arXiv:2611.28772v1 [cs.ET] 21 Nov 2026

MM-Open5x：通过多材料多轴增材制造实现实用型共形电子器件

Iv´an Rev engaRiesco[1], Freddie Hong[2], Borut Lampret[1], Connor Myant[1],和 David Boyl e[1]

伦敦帝国理工学院[1],伦敦金斯顿大学[2]

摘要——多轴多材料增材制造能够生产难以通过平面工艺实现的共形电子系统，并有望提升其性能；然而，其普及性和可复现性仍面临挑战。本文介绍 MM-Open5x，这是一套开放、低成本的多材料多轴增材制造工作流程，旨在实现实用型共形电子器件。该工作流程涵盖设计、仿真、刀具路径生成、制造、测试和组装，并同时发布完整的设计文件、刀具路径及代表性 G代码。代表性案例研究展示了多轴沉积在实际应用中的优势与局限，并明确记录了常见失效模式、校准敏感性、组装瓶颈和材料变异性。MM-Open5x 并非旨在规定最优方案，而是作为一个透明、可复现的基础，供更广泛的社群在此基础上迭代、拓展，并将共形电子器件工作流程应用于各种领域。

索引词—多轴增材制造、多材料增材制造、Open5x、共形电子器件、可复现增材制造

I. 引言

多轴、多材料增材制造（AM）已展现出巨大潜力，能够实现采用传统平面制造技术难以实现、在某些情况下甚至无法实现的共形电子系统。以往研究展示了利用增材制造实现的多种无源和有源器件，涵盖从可调谐波导结构到用于可穿戴应用的柔性压力传感器等 [1, 2]。迄今为止，商业化应用主要由面向特定用途的射频（RF）和微波组件推动，例如 [3]。尽管取得了这些进展，增材制造电子产品的广泛应用仍受限于可及性、成本效益、可复现性以及端到端实用性等方面的挑战。

传统电子行业本质上是平面的，因此 Additive Manufacturing 不太可能在可扩展性、成本效益或制造成熟度方面与这一成熟生态系统直接竞争。相反，AM 的价值在于利用三维制造，实现几何形状复杂、高度集成且平面制造难以实现的电子功能结构。近年来，Open5x [4] 等低成本开源生态系统显著降低了入门门槛。然而，尽管相关研究日益增多，实践中仍缺少一种易于获取且可复现的端到端工作流程，能够将共形电子系统的设计、制造与评估整合起来。

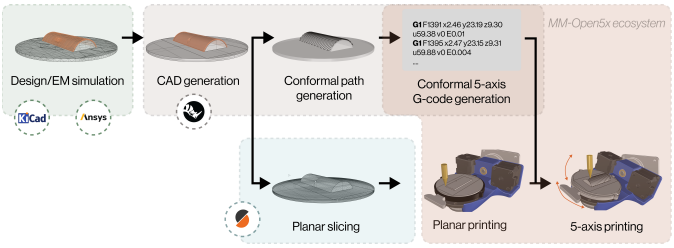

图 1. MM-Open5x：共形电子器件从设计到制造。

针对这些挑战，本文介绍了**MM-Open5x**，这是一种基于多材料、多轴 Additive Manufacturing 制造共形电子器件的开放式低成本工作流程。本研究的主要贡献如下：i）将设计、仿真、刀具路径生成、制造、测试和组装整合为透明、可复现的端到端工作流程；ii）公开完整的设计工件、仿真模型、刀具路径及具有代表性的 G代码，供其他研究人员复现和扩展；[1] iii）明确说明实际限制、观察到的失效模式及缓解方法，包括校准敏感性、元件组装瓶颈和材料变异性，并阐述这些因素对可复现性的影响，同时将其列为该领域尚待解决的挑战。

II. 相关工作

Open5x 起源于一个开源项目，旨在让更多人能够使用材料挤出（MEX）平台进行五轴增材制造 [4]。该项目包括对传统 3D 打印机进行轻量级硬件改造，以及一个基于 Rhino Grasshopper 的五轴 G代码生成器，可生成垂直于目标表面的刀具路径，从而实现受控的共形沉积。早期研究表明，与平面沉积相比，沿表面沉积导电丝材具有明显优势 [5], ，能够减轻传统 MEX 中由层间界面导致的各向异性导电性影响，该影响存在于直流和射频频率下 [6]。此后，Open5x 推动了多轴增材制造和共形电子器件领域越来越多的学术研究 [7, 8, 9]。

然而，较高的学习门槛以及缺乏易于获取的

[1]https://github.com/BigKoala33/MM-Open5x

可复现的工作流程来生产多材料共形电路，仍然是其广泛应用的一大障碍。

III. MM-OPEN5X 制造工作流

本节介绍利用 Open5x 制造共形电子器件的工作流程，同时考虑硬件和软件方面（图 1）。该工作流程旨在支持小批量研究或临时制作共形电子结构，而非高通量或生产级制造。

A. 机器设置

本节详细介绍我们在先前工作中使用的基于 Open5x 的多材料硬件平台 [5, 6, 10]。在原始设计的基础上，我们进行了若干额外修改，以改进共形电子器件的制造。

1) 换刀器： 该换刀器配置有两个工具头，均基于 Bowden 驱动的 E3D Hemera 挤出机。第一个挤出机配备 0.4 mm 喷嘴，用于挤出基底材料；第二个挤出机配备 0.25 mm 喷嘴，装载 Electrifi。冷却仅限于挤出机（预热断热区），打印部件不采用主动冷却。虽然这限制了最大打印速度，但喷嘴附近没有冷却硬件，从而能够在高度凸曲面上进行打印，并降低碰撞风险。该系统不包含喷嘴刮片或专用校准探针。

*2) MM-Open5x*龙门架：龙门架改动极少，主要包括扩大打印区域，以及集成一个源自 Voron 0 Open5x实现的校准元件。系统采用完整五轴校准流程（详细信息和G代码见代码仓库），从而能够识别 V轴的真实旋转轴（即用于旋转打印床的轴）。该校准过程未考虑制造或组装过程中引入的 U–V轴失准或轴向倾斜，而这些因素可能会影响大角度旋转时的打印精度。如何准确表征这些影响仍是一项重大挑战。

3) 镍铬丝加热喷嘴延长器： 在高度凸几何体内部进行打印，需要使用细长的喷嘴，以最大限度地增加间隙并避免碰撞。标准喷嘴通常较短，以保持与加热块之间的热耦合。尽管市面上可以买到加长喷嘴（例如来自 nonplanar.xyz），但可选直径范围有限。因此，我们设计了一种定制喷嘴延长器，使其连接在加热块与标准喷嘴之间，从而能够使用市面上广泛供应的更小直径喷嘴。然而，增加热源与喷嘴尖端之间的距离会引入显著的热梯度，导致挤出点处耗材熔融不足，并引发堵塞和耗材打滑等问题。为缓解这一问题，我们采用了基于镍铬丝的加热系统。镍铬丝缠绕在延长器周围，并使用 Kapton胶带进行绝缘（图2）。在镍铬丝绕组内部嵌入一个热敏电阻，使其与延长器直接接触，从而实现局部温度控制。该配置可确保喷嘴尖端获得充足的温度

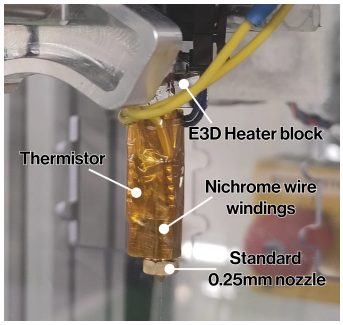

图2. 带镍铬合金加热元件的喷嘴延长器和标准喷嘴。

，以便使用0.25 mm喷嘴可靠地沉积共形材料，包括具有挑战性的 Electrifi 耗材。

B. 制造数据生成

制造过程始于一个完整定义的多材料3D模型，这是传统多材料挤出工作流程所要求的。应根据目标材料将模型分割为不同的实体。在共形电子器件的语境下，这些实体大致可分为基底几何和走线（电路）几何。基底几何通常由介电材料构成，同时承担结构和电磁功能，支撑电路并影响场分布。相比之下，走线几何具有导电性，可形成具备功能的电气通路，并与其他电路元件和组件连接。在直流应用中，导电线路主导着性能；而在更高频率下，基板设计的重要性日益突出。随后必须确定制造策略，包括平面操作与共形操作，以及二者的执行顺序。此外，还必须仔细考虑打印方向和打印床布置。这些因素在多轴打印中尤为关键，因为不当选择可能导致材料用量低效、表面质量下降，或造成工具头、已打印部件与龙门架之间的碰撞。

1) 刀具路径生成：用于共形沉积的几何形状需要经过显式刀具路径生成这一中间步骤。Open5x G代码生成器同时需要目标表面和刀具路径。然而，生成该刀具路径仍主要依赖手动操作。这反映了开发通用多轴切片器的核心难点。额外的自由度使刀具路径规划转变为一个欠约束优化问题。也存在其他方法。例如，S3 Slicer [11] 展示了自动多轴切片能力。然而，其表面质量方面的局限以及缺乏多材料支持，使其目前尚不适用。同样，Fractal Cortex[2]等工具或许能提供部分解决方案，但软件的高度集成以及缺乏原生多材料工作流程，也带来了一些实际挑战。这些挑战包括依赖虚设几何体等变通策略，以及对

[2]https://github.com/fractalrobotics/Fractal-Cortex

导电线路等精细特征的控制能力下降。在小型共形电子器件的场景中，特征尺寸通常与喷嘴直径（0.1–0.4 mm）处于同一量级，因此，可靠且完全自动化的刀具路径生成需要专门的解决方案。MM-Open5x通过利用Rhino和Grasshopper的灵活性应对了这一挑战。这使用户能够在生成G代码的同时，直接生成和修改刀具路径。虽然这种方法在一定程度上牺牲了集成性和易用性，但它提供了高度的控制能力，这对于研究和原型制作至关重要。与本文相关的代码仓库包含Grasshopper脚本（例如图3），用于为第IV节所介绍的案例研究以参数化方式生成刀具路径。

*2）G*代码生成：最后阶段是生成制造数据（G代码）。平面几何体可以使用传统的MEX切片器进行处理。然而，在与Open5x工作流程集成时，必须确保各工具之间具有一致的空间基准。尤其需要注意的是，平面几何体必须被定位在与用于生成共形G代码的Rhino环境中对应对象完全相同的X–Y位置。这是因为，PrusaSlicer等典型切片器会基于包围盒居中重新定义对象坐标，而Open5x生成器则依赖Rhino工作区的全局坐标系进行运动学变换。即使是很小的错位（约为半个层高），也可能显著降低多轴操作的打印质量。

生成平面G代码后，在Open5x生成器中使用共形刀具路径和目标表面来生成相应的多轴G代码。通常会将其导出为单独的文件，随后再与平面G代码手动合并。必须谨慎配置这些代码段之间的过渡。尤其是，共形部分的起始G代码必须将刀具安全地定位在部件上方，并在不发生碰撞的情况下接近第一个刀具路径点。必须正确定义换刀命令；对于Electrifi等导电材料，可能还需要启用冷挤出设置。

C. 过程内行为与后处理

硬件具有实验性且成本低廉，因此会产生一些实际的过程内行为，在应用 MM-Open5x工作流程时必须将其纳入考量。我们发现，与加长喷嘴延长器相关的机械公差尤其敏感。螺纹精度不足会导致熔融耗材从加热块接口处泄漏，改变挤出行为，并因非预期的材料沉积而降低表面质量。临时补救措施（如聚四氟乙烯胶带）虽可减少泄漏，但通过提高延长器的制造公差，可实现更可靠的运行。

床面附着力是多轴打印中的另一个关键因素。MM-Open5x平台不采用加热平台或同材料附着表面，其构建平台由高温树脂制成，可为许多几何形状提供足够的固有附着力。对于接触面积较小的零件

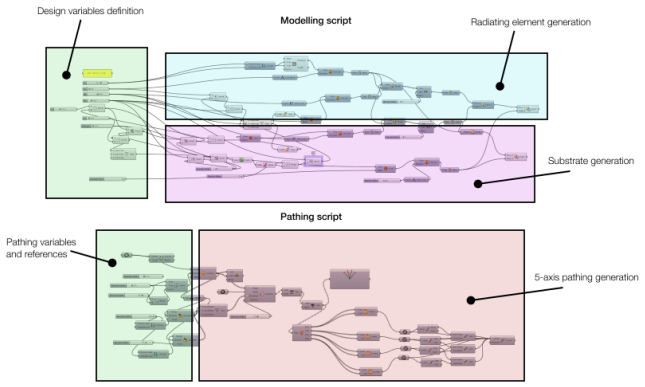

图 3. Grasshopper 脚本示例，包含参数化三维模型定义和共形路径规划。

，或在旋转过程中承受显著横向力的零件，则需要额外的附着力，通常使用基于PVA的胶粘剂。在共形打印中，即使不存在碰撞，喷嘴诱导力也可能足以使粘附不足的零件脱落。

执行针对未经测试的几何形状生成的多轴G代码时，采用保守的运动参数至关重要。初步试验以较低速度（如 2 mm/s ）进行，且不进行挤出。打印前需识别并评估潜在风险区域，这些区域通常对应较大的旋转偏移。谨慎验证仍是确保可靠运行的重要环节，打印过程中也应预期需要进行一些人工干预。

后处理和下游组装被有意视为特定于应用的环节，未纳入 MM-Open5x 工作流程的标准化范围。此前的研究已探索 Electrifi 导电线路的电镀和导电组件的键合 [5, 10], ，详细流程见其他文献 [12]。一般而言，键合和封装策略很大程度上取决于目标应用的要求和材料组合，因此不属于当前工作流程自动化的范畴。

IV. 案例研究示例

本节介绍三个可在代码仓库中找到的开源案例研究。这些案例研究涵盖射频、宽带和低频混合信号电子学，展示了 MM-Open5x 在不同工作条件下的适用性和局限性。

A. 共形贴片天线

一种共形 S 波段天线（右侧图4），最初发表于 [13]。与原始研究不同，辐射单元以共形方式打印在基板上。与平面打印相比，这种打印方向与 HFSS 仿真的结果更为吻合 [6]。配套代码仓库包含 Ansys HFSS 仿真文件，其中包括天线在 HFSS 中的参数化定义

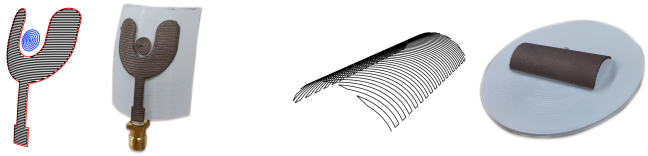

图4。超宽带天线的共形路径与制作的共形超宽带天线（左）；S波段天线的共形路径与制作的共形S波段天线（右） [6]。

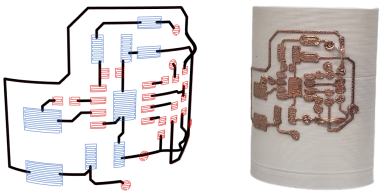

图5。DC-DC开关稳压器的共形路径（左），制作并电镀的共形DC-DC开关稳压器（右） [10]。

，以及天线在 Grasshopper 中的参数化定义。此外，还提供自定义的 Grasshopper路径脚本、3D 模型和最新的 G代码。

B. 双曲率超宽带天线

一种双曲率共形超宽带天线（图4，左），灵感来自 [14]。在原始工作中，该天线被投影到单曲率表面上。测量和测试表明，印刷样品具有良好的性能，但与仿真结果相比存在较大差异和较高变异性 [6]。仿真、设计和制造工件参见第IV-A节。

C. 共形*DC-DC*开关稳压器

一种共形DC-DC稳压器（图5），发表于 [10]。该案例研究展示了如何在低成本平台上实现高密度共形表面贴装器件布线，包括桥接结构和缩小的走线间距。代码仓库包含KiCad原理图和PCB文件、物料清单、基底三维模型，以及用于走线、焊盘和桥接结构的G代码。

V. 未来方向与机遇

尽管近期取得了进展，但系统层面仍存在若干挑战，也为社区发展创造了机遇。

元件组装仍是共形电子器件面临的主要瓶颈；现有贴片系统假设使用平面基底，因此并不适用于曲面或多方向几何结构，这促使人们探索适配共形结构的贴装、工装夹具和视觉系统新方法。

低温键合方法使组件能够集成到聚合物基底上，但也会在可靠性、可返修性和稳定性方面带来取舍。开发可修复且可逆的键合技术，将显著有益于原型制作、可持续性，以及在长期运行或资源受限系统中的部署。

虽然核心制造工作流程具有广泛适用性，但不同应用领域的设计约束可能存在显著差异，例如可穿戴设备、物联网、机器人技术或空间系统。这表明，需要制定特定应用设计规则、验证策略和可靠性指标，同时可借助共享的制造基础。

可持续性与再利用也带来了新的机遇。材料、粘接和组装方面的选择会显著影响可维修性、元件回收和废弃物产生，尤其是在小批量、偏远和/或资源受限制造环境中。

最后，开放工件和共享基准对于可复现性至关重要。除了发布仿真和设计文件、刀具路径及 G代码外，由社区开发、旨在有意考验已知失效模式的基准结构也很有价值。实际上，即使参数不变，名义上相同的批次之间的**材料变异性**也会显著影响可打印性和力学行为，其影响往往占据主导地位。轻量级验收测试以及对材料行为的共享报告，是缓解这些影响并提升利益相关方之间可复现性的切实可行途径。

参考文献

[1] Sang-Hee Shin 等。“基于聚合物的3D打印Ku波段可转向相控阵天线子系统”。载于：*IEEE Access* 7（2019）。会议名称：IEEE Access，第106662–106673页。ISSN：2169-3536。[2] Hyeok Bin Lee 等。“具有整体式3D打印拱形结构介电层的柔性电容式压力传感器”。载于：*Additive Manufacturing* 117（2026年2月5日），第105080页。ISSN：2214-8604。[3] *SWISSto12* — 为下一代卫星通信提供动力。2024年6月11日。URL：https://swissto12.com/。[4] Freddie Hong 等。“Open5x：易于使用的五轴3D打印与共形切片”。载于：*2022*年*CHI*计算机系统中的人为因素会议扩展摘要。CHI EA ’22。ACM，2022年4月28日，第1–6页。ISBN：978-1-4503-9156-6。[5] Freddie Hong 等。“曲面电路走线的五轴多材料3D打印”。载于：*Additive Manufacturing* 70（2023年5月25日），第103546页。ISSN：2214-8604。DOI：10.1016/j.addma.2023.103546。[6] Iv´an Revenga Riesco 等。“共形天线的五轴多材料桌面增材制造”。载于：*2025*年*IEEE*增材制造电子系统会议。2025年4月，第1–3页。[7] Peishi Yu 等。用于在不可展曲面上进行共形传感器阵列打印的低成本快速构建材料挤出式*3D*打印平台。纽约州罗切斯特，2024年1月5日。[8] Pietro Terranova 等。“一种具有前所未有设计自由度的多功能五轴熔融电写平台，用于制造3D纤维支架”。载于：*Additive Manufacturing* 93（2024年8月5日）。ISSN：2214-8604。[9] Daniel Ahlers 等。“用于印刷电子的五轴3D打印机的校准与补偿”。载于：*Additive Manufacturing Letters* 12（2025年2月1日），第100265页。ISSN：2772-3690。[10] Ivan Revenga Riesco 等。“多轴多材料增材制造多层共形表面贴装器件电路，以支持在轨任务韧性”。载于：*OASIcs*，第*130*卷，*2025*年 130 2025 19 1 19 17 2190 6807*SpaceCHI*（），：–：。ISSN：-。[11] Tianyu Zhang 等。“S3-Slicer：多轴3D打印的通用切片框架”。载于：*ACM Trans. Graph.* 。（2022年11月30日），第41卷第6期，第277:1–277:15页。ISSN：0730-0301。[12] Myung Jun Kim 等。“在导电3D打印物体上一步电沉积铜”。载于：*Additive Manufacturing* 27（2019年5月），第318–326页。[13] Giacomo Muntoni 等。“用于带宽增强和尺寸缩减的曲面3D打印微带贴片天线布局”。载于：*IEEE*天线与无线传播快报19.7（2020年7月），第1118–1122页。ISSN：1548-5757。[14] Luz I. Balderas 等。“用于无人机应用的低剖面共形超宽带天线”。载于：*IEEE Access* 7（2019），第127486–127494页。