

基于柔性印刷电路的动态纸媒防伪学习产品探究

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2024.01.001

别一飞¹ 田宇飞¹
陈云阳¹ 李莉²
刘毅² 孙基泰¹
钱俊¹

1. 武汉大学

图像传播与印刷包装
研究中心

湖北 武汉 430079

2. 湖北京华彩印有限公司

湖北 孝感 432800

摘要: 为了提高儿童对防伪技术的认知水平,将复杂的防伪技术概念转化为易于理解和吸收的形式,探索并实现一种以纸媒为载体的柔性印刷电路与防伪知识相结合的动态纸媒交互方法。制备了成本低、导电性好、适用于纸基丝网印刷的碳系水性导电油墨,通过学习板、答题纸、知识卡的拼接交互动作,触发柔性印刷电路上的编码点位连通,实现在纸媒实物层面与儿童进行视觉、触觉、听觉的深度交互学习过程。该产品使纸媒与数媒相互融合在一起,共同表达防伪知识的内容并传递给受众,使知识点呈现更加准确、清晰、高效。这种动态纸媒交互方法不仅保留了纸质载体真实自然的教学体验,还通过实体操作充分发挥儿童手、眼、脑的协调作用。同时,以可视化拼接触发编码点位接通的形式让教育大数据有迹可循,进一步推动柔性印刷电路在纸媒创新方面展现出新的活力,更好地传承和发扬中华优秀传统文化的精髓。

关键词: 柔性印刷电路; 纸媒; 碳系水性导电油墨; 防伪知识; 多感官交互

中图分类号: TQ638; G614

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2024)01-0001-07

引文格式: 别一飞, 田宇飞, 陈云阳, 等. 基于柔性印刷电路的动态纸媒防伪学习产品探究 [J]. 包装学报, 2024, 16(1): 1-7.

1 研究背景

在信息技术不断演进和数字化浪潮持续冲击的时代,教育方式和学习方式正经历着革命性的转变。电子教材、在线学习平台和虚拟课堂等数字工具为学生提供了更多的学习资源和方式。这些工具具有互动性、多媒体性和自适应性的特点,使学习更加灵活和丰富。但电子设备屏幕产生的蓝光对儿童视力有害,且儿童因缺乏自控力容易沉迷其中,影响学习和健康发展。纸媒是人类教学领域最熟知、最常用的工具。

在当今时代,纸张仍然是知识传递的主要媒介^[1],其优势在于提供了翻页触感和手写体验,促进了儿童对知识的实际感知和亲身参与。但传统纸媒存在着交互模式单一、缺乏趣味性和互动性的问题^[2]。儿童作为被动的知识接收者,在学习过程中无法产生趣味和正向激励体验,难以主动参与和深入理解知识的内涵。将传统纸质学习材料与现代技术相结合^[3-4],已成为教育领域的重要课题和研究方向。这种结合不仅能够适应学生学习方式和需求的变化,提供更丰富、多样化的学习体验,还能够提高学习效果和满足学生的个

收稿日期: 2023-09-22

基金项目: 武汉大学研究生“课程思政”示范课程防伪技术建设项目

作者简介: 别一飞(1999-),女,山东潍坊人,武汉大学硕士生,主要研究方向为柔性印刷电子,

E-mail: 2021202170010@whu.edu.cn

通信作者: 钱俊(1971-),男,湖北孝感人,武汉大学教授,博士,主要从事柔性印刷电子和新型包装印刷材料研究,

E-mail: whuqianjun@163.com

性化学习需求。

防伪技术是现代生活中不可或缺的一部分，其在商品、证件、货币等领域的应用起到了至关重要的作用。防伪技术不仅有助于确保产品的真实性和质量，还在保障知识产权、维护国家安全以及打击假冒伪劣产品等方面发挥了关键作用^[5-7]。然而，对于儿童而言，这个领域往往是一个相对陌生的概念。为了提高儿童对防伪技术的认知，并培养他们的科技兴趣，有必要创造一种儿童友好的学习环境，将复杂的防伪技术概念转化为易于理解和吸收的形式，同时激发儿童的好奇心和求知欲。

随着柔性电子技术的不断发展，柔性印刷电路作为一种创新性的技术手段，为教育领域的创新带来了可能。碳系水性导电油墨是帮助传统印刷电子转型升级的颠覆性材料，为动态纸媒的发展提供了新的机遇。相较于传统的有机溶剂型导电油墨，碳系水性导电油墨具有可持续性和环保无毒害的优势。碳系水性导电油墨以水为溶剂，以石墨烯、碳纳米管为导电填料。油墨性能稳定^[8-10]，具有良好的导电性，印刷灵活，基材可变，可以与纸质媒体有机结合，为纸质学习材料赋予互动性和多感官反馈功能，给学习者带来全新的学习方式和体验。

因此，将中华优秀传统文化在纸媒的基础上与新技术、新理念有机结合，具有重要的现实意义和教育价值。

本研究旨在探索数字化教育与纸质媒体的结合，将柔性印刷电路技术应用于教育领域。制备了成本低、导电性好、适用于纸基丝网印刷的碳系水性导电油墨，通过丝网印刷构成 10×10 编码点位的三层覆盖矩阵式印刷电路结构，满足知识卡的拼接触发柔性印刷电路信号接通的识别与传输需求，为儿童提供视觉、触觉和听觉的直观感受和反馈。以中国古文明与防伪技术游戏为例，使儿童在学习过程中能够感受到中国传统文化的精髓，促进中华优秀传统文化的创新性发展。

2 实验

2.1 实验材料与仪器

1) 主要材料。石墨，固体含碳质量分数99.9%，河南六工石墨有限公司；炭黑，东莞市灿煜化工有限公司；碳纳米管，广州宏武材料科技有限公司；水性丙烯酸树脂，固含量 $(45 \pm 2)\%$ ，武汉

鸥易光电科技有限公司；分散剂，W-190，建德国昌化学材料有限公司；消泡剂，DC-65，武汉申试化工有限公司； γ -缩水甘油醚基丙基三甲氧基硅烷，Degussa公司；铜版纸，200 g，浙江明有纸业有限公司；3M600 胶带，3M公司；去离子水，自制。

2) 主要仪器。电子天平，FA1104N，上海菁海仪器有限公司；搅拌器，D2010W，上海梅颖浦仪器仪表制造有限公司；超纯水器，UPI-1-5T，四川优谱超纯科技有限公司；高速分散机，FS-400D，杭州大卫科教仪器有限公司；砂磨分散机，PT0.6L，湖南省欧华科技有限公司；丝网印刷机，YS-4060D，深圳市亿宝莱印刷设备有限公司；接触角测试仪，JC2000D，上海中晨数字技术设备有限公司；旋转黏度计，BDJ-55，上海平轩科学仪器有限公司。

2.2 碳系水性导电油墨的制备

碳系水性导电油墨配方如下：总碳质量分数为19.1%（石墨10.3%，炭黑5.6%，碳纳米管3.2%），水质量分数为48.1%，水性丙烯酸树脂质量分数为21.2%，消泡剂质量分数为2.0%，分散剂质量分数为6.4%， γ -缩水甘油醚基丙基三甲氧基硅烷质量分数为3.2%。碳系水性导电油墨制备流程示意图如图1所示。

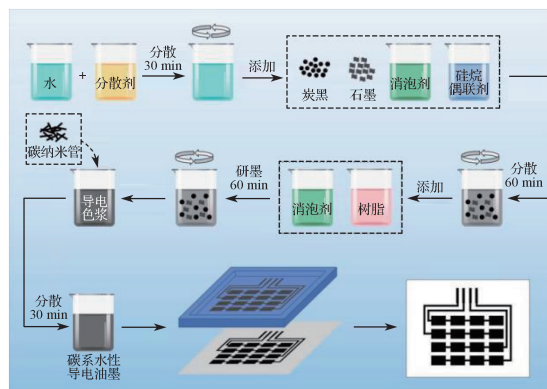


图1 碳系水性导电油墨制备流程

Fig. 1 Preparation process of carbon-based water-based conductive ink

2.3 碳系水性导电油墨性能测试

1) 用刮板在载玻片上刮涂碳系水性导电油墨，得到 $1.5 \text{ cm} \times 4.5 \text{ cm}$ 的矩形导电层，于 100°C 温度下在真空烘干箱中烧结后得到测试样品，实物图如图2a所示。

2) 用四探针在样品的长边方向上均匀取3个点进行方阻测量，并计算出算术平均值，在墨层厚度为 $25 \mu\text{m}$ 时其方阻低至 $7.3 \Omega \cdot \text{sq}^{-1}$ 。

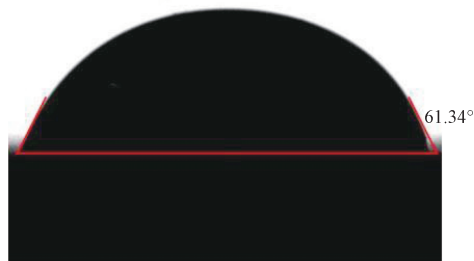
3) 将 300 g 油墨盛放在直径约为 10 cm 的烧杯中, 用旋转黏度计搭配四号转子测量油墨黏度, 此时油墨黏度为 9 800 mPa·s。

4) 图 2b 展示了碳系水性导电油墨滴落在 200 g 铜版纸上形成的接触角。此时接触角为 61.34° , 小于 90° , 说明导电油墨在该基底上的润湿性良好。

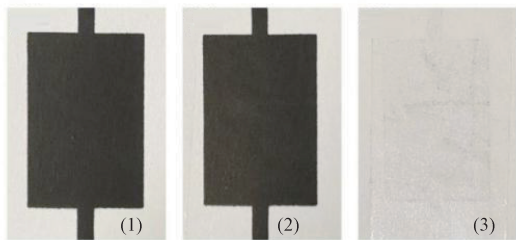
5) 油墨的附着力测试。将导电油墨丝网印刷在纸基上, 并在 110°C 条件下烘干。烘干后的样品经 3M600 胶带撕拉测试后, 观察撕扯后墨层的残余情况。测试结果如图 3c 所示, 其中图 (1)、(2) 分别为导电油墨层在撕拉测试前后的表面变化情况, 图 (3) 为被 3M600 胶带撕下的墨层。从图可以清晰地看出, 仍有 99% 以上的底层油墨附着在基底上。



a) 四探针测试方阻样品



b) 导电油墨在纸基上的接触角



c) 导电油墨在纸基上的附着力测试

图 2 碳系水性导电油墨性能测试样品及测试结果

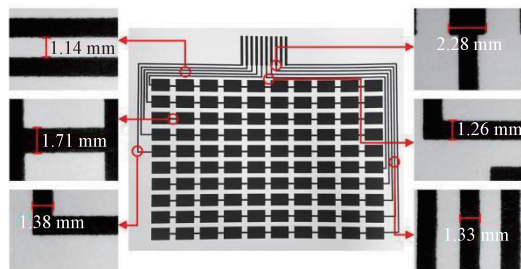
Fig. 2 Carbon based water-based conductive ink performance test samples and test results

2.4 印刷电路的制备与性能测试

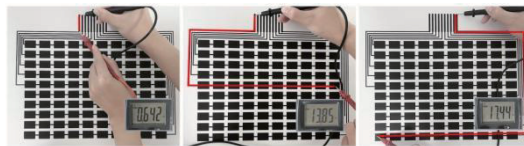
图案化印刷是导电油墨应该实现的基本功能, 也是对油墨材料印刷适性的直观呈现。在充分考虑后续

产业化生产成本以及上下游供应链完整性的基础上, 选用铜版纸作为批量生产的印刷基底。用碳系水性导电油墨在 200 g 铜版纸上丝网印刷 10×10 编码点位交互电路 (所用网版为 200 目), 考察印刷的效果 (图 3a), 并研究导电轨迹的印刷精度。从图 3a 的各个放大图中可以看出, 在纸张基底上, 碳系水性导电油墨清晰呈现不同宽度的印刷轨迹。

使用数字万用表对丝网印刷后的不同电路长度路径的电阻进行测量, 结果如图 3b 所示。由图可知, 交互电路最短、适中、最长路径的电阻分别为 0.642, 13.85, 17.44 k Ω 。测试数据表明在最远路径下电信号也能实现快速且稳定的传输, 这为后续交互电路与 PCB 主板的连接打下了坚实基础。



a) 光学图像



b) 电阻

图 3 碳系水性导电油墨在纸张上丝网印刷交互电路的光学图像和电阻

Fig. 3 Optical image and resistance of interactive circuit screen printed on paper with carbon-based water-based conductive ink

3 动态纸媒防伪学习产品设计

本研究考虑到知识与游戏相结合的趣味性^[11-13]以及儿童使用实物操作的优势, 强调通过实体带来的直观感受和反馈, 以实现儿童与防伪学习产品的双向交互, 提取拼接动作作为产品的核心交互动作。柔性印刷线路的快速接通确保了信号传输的稳定性和可靠性, 从而确保了学习和互动的效率与质量。如图 4 所示, 防伪技术教育课程分为 4 个专题: 中国古文明与防伪技术、制造大国的防伪技术、数字防伪技术、中国当代学术研究对世界防伪技术的贡献。

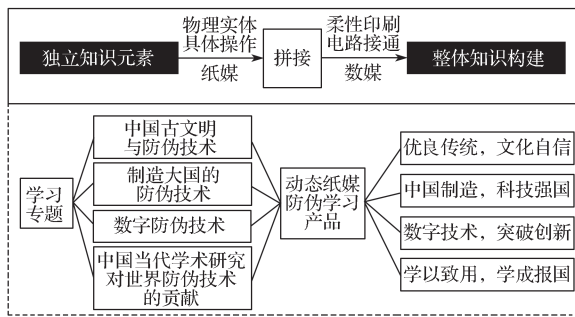


图 4 防伪技术教育模式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of anti-counterfeiting technology education mode

3.1 动态纸媒交互方法

动态纸媒产品包括学习板、答题纸和知识卡，其实物模型如图 5 所示。学习板整机尺寸为 340 mm × 260 mm × 24 mm，对外观进行圆角化处理。每张答题纸（295 mm × 215 mm）背面左侧边印有红外编码，采用 0.05 mm 的 PVC 纸印刷，设置合理间距、适当字体大小和行距、明确的标题和段落结构等。避免过多的视觉干扰和信息堆积，以便儿童能集中注意力并快速理解防伪知识。将知识元素通过模切工艺制作成 24 mm × 18 mm × 3 mm 的知识卡，这些知识卡可重复循环使用，尺寸符合儿童手部精细运动发展。在表现答题纸和知识卡的功能元素时颜色分明、层次丰富，选用经久耐磨、安全性高、可塑性强的材料。



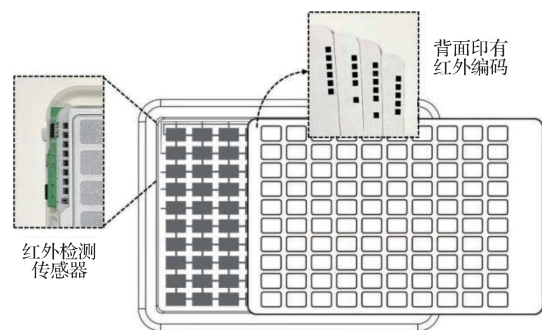
图 5 动态纸媒产品实物模型

Fig. 5 Dynamic paper media product model

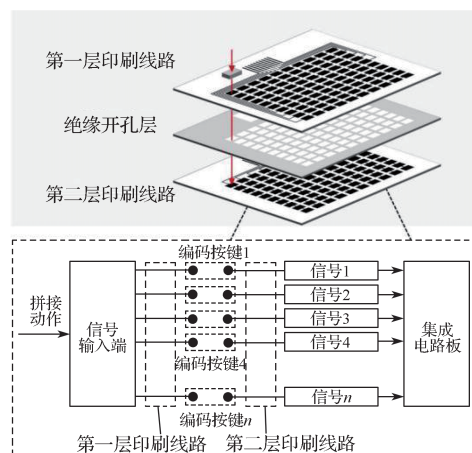
产品的技术原理是通过红外识别和柔性印刷电路，将物理环境中的印刷图案与感应板内存储的知识图谱信息对应起来，实现物理环境和数字信息之间的互动和映射。学习板是耦合了数字信息的物理实体，在系统中作为控制器，承担信息输入与输出的功能。

如图 6a 所示，儿童将游戏纸插入学习板，学习纸上的红外编码被识别并转化为计算机可读的信息，为儿童在游戏纸上拼接卡片提供了电子化的信息支持，通过更换游戏纸识别不同红外编码从而实现多种模式的游戏化学习。

如图 6b 所示，学习板内部设有导电油墨印刷的电路，从上至下分层布置第一电路层、绝缘开孔层、第二电路层。第一电路层和第二电路层包括 $N \times M$ 个存储着身份信息 and 位置信息的编码按键。信号输入端作为公共端，接电源正极，如 +3.3 V；一个信号输出端将第二电路层的一个触点和处理器的一个 IO 端口连接起来，处理器通过 IO 端口能够判断出信号输入端的信号是通过哪个编码按键处的触点传输过来的。



a) 实现多种模式的游戏化学习



b) 实现拼接动作产生的一系列响应

图 6 动态纸媒产品的技术原理

Fig. 6 Technical principles of dynamic paper media products

在答题纸上进行拼接组合时, 儿童需要将知识卡放在答题纸上的身份区进行身份赋予, 再放置到位置识别区进行拼接学习。导电油墨印刷的电路上下接通, 使感应板内集成电路板处理电路信息, 调动存储的知识信息, 对行为进行判断, 通过语音芯片发出指令, 实现纸媒体与数字媒体的互动, 整个操作过程可以达到去屏幕化。

通过这款动态纸媒防伪学习产品(如图7所示), 儿童在看到游戏纸上题目关卡时, 获取题目信息并思考通关方式。同时, 通过拼接的动作进行触觉交互时, 产品内部的柔性印刷电路发挥了关键作用, 实现了视觉、触觉和听觉3个感官层级的全面防伪学习体验^[14-16]。在视觉方面, 通过使用鲜艳的颜色和有趣的形状等设计元素, 吸引儿童的注意力, 让儿童在操作过程中产生愉悦的情感体验, 从而激发他们的学习兴趣和积极性。在触觉方面, 将知识卡运用不同的质感和纹理, 正面使用光滑的材质, 反面使用略微粗糙的材质, 增加触觉层面的参与感。在听觉方面, 使用音效和背景音乐以增强听觉感官层的效果, 使学习过程更加生动有趣, 帮助儿童更好地理解防伪技术的概念。

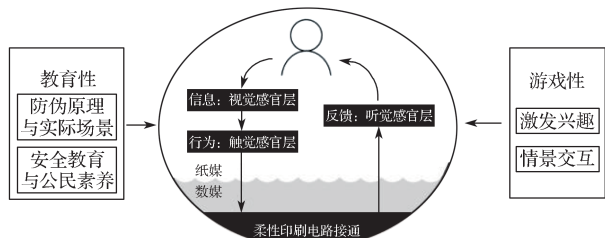


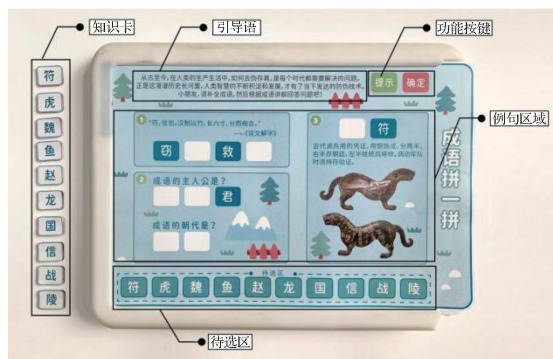
图7 动态纸媒防伪学习多感官层级

Fig. 7 Dynamic paper media anti-counterfeiting learning multi-sensory levels

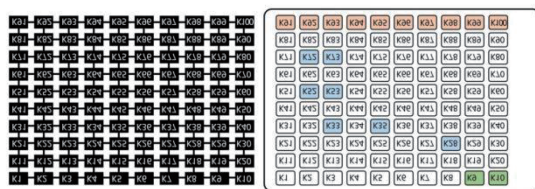
3.2 防伪学习游戏案例

以针对8~10岁小学阶段儿童的中国古文明与防伪技术为例制作了答题纸(见图8a)。答题纸页面上提供了不完整的知识填空, 在游戏中, 儿童需要从包含干扰选项的待选项中选择正确的元素, 将题目的拼图补充完整。在具体的游戏设计中, 如图8b所示, 需要对100个由柔性电路构成的交互点位进行编号赋值, 编号赋值顺序为从左到右, 从上到下依次排序。图中第一行第一个编号为K1, 第一行第二个编号为K2依次类推。儿童将背面印有8位红外编码的游戏纸插入学习板, 红外识别电路可以扫描红外编码, 主控芯片可以根据扫描电路的处理结果, 识别判断红外

编码对应的8位2进制数, 并且跳转到对应的代码去执行。如针对红外编码为10000001的游戏纸, 识别键区域为K91-K100, 操作键区域为K28、K33、K35、K52、K53、K72、K73, 功能键区域为K9、K10, “识别键K91+操作键K33”为正确放置汉字元素“符”的知识卡。



a) 组成部分



b) 印刷电路点位布局

图8 案例游戏设计功能图

Fig. 8 Case game design function chart

对于带有汉字元素的知识卡, 需要赋予身份并判断是否正确, 所以要将知识卡先放在识别键区域进行身份赋予, 再放置到操作键区域进行拼接学习。如图9所示, 在完成成语“窃符救赵”的拼图填字时, 儿童需要识别并思考第一个空格应填入汉字元素“符”, 然后将带有汉字元素“符”的知识卡先识别后放置在指定区域。系统会判断儿童填入的待选字是否正确。若填入正确的字, 学习板会调用存储在TF卡中的数字教育资源, 产生语音反馈, 包括成语的读音和含义用法等信息。当儿童使用相同的操作正确放置带有汉字元素“赵”的知识卡后, 成语“窃符救赵”将拼接完整, 即“操作键K33”和“操作键K35”编码点位正确接通, 将讲解该成语的历史典故, 并引导儿童回答与成语相关的问题, 例如主人公和所属朝代。此外, 答题纸的左侧部分提及了虎符, 这是由成语“窃符救赵”引申出的古代具有独特防伪技术的军事符号。通过介绍虎符, 此游戏可以为学生提供更丰富的文化背景知识, 帮助他们进一步探索 and 了解古代防伪技术

和军事符号的使用。

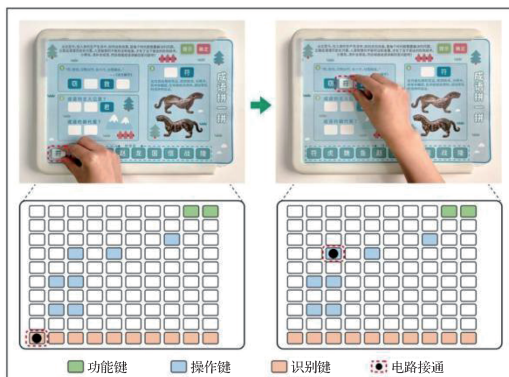


图 9 成语单个汉字元素识别过程图

Fig. 9 Idiom single Chinese character element recognition process diagram

4 结语

本研究旨在探讨如何将纸媒与新技术、新理念有机结合，为儿童防伪知识学习提供最佳载体。通过基于柔性印刷电路的技术，设计了一种防伪学习产品，通过学习板、答题纸、知识卡的拼接交互动作触发电路编码连通，实现了纸媒实物层面与儿童进行视觉、触觉、听觉的深度交互学习过程。该防伪学习产品的研发具有重要的意义和潜在的应用价值。首先，它将传统纸媒与现代技术相结合，实现了纸媒与数媒的融合，为防伪知识的传递提供了新的方式和平台。纸媒的真实自然特性和数媒的多媒体优势相结合，使知识点的呈现更加准确、清晰、高效，提升了学习效果和体验。其次，该产品注重实体操作，通过手、眼、脑的协调作用，促进了儿童的动手能力和触觉感知能力的发展。相比于纯粹的电子学习产品，这种实体操作的方式更符合儿童的学习需求和认知特点，能够更好地激发他们的学习兴趣和参与度。防伪技术作为现代社会的重要组成部分，具有丰富的内涵和深远的意义。通过创新的纸媒防伪知识学习产品，可以让更多的儿童接触、理解和传承防伪技术，加深对这一现代领域的认知和理解。

参考文献:

[1] 王雪微. 本体与转换: 纸材料在当代艺术及设计中的表现研究 [D]. 南京: 南京艺术学院, 2022.
WANG Xuwei. Ontology and Transformation: Research on the Performance of Paper Materials in Contemporary

Art and Design[D]. Nanjing: Nanjing University of the Arts, 2022.

[2] 陈泽宇. 亲子阅读中的互动行为研究及产品设计 [D]. 广州: 广东工业大学, 2022.

CHEN Zeyu. Research on Interactive Behavior and Product Design in Parent-Child Reading[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.

[3] 郭媛媛. 全媒体时代下我国纸质书籍形态设计研究 [D]. 北京: 北京服装学院, 2017.

GUO Yuanyuan. Research on the Taper-Made Books form Design in Omni-Media Era[D]. Beijing: Beijing Institute of Clothing Technology, 2017.

[4] 潘颖. 新媒体时代中国儿童文学多维特征研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 2020.

PAN Ying. Research on the Multidimensional Characteristics of Children's Literature in the New Media Era[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2020.

[5] 陈锡蓉. 我国防伪技术发展现状及应用 [J]. 认证技术, 2013(2): 27-28.

CHEN Xirong. Development Status and Application of Anti-Counterfeiting Technology in China[J]. China Quality Certification, 2013(2): 27-28.

[6] 徐君涛, 刘茜, 楼焕, 等. 防伪技术的多技术融合发展及应用 [J]. 丝网印刷, 2023(13): 43-45.

XU Juntao, LIU Qian, LOU Huan, et al. Multi-Technology Integration and Applications in Anti-Counterfeiting Technology Development[J]. Screen Printing, 2023(13): 43-45.

[7] 邓洋, 李征. 数字化防伪技术的原理及应用研究 [J]. 包装工程, 2015, 36(9): 139-143.

DENG Yang, LI Zheng. Principle and Application of Digital Anti-Counterfeit Technology[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(9): 139-143.

[8] 王望, 郭彦峰, 孙振锋. 碳系导电油墨填料的研究进展 [J]. 化工进展, 2015, 34(12): 4259-4264, 4279.

WANG Wang, GUO Yanfeng, SUN Zhenfeng. Research Progress of Carbon-Based Conductive Ink Fillers[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(12): 4259-4264, 4279.

[9] 张园. 印刷电子用导电油墨的研究进展 [J]. 化工新型材料, 2015, 43(7): 9-11.

ZHANG Yuan. Research Progress of Conductive Ink Applied in Printed Electronics[J]. New Chemical Materials, 2015, 43(7): 9-11.

[10] 马秀峰, 李飞. 导电油墨技术及其研究方向 [J]. 中国印刷与包装研究, 2010, 2(6): 9-14.

MA Xiufeng, LI Fei. Conductive Ink Technology and

- Research Direction[J]. China Printing and Packaging Study, 2010, 2(6): 9-14.
- [11] 吴文娜. 教育游戏在幼儿教育中的应用研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2009.
- WU Wenna. Research on the Application of Educational Games in Children's Teaching[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2009: 8-12.
- [12] SHAER O, VALDES C, LIU S R, et al. Designing Reality-Based Interfaces for Experiential Bio-Design[J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2014, 18(6): 1515-1532.
- [13] WADSWORTH B J. Piaget's Theory of Cognitive and Affective Development: Foundations of Constructivism[M]. 5th ed. New York: Longman Publishers, 1996: 25-32.
- [14] 王 娱. 产品形象的多感官符号设计研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- WANG Yu. The Research of the Product Image's Multi-Sensory Symbols Design[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010.
- [15] 张 帆. 基于行为发展的纸质儿童绘本多感官体验设计[J]. 包装工程, 2022, 43(2): 179-185.
- ZHANG Fan. Multi-Sensory Experience Design of Children's Paper Picture Books Based on Behavioral Development[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(2): 179-185.
- [16] 黄晓敏. 多感官体验融入传统纸质书籍的探索[J]. 中国民族博览, 2017(7): 253-254.
- HUANG Xiaomin. Exploration on the Integration of Multi-Sensory Experience into Traditional Paper Books[J]. China National Exhibition, 2017(7): 253-254.

(责任编辑: 邓光辉)

Exploration of Dynamic Paper-Based Anti-Counterfeiting Learning Products Based on Flexible Printed Circuits

BIE Yifei¹, TIAN Yufei¹, CHEN Yunyang¹, LI Li², LIU Yi², SUN Jitai¹, QIAN Jun¹

(1. Research Center of Graphic Communication, Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. Hubei Jinghua Color Printing Co., Ltd., Xiaogan Hubei 432800, China)

Abstract: In order to improve children's knowledge of anti-counterfeiting technology and transform complex concepts of anti-counterfeiting technology into a form that is easy to understand and assimilate, a dynamic paper-based interactive method combining flexible printed circuits with anti-counterfeiting knowledge on paper-based media was explored and realized. A low-cost, conductive, water-based carbon conductive ink suitable for paper-based screen printing was prepared. By triggering the connectivity of the coding points on the flexible printed circuit through the splicing interactive actions of the study board, answer sheet and knowledge card, the process of visual, tactile, and auditory in-depth interactive learning was realized with children at the level of the physical paper media. The product integrates paper media into digital media by jointly expressing the content of anti-counterfeiting knowledge and delivering it to the audience, making the presentation of knowledge points more accurate, clear, and efficient. This dynamic paper-media interaction method not only retains the real and natural teaching experience of paper media, but also gives full play to the coordination of children's hands, eyes and brains through physical operation. At the same time, the form of visual splicing triggered by the coding points connected to the education of big data can be traced, and further promote the flexible printed circuit in the paper media innovation to show new vitality by better inheriting and carrying forward the essence of traditional Chinese culture.

Keywords: flexible printed circuit; paper media; carbon based water-based conductive ink; anti-counterfeiting knowledge; multi-sensory interaction