

普通高等教育“十三五”规划教材

印刷制造 原理与技术

辛智青 胡 堃 主编



Yinshua

Zhizao

Yuanli Yu Jishu



文化发展出版社
Cultural Development Press

印刷制造原理与技术

辛智青 胡莖 主编



文化发展出版社
Cultural Development Press

图书在版编目 (CIP) 数据

印刷制造原理与技术/辛智青, 胡堃主编. —北京: 文化发展出版社, 2019.6

ISBN 978-7-5142-2649-2

I. ①印… II. ①辛… ②胡… III. ①印刷—工艺学 IV. ①TS801.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第102938号

印刷制造原理与技术

主 编: 辛智青 胡 堃

责任编辑: 李 毅

执行编辑: 杨 琪

责任印制: 邓辉明

责任校对: 岳智勇

责任设计: 侯 铮

出版发行: 文化发展出版社(北京市翠微路2号 邮编: 100036)

网 址: www.wenhuafazhan.com www.printhome.com www.keyin.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京建宏印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

字 数: 200千字

印 张: 11.5

印 次: 2019年7月第1版 2019年7月第1次印刷

定 价: 49.00元

I S B N : 978-7-5142-2649-2

◆ 如发现任何质量问题请与我社发行部联系。发行部电话: 010-88275710

印刷是一个不断发展变化、生命力强盛的领域，在一千多年的发展进程中为人类社会文明和经济的发展做出了重要贡献。印刷的本质（内涵）是将微小功能单元在空间（大面积基材上）精确摆放的一个过程。当这些微小功能单元在空间的精确摆放，按照人的视觉特征进行设计和排列组合时，就构成了我们今天熟悉的印刷传媒的基础；当这些微小功能单元在空间的精确摆放，按照某种结构根据空间图形化的需求进行设计和排列组合时，就构成了今天我们并不太熟悉的印刷制造的基础。这就是印刷外延的两个基本分支，延展出印刷传媒、装饰印刷、功能印刷和印刷制造等不同的业态和更多甚至难以穷尽的细分领域。

在 Drupa 2016 年的展会上，功能印刷、印刷电子甚至 3D 打印等作为印刷业的未来呈现在世人的面前，成为其主题“触摸未来”的核心内容。在全球印刷和影像学术界享有极高盛誉和影响力、由美国图像科学技术学会主办的数字印刷技术国际会议，从 2016 年开始将关注了 30 多年的数字印刷转变到了用于制造的印刷，从另一个侧面揭示了印刷的制造属性以及其具有的前沿性和未来发展空间。

对印刷内涵和外延的这种认识揭示了印刷更丰富的含义、发展空间和生命力。从这个意义上讲，印刷并不是夕阳产业，而是面临更多发展机遇和空间的朝阳产业，蕴藏着我们印刷人还未涉足和开拓的市场和商业机会。当然，这也给印刷教育提出了新的命题和挑战。如何让印刷工程专业的学生全面、正确地了解并认识印刷，掌握其学科专业的内涵和外延，知晓其前沿和未来疆域，是从事印刷专业教育的我们应该认真思考、不断努力和大有作为的方向。

《印刷制造原理与技术》一书是在此背景下面向印刷工程专业开设的核心课程，侧重于印刷传媒领域以外的产品印刷制造，全面、系统地介绍了印刷在电子、3D 打印、

纺织品、建材等领域的应用。第一章简要介绍了印刷制造的概述和应用领域。第二章详细介绍了电子器件印刷制造涉及的基础理论、材料、传统印刷技术和新型印刷技术、封装技术，并以射频识别标签和透明电极为例，详细介绍了其制造方法和涉及材料。第三章详细介绍了3D打印涉及的五类技术的原理和工艺过程，并展望了3D打印在印刷中的应用。第四章介绍了纺织品印花的类型，并对每种技术涉及的材料及工艺进行了详细介绍。第五章详细介绍了陶瓷、玻璃、壁纸等涉及的印刷制造工艺及技术。编写内容力争全面、简洁，具有前瞻性，使读者能够了解和掌握最新、最全面的印刷制造技术及各类产品。

本书在编写过程中，得到了北京印刷学院魏先福、杨永刚、张改梅和中国科学院化学研究所宋延林的大力支持，北京印刷学院辛智青、胡堃统筹全书编写。参编人员有北京印刷学院李路海、李亚玲、莫黎昕、方一、李修等老师，北京迈思成公司冯海波工程师、北京华联印刷有限公司王旭东工程师、中科院化学所张兴业副研究员、暨南大学李风煜教授、厦门弘信电子科技有限公司何耀忠工程师等也参与了本书的编写工作，并提供了大量材料。北京印刷学院研究生闫美佳、郭振新、焦守政、祝飞扬、胡苗苗参与了内容的校对，在此一并表示感谢。同时，编写过程中参考了同行的大量文献和科研成果，标注不全、不当之处，敬请见谅。

本书根据本科《印刷制造原理与技术》课程的教学大纲要求编写，可供印刷工程专业本科生作为教材使用，也适合于从事印刷包装研究与实践的科研人员阅读以及印刷包装企业单位的科技人员作参考。由于专业技术水平有限，时间紧迫，难免存在不足之处，敬请广大读者批评指正，期待今后共同修改完善。

编者

2019年7月

第一章 引言

第一节 印刷制造概述 / 001

第二节 印刷制造的应用领域 / 003

- 一、传媒领域 / 003
- 二、电子器件领域 / 003
- 三、增材制造领域 / 003
- 四、纺织品领域 / 003
- 五、建材领域 / 004

第二章 电子器件印刷制造原理与技术

第一节 电子器件印刷制造概述 / 005

第二节 印刷电子 / 006

- 一、印刷电子的概念及内容 / 006
- 二、印刷电子与传统印刷的区别 / 008
- 三、电子器件印刷制造的基本理论 / 010

第三节 印刷电子材料 / 017

- 一、印刷电子基材及其表面处理技术 / 017
- 二、印刷电子油墨 / 019

第四节 电子器件印刷制造技术 / 029

- 一、传统印刷技术及其在电子器件制造中的应用 / 031
- 二、新型印刷技术及其在电子器件制造中的应用 / 055
- 三、印后烧结原理及技术 / 069

第五节 射频识别标签的制造技术 / 080

- 一、射频识别系统组成及工作原理 / 081
- 二、电子标签的类型 / 082
- 三、射频识别标签的工作原理 / 084
- 四、射频识别标签天线制作方法 / 085
- 五、芯片贴合封装技术 / 090
- 六、近场通信技术 / 093
- 七、射频识别标签的应用 / 094

第六节 透明电极制造技术 / 094

- 一、金属网格状透明电极制造技术 / 095
- 二、金属纳米线透明电极制造技术 / 097
- 三、二维材料透明电极制造技术 / 098
- 四、复合材料透明电极制造技术 / 100

第七节 封装技术 / 102

- 一、封装目的 / 102
- 二、封装原理及检测 / 103
- 三、封装技术 / 103

第三章 3D 打印技术原理与技术

第一节 3D 打印概述 / 106

第二节 3D 打印技术特征及常见工艺 / 107

- 一、光固化立体成型 (SLA) / 107
- 二、选择性激光烧结工艺 (SLS) / 108
- 三、熔融沉积成型工艺 (FDM) / 110
- 四、三维打印成型工艺 (3DP) / 111

五、分层实体制造工艺 (LOM) / 112

六、生物印刷技术 / 114

第三节 3D 打印技术的应用及发展 / 114

一、3D 打印技术在生物医疗领域中的应用 / 115

二、3D 打印技术在组织工程中的应用 / 117

三、3D 打印技术在其他领域中的应用 / 118

四、3D 打印技术的发展前景 / 118

第四章 纺织品印刷制造技术

第一节 纺织品介绍 / 120

一、纤维的分类 / 120

二、纤维的特性 / 121

三、织物的分类 / 125

第二节 印花概念及类型 / 128

一、按工艺分类 / 128

二、按设备分类 / 130

第三节 染料印花 / 133

一、染料印花色浆的组成 / 133

二、染料印花工艺 / 136

第四节 涂料印花 / 136

一、涂料印花浆的组成 / 137

二、涂料印花工艺 / 138

第五节 转移印花 / 139

一、物理转移印花 / 140

二、化学转移印花 / 143

第六节 数码印花 / 148

一、数码印花的优势 / 148

二、数码印花目前存在的问题 / 149

三、数码印花的工艺控制 / 149

四、喷墨印花墨水 / 154

第七节 特种印花 / 155

第五章 建材印刷制造原理与技术

第一节 陶瓷印刷制造技术 / 157

一、基础材料 / 157

二、陶瓷印刷 / 159

第二节 玻璃印刷制造技术 / 163

一、玻璃的组成和特性 / 164

二、玻璃印刷油墨的组成 / 164

三、玻璃印刷工艺 / 166

四、玻璃烧制 / 167

五、玻璃制品的特殊装饰 / 168

六、玻璃瓶罐的涂层处理 / 169

第三节 壁纸印刷制造技术 / 174

一、壁纸的种类 / 174

二、壁纸的印刷方式 / 174

第一章 引言

第一节 印刷制造概述

作为人类文明的象征之一，印刷技术最早用于文字信息的复制传播。随着社会的发展，当今印刷已不再是传统的印刷，将油墨放置在纸张上将不再是印刷业的唯一选择，将信息放置在载体上将是未来印刷业面临的主要业务。因此，印刷的定义、功能和技术在不断发生着变化，逐渐向多媒体、多功能方向转变，印刷产品的多样化趋势日益明显，并在一些新兴制造业中得到应用和发展，不断深入社会生活的各个方面，推动着社会发展进步。印刷的定义随着时代的变迁发生一定的变化，其本质是将微小功能单元在空间（大面积基材上）精确摆放的一个过程，这个过程的终结产物称为印刷品，与这个过程相关联的技术称为印刷技术。这里的“微小”指微米甚至纳米的尺度，“大面积”一般指厘米至米的尺度；“基材”是承载功能单元的支撑体，对材质并无严格的限制，既可以是纸张，也可以是塑料、金属、陶瓷、玻璃、硅片等。“功能单元”指具有某种或某些特定功能的单元，由呈色剂（油墨、色粉、染料等）构成的单元或许就是印刷的网点、显示屏的滤色片，由微电子功能材料（导体、半导体、电阻、电致发光材料等）构成的单元或许就是集成电路的器件，由阻隔、支撑或其他功能材料构成的单元可能就是某种空间精细结构的组件/要素。当这些微小功能单元在空间的精确摆放，按照人的视觉特征进行设计和排列组合时，就构成了我们今天熟悉的印刷传媒的基础；当这些微小功能单元在空间的精确摆放，按照某种结构在空间图形化的需求进行设计和排列组合时，就构成了印刷制造的基础。这就是印刷外延的

两个基本分支，延展出印刷传媒、装饰印刷、功能印刷和印刷制造等不同的业态和更多甚至难以穷尽的细分领域。

印刷制造没有专门的明确定义，结合印刷定义内涵的变化，我们认为印刷制造是在传统图文信息复制技术的基础上，将承印基材、油墨、图案化技术等进一步扩展，综合利用各种技术并结合特定处理方式制造具有一定功能的产品。根据《中国印刷产业技术发展路线图》中印刷制造产业的板块，本书中的印刷制造以印刷电子和增材制造为主要内容，并扩展到纺织、建材制造领域，突出印刷技术的“绿色化、功能化、立体化、器件化”的发展趋势。

印刷制造涉及的基材除纸张外，还有硅片、金属、织物、玻璃、塑料、橡胶、皮革、陶瓷等。这些基材与传统的纸张在表面组成、结构、性能等方面有很大区别，如玻璃、塑料基材表面光滑、无孔隙，而纸张表面粗糙、孔隙度高；金属表面能低，而纸张表面能高。另外，承印材料表面不再局限于平面物体，可扩展到曲面或不规则表面。这些在油墨、承印材料改变、最终的使用目的的差异，决定了印刷制造产品工艺过程相对复杂，如印前基材需特殊处理、印刷的产品需后处理等。

印刷制造涉及的油墨除用于呈色的传统油墨外，还可将功能材料制成功能油墨，包括导电材料、磁性材料、发光材料、显示材料等，但在制备过程中，油墨的配方会影响功能的实现，必须严格控制各个成分的比例。同时，功能油墨的物化性能、印刷适性也会与传统显色油墨有较大差异，尤其是油墨转移率方面，因此需要对相应的印刷工艺条件进行调整。功能实现已成为印刷产品增值的关键。

印刷制造可利用现有的图案化技术来完成，如传统的胶印、凹印、柔印、丝印、喷墨技术都可用于印刷制造。但由于所使用的油墨和所制造的产品精度要求与传统图文复制的有较大差异，还需要对传统印刷技术进行工艺改进，如制版工艺参数的调整；或者需将不同印刷技术的优势进行组合，如将凹印和胶印结合、丝印和胶印结合、丝印和喷墨打印结合；或者需对承印基材表面进行特殊处理。同时，还需要有针对性地开发新型的图案化技术来实现传统技术无法达到的要求，如气溶胶打印、微转移印刷、纳米压印等。

印刷制造电子产品时，需要在相关印刷设备上增加在线套准检测、电学检测、烧结后处理等设备；制造三维结构的产品时，需要对产品进行打磨处理以满足使用要求；制造陶瓷、玻璃、纺织品时，也需要采取特殊的处理工艺。

第二节 印刷制造的应用领域

印刷技术作为实现增材型图案化的高效生产技术，兼有文化属性和制造属性，结合纳米技术，在众多重要制造产业和战略新兴产业领域发挥重要作用，如传媒、电子、增材制造、纺织品和建材等。

一、传媒领域

印刷的文化属性体现在传媒领域，主要用于报纸、期刊、手册、字典、出版物印刷等传媒产品，随着以数字、信息和网络技术为基础的移动显示媒体（如平面液晶显示屏、电子纸等）的出现及在技术上的不断完善，印刷在传媒领域正面临挑战。

二、电子器件领域

在电子器件印刷制造领域，可通过印刷方式实现制作导线、电阻、电容、电感等被动型（无源）和晶体管、存储器、电池、显示器等主动型（有源）的电子器件，典型代表为柔性印刷线路板、射频识别标签、透明导电膜、显示器件、汽车除雾加热线、电热膜等。

三、增材制造领域

增材制造是采用材料逐渐累加的方法制造实体零件的技术，是一种“自下而上”的制造方法。目前的增材制造技术与印刷制造关联性强的以3D打印为代表，可采用各种三维打印方式将金属、陶瓷、水凝胶、塑料、树脂、橡胶等制备各类器件，并用于生物传感器、柔印印版、骨修复等领域。

四、纺织品领域

织物印刷加工的对象是各种纤维材料的织物，使用的原料是染料或涂料，通过化学或物理的方法使之在织物上印出彩色图案。在纺织物上形成图案的工艺过程为印花，一般印花产品要求：图案准确、轮廓清晰、色泽鲜艳、块面均匀、牢度优良。但织物表面粗糙、孔隙度大，油墨渗透性强，印花时需要控制油墨与织物之间的相互作用。

用。近年来，将传统纺织品与电子技术结合起来的电子纺织品受到广泛关注，在生物、医学、体育、军事、娱乐和航天等领域具有巨大的应用价值。

五、建材领域

建材主要包括壁纸、陶瓷、玻璃等，国内家庭装修市场中家庭个性化装修已开始流行，用户可按照自己喜欢的家居风格，在装饰画、瓷砖、家具、地板上印制自己喜欢的图像，营造个性空间。

根据印刷制造内容，本书不对传统图文信息复制作介绍，重点介绍电子器件印刷制造、增材印刷制造、纺织品印刷制造、建材印刷制造等。

思考题

1. 简述印刷制造的含义。
2. 印刷制造技术可用于制备哪些产品？试举例说明。

第二章 电子器件印刷制造原理与技术

基于图文复制的印刷技术可用于电子器件制造，两者在油墨转移、油墨印刷适性控制等基本原理方面具有相近之处。但由于电子器件所用的基底、油墨与图文复制有较大差异，且更加侧重于实现功能性、追求高精度，因此电子器件制造要比传统图文复制技术要求更高、工序更复杂，需要对传统印刷技术进行改进或开发新的技术，同时需要借助于微纳制造、光学等领域的技术满足要求。例如，将凹印和胶印的优势结合在一起的凹版胶印印刷可实现油墨从网穴里良好地转移到基版上，结合纳米压印技术可获得 $5\mu\text{m}$ 以下宽度的线条，通过激光烧结技术实现纳米材料的低温烧结。

第一节 电子器件印刷制造概述

电子元器件无处不在，无论是日常的消费电子产品还是工业用电子设备，都是由基本的电子元器件构成的。电子元器件包括电子元件和电子器件两部分。电子元件包括电阻器、电容器、电感器，本身不产生电子，它对电压、电流无控制和变换作用，所以又称无源器件；电子器件包括晶体管、电子管、集成电路，本身能产生电子，对电压、电流有控制和变换作用（放大、开关、整流、检波、振荡和调制等），所以又称有源器件。电子元器件按照产品专业类别划分，大致可以分为电容器、电阻电位器、磁性材料与器件、电感器件、电子变压器、混合集成电路、电子陶瓷及器件、压电晶体、控制继电器、电接插元件、电声器件、微电机与组件、光电线缆、印制电路板、敏感元器件及传感器共十六个细分行业。我们以微电子集成电路、印刷线路板为例，简单介绍电子器件的传统制造技术。

以半导体单晶硅为衬底材料的微电子集成电路技术，是采用专门工艺技术将组成

电路的元器件和互联线集成在芯片内部、表面的微型电路或系统，具有体积小、重量轻、引出线和焊接点少、寿命长、可靠性高、性能好等特点。但生产过程极其复杂，从单晶硅衬底材料的制备，到在硅单晶上形成晶体管与互联线所需的薄膜沉积、光刻、刻蚀、封装等工艺技术，所涉及工艺步骤多达数百道，设备投资大，并需要配备超净间。例如，大规模集成电路要经过约十次光刻才能完成各层图形的全部传递。

印刷线路板（Printed Circuit Board, PCB）是电子行业中最重要电子部件，通常把在绝缘材料上按预定设计制成印制线路、印制元件或两者组合而成的导电图形称为印制电路；而在绝缘基材上提供元器件之间电气连接的导电图形，称为印制线路；印制电路或印制线路的成品板称为印制线路板，亦称为印制板或印制电路板。在印制电路板行业，采用传统的铜箔蚀刻法制造 PCB 配线，技术过程非常复杂，如图 2-1 所示，需要经过覆铜、曝光、显影、蚀刻等过程而形成配线，且目前的技术已经达到线宽的极限，无法再提高布线密度。单面 PCB 是只在绝缘基板的一面有导电图形的印制板，制备流程包括：单面覆铜箔层压板→丝网印刷图形→化学腐蚀铜→碱、酸清洗→印刷阻焊油墨→冲切孔与外形→涂覆助焊剂→检查、包装。多层 PCB 是由交替的导电图形层及绝缘材料层层黏合而成的一块印制板，导电图形的层数在两层以上。由于层与层之间的线路需要导通，所以制备过程比单面 PCB 增加了钻孔、镀金等工艺。这种铜箔蚀刻法采用酸液腐蚀铜板产生大量废液，会造成环境污染，而且基板上 90% 以上的铜被腐蚀去除，造成材料浪费。

以上电子器件的传统制备工艺，属于减法制造工艺，步骤烦琐、设备成本高、材料浪费大，且污染环境。为此，科学家经过几十年不断的研究探索，提出以有机半导体材料代替传统的无机半导体材料，并通过加法制造工艺制备新型电子器件。例如，通过印刷方式将导电材料、半导体材料、介电材料以墨水或油墨形式逐层沉积，形成场效应晶体管的源漏电极、栅极、半导体层、介电层。

第二节 印刷电子

一、印刷电子的概念及内容

印刷电子（Printed Electronics），泛指基于具有导电、介电或半导体电学特征的各种电子油墨，采用各类印刷工艺技术，包括丝网印刷、数字喷墨印刷、柔版印刷、

凹版印刷以及纳米压印等，根据电子器件的设计，通过层层印刷的方式完成电子油墨在不同承印基材表面的图形化转移，进而实现印刷制造电子电路以及元器件产品的科学与技术。印刷电子技术充分体现了印刷技术和电子产业的紧密结合，其技术特征更适合于大面积、低成本、柔性化、轻薄化、高效率、绿色环保的电子电路及元器件的生产制造，可用于制造可弯曲、可卷曲、可折叠及可穿戴的柔性电子产品。

印刷电子一词首次采用始于 20 世纪早期，最初该技术用于制备柔性导体，以简化复杂电路内的相互连接，1950 年用于制备印刷线路板。印刷电子起步于有机电子，1997 年贝尔实验室首次采用丝印有机半导体材料聚（3-己基噻吩）[poly(3-hexylthiophene)] 的方式，做出了世界上首个印刷晶体管。1998 年加州大学洛杉矶分校研究人员通过喷墨打印方法，利用聚合物发光二极管器件制备了该校的标识。当时印刷电子器件的性能处于初级阶段，无法与硅电子竞争。印刷技术作为电子制造技术真正受到关注，得益于无机纳米材料的发展。由于纳米尺度的无机固体材料（纳米粒子、纳米线、纳米管）可以溶液或者浆料形式，用传统印刷方式制成图案，纳米材料赋予这些图案电荷传输性能、介电性能、光电性能，并作为半导体器件、光电器件、光伏器件应用。

相对于传统蚀刻的减法制造工艺技术，印刷电子是一种加法制造工艺，只在需要的地方沉积材料，然后经烧结后处理即可获得导线，如图 2-1 所示。印刷电子技术大大减少了电子产品的工艺步骤，可提高材料利用率、降低设备设施投入成本、缩短生产运行周期、消除废液排放的污染问题，符合绿色、节能、环保的要求，而且适用于“个性化定制”或“按需生产”，将对现有信息电子产品的制造技术带来革命性影响。同时，通过采用具有良好降解性的有机功能材料与基材，可以解决日益严重的电子产品垃圾带来的环境污染问题。采用印刷电子技术可用于制备有机场效应晶体管、存储器、传感器、柔性显示器件、射频识别标签、印制电路板、逻辑电路等。

但印刷电子产品确实还存在问题需要解决，包括部分产品精度比不上传统蚀刻工艺制造的产品、印刷的电子器件表面平整度达不到要求、大批量生产稳定性较差、部分材料的性能相对较低等，所以印刷电子还需要在材料和印刷手段上进一步提高和改进。

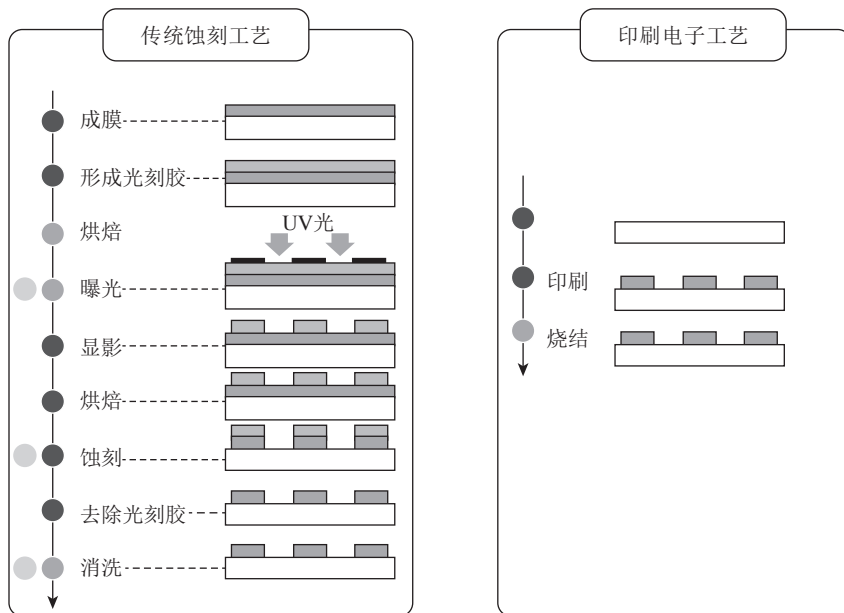


图 2-1 传统蚀刻工艺与印刷电子工艺过程对比

二、印刷电子与传统印刷的区别

虽然印刷电子与传统图文印刷都是借助于印刷技术来获取特定图案，但由于印刷电子采用独特的材料并要求可实现特定功能，因此，两者在图案内容、油墨、性能要求、精度等方面也有很大差异，对比如表 2-1 所示。例如，不同于图文印刷薄的墨层，印刷电子产品要求导电墨层较厚（ $1 \sim 5\mu\text{m}$ ），图像分辨率高，并且线条边缘清晰光滑，不能有毛刺或断点，以防导致短路、断路。在印刷多层器件如平行板电容器、晶体管时，要求导电层上的介电层尽可能薄而且均匀，以实现低操作电压，但墨层薄容易出现各类缺陷并影响其上层性能，因此印刷电子在制备这些器件方面有一定难度。此外，工艺方面两者也有较大差异：印刷电子技术要求在印刷之前对承印基底进行表面改性，以减小油墨在基底上过度铺展；由于油墨中仅含有微量的连接料，导致印刷过程中油墨转移相对困难。印刷结束后，除必要的干燥过程外，针对金属纳米粒子油墨，还进行烧结工艺方可获得较高导电性。