

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.046

混合直书写打印技术制备平面电路

李邦国^{1,2}, 张鑫^{1,2}, 刘贺尊^{1,2}

(1. 江南大学 机械工程学院, 江南先进食品制造设备与技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;

2. 江苏省微纳增减材制造工程研究中心, 江南大学 先进技术研究院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 该研究展示一种新颖的方法, 通过直接墨水打印和直书写丝线打印技术在平面上制造并集成电子元件, 包括电阻器、电感器和电容器, 形成功能电路。实验结果表明: 采用该方法制造的电子元件具有良好的稳定性和潜在的适应性, 并且打印的电路也成功实现了特定的功能。这种混合直书写打印技术不仅节省材料, 而且提高了电路功能的稳定性和材料利用效率, 为快速打印具有所需电路功能的电子制造领域开辟了新的道路。

关键词: 直书写打印; 平面电感; 平面电容; LC 电路

中图分类号: TN70 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)03-0233-04

Fabrication of Planar Circuits Using Hybrid Direct-Write Printing Technology

LI Bangguo^{1,2}, ZHANG Xin^{1,2}, LIU Hezun^{1,2}

(1. Jiangnan Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Province Engineering Research Center of Micro-Nano Additive and Subtractive Manufacturing, Institute of Advanced Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: This study presents a novel method for fabricating and integrating electronic components—including resistors, inductors, and capacitors—on a planar substrate using a combination of direct-ink printing and direct-wire writing techniques to form functional circuits. Experimental results show that the electronic components produced by this method exhibit good stability and potential adaptability, and the printed circuits successfully achieve specific functions. This hybrid direct-write printing technology not only saves material but also improves circuit functional stability and material utilization efficiency. The research opens a new pathway for rapid printing of electronics with desired circuit functions.

Keywords: direct-write printing; planar inductor; planar capacitor; LC circuit

0 引言

最近几年, 电子制造领域对于开发高效、省时和节能的创新制造策略的需求越来越大。在众多的制造技术中, FDM 打印^[1]、光刻打印^[2]以及丝网印刷^[3]等传统技术极大地促进了科学技术的快速发展。但是这些方法的缺点在于打印过程复杂、制造成本昂贵、无法快速大批量生产平面电子电路。同时, 新兴的直书写打印技术^[4]具有简单化和精细化电路图的能力, 为直接快速打印电子元件与电路开辟了新的道路。不仅如此, 直书写打印技术在制造共形天线阵列^[5]、薄膜晶体管^[6]、射频识别标签^[7]等领域也展现出了巨大的潜力。因此, 直书写打印技术在制造电子电路这一方面提供了一种具有参考价值的方案。

同时, 本课题组也为这项工作提出了一种用于柔性电子器件的导线快速制造技术, 称为“直接导线打印”技术^[8]。该技术有效解决了通过丝网印刷、喷涂、3D 打印等所制造的油墨导线的性能不稳定的问题, 避免了复杂工艺, 这为快速且容易地制造平面内布线图案和 3D 结构电路^[9]提供了指导。为了进一步扩展直书写打印电子产品的使用范围, 我们用直书写打印技术与直书写打印丝线技术将电路中最基本的 3 个元件, 包括电阻器、电感器和电容器及其组合打印在平面薄膜上。这一研究方案为快速打印具有所需电路功能的电子制造领域开辟了新的途径。

1 材料与方法

打印电容的原材料为导电碳浆与银浆, 打印

基金项目: 机械结构力学及控制国家重点实验室开放课题资助项目 (MCMS-E-0422G04); 纳智能材料器件教育部重点实验室开放课题基金资助项目 (NJ202003 (INMD-2021M05))

第一作者简介: 李邦国 (1999—), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 研究方向为智能制造与传感, 2760734838@qq.com。

的图案采用最为广泛的平面叉指电容。

在打印导电碳浆时,将一定量的已经制备好的导电碳浆装入打印针筒,将打印针筒与气压控制阀相连后,夹持在数控三轴运动平台上用 3D 打印直书写的方式进行打印。经过调试,打印针筒的打印针头内径为 1 mm,打印速度为 5 mm/s,挤出气压为 0.25 MPa,此时可以取得较好的打印质量。打印导电碳浆后利用烘箱以 120 ℃ 烘干 120 min 完成固化形成碳浆电容。具体的打印流程如图 1 所示。(本刊为黑白印刷,相关疑问请咨询作者)

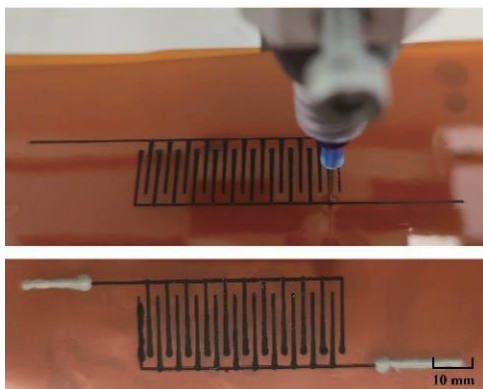


图 1 直书写技术打印电容

如图 2 所示,直书写打印丝线技术的关键在于金属丝与基底的粘附所带来的牵引力应克服接收到的对金属丝的阻力,其中阻力主要包括金属丝与针内壁之间的摩擦力,以及导致金属丝沿移动路径弯曲或形状变化的机械力。这里选择了具有良好柔韧性的细铜丝作为导线,并选择了与铜丝具有良好粘附性的双面黏性聚酰亚胺 (PI) 膜作为基底。在打印机器代码中写入圆形 G 代码,设置好打印半径、打印间隙以及打印速度后,最终通过导管引出铜线并且粘附在基底上形成了电感。采用直书写打印丝线技术不需要考虑打印气压,因为是丝线拖拽形成平面电感,同时也省去了制备浆料的过程。

2 实验测试

为了准确记录不同长度电容的数值,本实验采用了阻抗分析仪来测量打印电容的稳定性及其变化情况。阻抗分析仪具备长时间稳定地、准确地测量打印电容数值的能力,有助于评估打印电容是否符合电路应用的要求。详细的测量场景如图 3 所示。

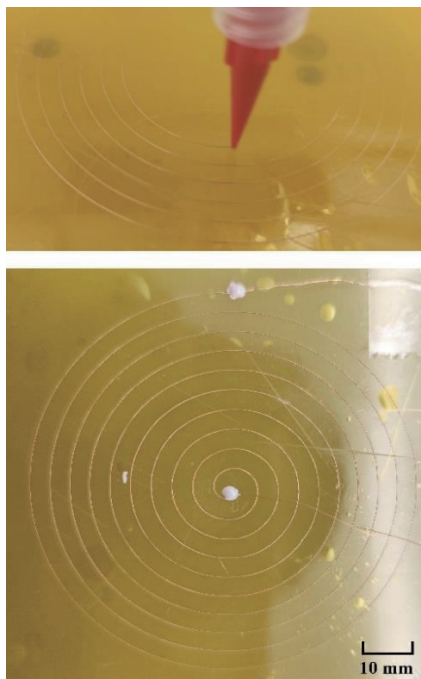


图 2 直书写打印丝线技术制造电感

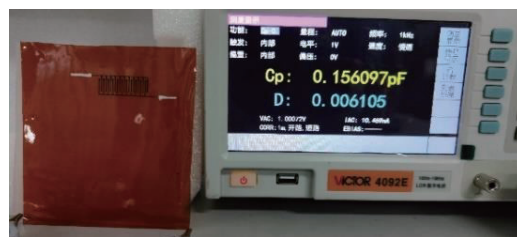


图 3 阻抗分析仪测量电容与电感

为了验证直接书写的碳浆印刷电容器的稳定性,我们记录了 24 h 内 3 个不同电容样品的容量随时间变化的数据。根据图 4 显示的结果,这 3 种电容样品在时间推移时未显示出明显的差异,这表明直书写印刷技术制造的碳浆电容器具有相对稳定的容量表现,可用作短期电子电路元件。

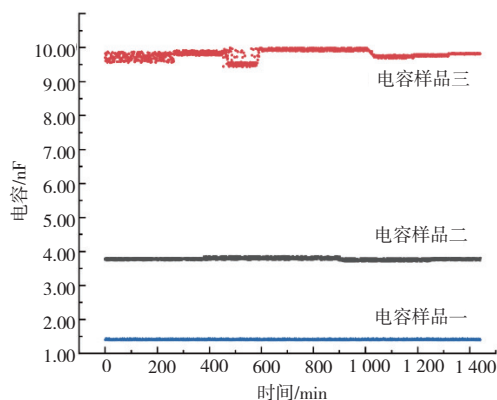


图 4 电容值随时间的变化

鉴于平面叉指电容的电容值与长度密切相关,我们进行了不同长度下电容值的实验观察。如图5所示,记录了20~40 cm的不同长度电容的测试结果,每增加2 cm长度等同于增加一个叉指间隙。实验结果表明随着长度增加,电容值也相应增大,通过拟合曲线可以看出打印电容与长度之间呈现出线性增长的趋势。这一现象进一步说明了直书写打印的电容在适当范围内能够实现一次性成型的特性。

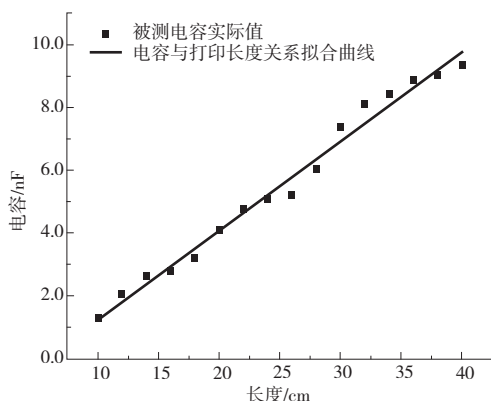


图5 不同长度下的电容值

采用柔性铜丝作为原材料,因此通过打印制备的电感表现出极高的稳定性。电感大小受打印半径影响,故实验中记录了不同打印半径下的电感数值。当打印间距为2 mm时,如图6所示。随着打印半径的增大,电感数值也相应增加。相比铜丝打印,银浆制备的电感存在轻微波动,不如铜丝打印的电感稳定。这突显了直书写打印丝线技术所制备的电感具有出色的可控性和稳定性,极为适用于电路元器件的制造。

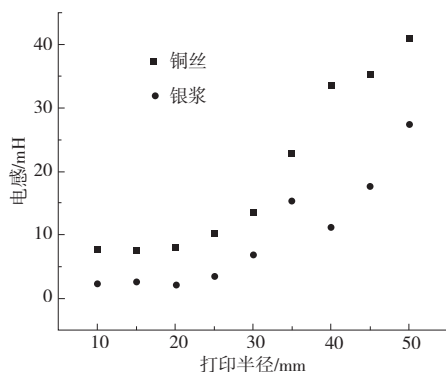


图6 不同打印半径下的电感值

3 应用展示

为了验证通过混合直书写打印技术制备的平面电子电路是否能够实现特定功能,我们将该电

路的输入端连接至函数信号发生器,输出端接入数字示波器。信号发生器会输出电压信号到电路中,通过接入数字示波器来检验该平面电路是否成功实现了所设计的电路功能。

在模拟电路领域中,由电容和电感组成的LC滤波器,用于选择特定的频率范围并过滤掉杂波和干扰。低通滤波器可以允许低于特定截止频率的信号通过,而高通滤波器则可以让高于特定截止频率的信号通过。具体的等效电路示意图如图7所示。在所示等效电路中,信号发生器产生方波信号,经过滤波电路后被转换为正弦波。示波器显示的波形的变化证明了使用该打印技术制造的平面电路符合LC滤波电路的要求。

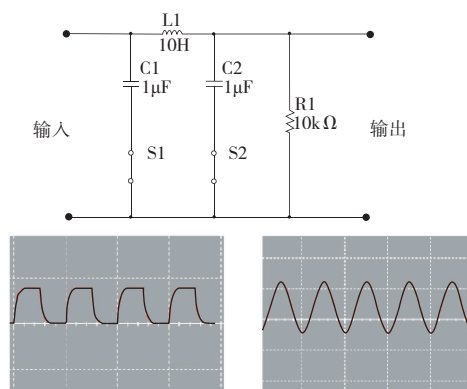


图7 LC滤波电路以及输入与输出波形

在特定频率条件下,电容器与电感器可实现能量交换并实现谐振。具体的等效电路如图8所示。这种RLC串联谐振电路可导致输入信号的幅度和相位发生变化。通过在同一示波器下记录输入与输出波形,揭示了这两种正弦波之间的相位和幅度差异,从而验证了混合直书写打印技术用于制备平面电路可以满足一定电路的需求。

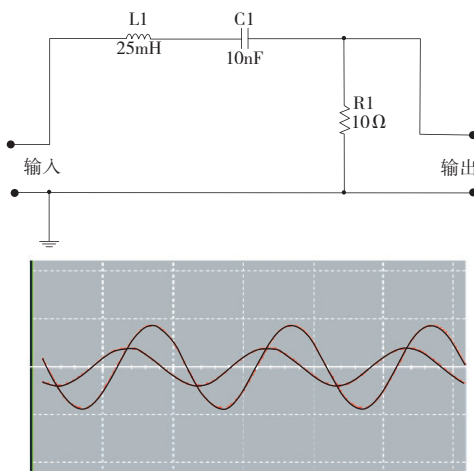


图8 RLC谐振电路的输入与输出波形

4 结语

本研究展示了采用直接墨水打印技术和直书写丝线打印技术,在平面上打印出由电阻器、电感器和电容器等基本电子元件组成的功能电路。实验结果显示:制造的电子元件具有良好的稳定性和潜在的适用性,尤其在特定功能电路中的使用其效果显著。本研究的创新点在于采用直书写打印技术节约材料,并引入直书写丝线技术可进一步提高了平面电路的功能稳定性和材料利用效率。因此,采用混合直书写打印技术直接在平面上打印功能电路是一种具有参考价值的方法。

参考文献:

- [1] 郭文霞,吴永军,刘海亮. FDM 工艺精度影响因素的实验分析[J]. 机械制造与自动化,2023,52(5):100-103.
- [2] 黄笔武,谢王付,杨志宏. 一种 3D 打印立体光刻快速成型光敏树脂的制备及性能研究[J]. 功能材料,2014,45(24):24100-24104.
- [3] 董琪婧,陈晓东,郑 骧,等. 基于丝网印刷柔性电路的制备及研究[J]. 丝网印刷,2023(6):6-12.
- [4] GUO Z Y, YU P S, LIU Y, et al. High - precision resistance strain sensors of multilayer composite structure via direct ink writing: optimized layer flatness and

interfacial strength [J]. Composites Science and Technology,2021,201:108530.

- [5] GUO Z Y, XU J W, CHEN Y Q, et al. High - sensitive and stretchable resistive strain gauges: parametric design and DIW fabrication [J]. Composite Structures, 2019, 223:110955.
- [6] GUO Z Y, YU P S, LIU Y, et al. Pre-fatigue enhancing both long-term stability and sensitivity of direct-ink-writing printed sensors [J]. International Journal of Fatigue, 2023, 166:107237.
- [7] YANG G S, WU H, LI Y J, et al. Direct ink writing of fluoropolymer/CNT - based superhydrophobic and corrosion - resistant electrodes for droplet energy harvesters and self-powered electronic skins [J]. Nano Energy, 2021, 86:106095.
- [8] GUO Z Y, YU P S, LI B, et al. Direct wire writing technique benefitting the flexible electronics [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2024, 19:e2286514.
- [9] GAO Y X, LI H Y, LIU J. Directly writing resistor, inductor and capacitor to composite functional circuits: a super-simple way for alternative electronics [J]. PLoS One, 2013, 8(8):e69761.

收稿日期:2024-03-04

(上接第 194 页)

工过程中抗干扰和自适应效果较差的问题,提出了一种视觉伺服控制方法。利用 BP 神经网络自适应调整 PID 参数,并采用双目视觉设备获取机器人末端位姿信息作为反馈,实现机器人轨迹精度的实时补偿。通过仿真从静态和动态响应分别验证了控制器的收敛性,并进一步通过铣削实验证明了该控制方法在实际加工过程中的有效性。实验结果表明:最大直线轨迹位置误差降低约 83%,最大圆度误差、最大拟合圆半径误差降低约 73%和 75%。

参考文献:

- [1] CORAPSIZ M F, ERENTURK K. Trajectory tracking control and contouring performance of three-dimensional CNC [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4):2212-2220.
- [2] KODITSCHKEK D. Natural motion for robot arms [C]//The 23rd IEEE Conference on Decision and Control. Las Vegas, Nevada, USA: IEEE, 1984:733-735.
- [3] WEN J T. A unified perspective on robot control: the energy Lyapunov function approach [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 1990, 4(6):487-500.
- [4] CHAUDHARY H, PARASHAR A, PRASAD R, et al.

Velocity observer based fuzzy PD+I based hybrid force/position control of an industrial robot [C]//2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS). Chandigarh, India: IEEE, 2014:1-6.

- [5] 杨真真,李明富,张黎明,等. 基于模型预测控制的工业机器人曲面跟踪方法研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(19):24-33.
- [6] 秦霞,李德钊,邓华. 基于模糊 PD 型输入迭代的工业机器人轨迹跟踪控制[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(4):66-68, 72.
- [7] WANG M, ZHANG Y W, YE H P. Dynamic learning from adaptive neural control of uncertain robots with guaranteed full-state tracking precision [J]. Complexity, 2017, 2017:5860649.
- [8] 卢兴国. 工业机器人模糊神经网络控制及最优运动规划方法研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
- [9] WANG Y, LANG H X, DE SILVA CLARENCE W. An autonomous mobile grasping system using visual servoing and nonlinear model predictive control [C]//IEEE ICCA 2010. Xiamen, China: IEEE, 2010:86-91.

收稿日期:2024-03-04