件、阀体和校准调整杆组成, 用于实现高精度的液体喷射控制。系统的核心部件为阀体内的压电陶瓷, 其工作原理基于压电效应: 当施加电压时, 压电陶瓷发生形变, 这

种形变进一步转化为机械振动。振动通过流道组件传递至喷头组件的液体腔，使腔内的液体产生周期性的压缩与膨胀。随着液体的压缩和膨胀，液体从喷头组件的细微喷孔中喷出，形成可控的喷射效果，从而实现精确的点胶与打印功能。为确保喷射性能和点胶质量的稳定性，系统配备了校准调整杆。该调整杆用于精确控制压电阀的撞针与喷嘴之间的距离，从而优化胶液的喷射性能。

2.3 多级过滤模块设计与功能

为确保压电喷射系统中阀体的稳定运行和进料的可靠性，本研究设计了一种多级过滤模块，用于处理气泵产生的压缩空气。如图 1 所示，气泵产生的压缩空气首先通过第一油水分离器实现初步净化，去除其中的大部分油分和水份；随后进入冷干机，通过降低气体温度，进一步去除其中的水份；然后通过干燥管过滤掉微小杂质并吸收残留的水份；最后再由第二油水分离器，进行最后的过滤处理，进一步去除可能残留的油分和水份，确保气体的干燥度和清洁度。经过上述多级过滤和处理后，最终得到的压缩空气具有干燥、低温、清洁的特点，能够有效实现阀体的冷却和进料功能，从而确保压电喷射系统在长时间运行中的稳定性和可靠性。



图 1 多级过滤模块

3 打印测试

3.1 打印工艺流程

步骤一是建立三维模型，将建完的三维模型导入仿真系统按最大行程进行仿真；

步骤二是校准与测试，首先借用标定针进行标定喷头中心到机械臂末端法兰盘中心的位置偏移量，确定喷头中心的 TCP 坐标。然后使打印喷头绕定位工装尖端以球面形式做绕点运动，复合喷头坐标轴位置及角度，检验精度；

步骤三是将需要打印的模型导入切片软件进行切片和轨迹规划，编辑生成全部打印代码后进行代码拆分，以实现分区域打印；

步骤四是开始打印，首先是调整机械臂位姿，将机械臂调整到适合打印的位姿状态下，根据预设的打印路径和压电喷射阀参数，在不规则曲面基底上进行打印；

步骤五是后处理与检验，打印完成将工件放入烘箱中进行加热保温，进一步提升导电路径性能。后处理完成后通过万用表对线路表面进行连通性测试，确保连通性正常。

3.2 打印测试结果

通过在曲面基材上进行导电路径打印对该设备进行测试，如图 2 所示，在打印过程中可以实现机械臂与喷头之间的运动——喷射协同，打印过程中机械臂运行平稳，无抖动现象。打印结束后对导电路径进行观测，可以发现导电路径宽度均匀，形貌良好，线宽可以达到 0.3nm ，线间距 0.5nm 以内，薄层电阻约为 $40\text{ m}\Omega/\square$ 。



图 2 打印测试图

4 结论

本研究成功开发了一种基于六自由度机械臂的压电喷射 3D 打印技术，专为复杂曲面电子线路的高精度制造设计。该技术融合了六自由度机械臂的灵活操控性、压电喷射打印的高精度特性以及多级过滤模块的稳定性优势，有效突破了传统制造方法在复杂曲面结构制造中的效率和精度限制。通过一系列工艺步骤，包括三维建模、TCP 坐标校准、轨迹规划、分区打印及后处理等，该技术能够精确地在任意曲面结构上打印电子线路，满足现代微纳电子制造对复杂结构和高精度的严格要求。

实验验证显示,该技术显著提高了制造效率和质量,展现出良好的稳定性和可靠性。本研究不仅为复杂电子线路的制造提供了一种创新的技术途径,也为微纳电子制造领域的发展注入了新的活力。

参考文献

[1]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(06):311-313+332.
[2]史则颖,叶冬,彭子寒,等.飞行器共形天线新型制造工艺及应用研究进展[J].航空学报,2021,42(10):157-173.
[3]夏驰,曹良成,冯联华,等.机械臂 3D 打印技术及系统的试验研究[J].机械设计与制造,2018(2):107-109. XIA C, CAO L C, FENG L H, et al. Experimental study of 3D printing technology an

d systems based on robotic manipulator [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(2):107-109.

[4]刘灏强.曲面共形 3D 打印系统的设计与实现[D].重庆:重庆大学,2017. LIU H Q. Design and implementation of curved surface conformal 3D printing system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.

[5]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.

[6]张帆,肖述文,涂一文,等.多轴机械臂 3D 打印的运动-挤料协同控制方法[J].机械设计与研究,2021,37(06):141-147+154.