

# 传统糖画的3D智能打印机设计与开发

官昱颖, 何仁芬, 周 健, 王绍龙, 徐艳婷, 李 婷, 王晓艳\*

玉溪师范学院工学院, 云南 玉溪

收稿日期: 2026年3月24日; 录用日期: 2026年4月29日; 发布日期: 2026年6月11日

## 摘 要

传统糖画作为中国非物质文化遗产, 具有独特的艺术价值, 但存在手工制作效率低、传承难等困境。研究创新融合3D打印技术, 通过硬件结构设计、控制系统开发、糖料配方优化及工艺实验, 研制出可输出复杂图案的3D糖画打印系统及人机交互界面。该系统显著提升制作效率、降低人工依赖, 并支持个性化定制, 为传统糖画的数字化保护与文创应用提供了新路径。

## 关键词

糖画, 3D打印, 非物质文化遗产, 智能制造

# Design and Development of a 3D Smart Printer for Traditional Sugar Painting

Yuying Guan, Renfen He, Jian Zhou, Shaolong Wang, Yanting Xu, Ting Li, Xiaoyan Wang\*

College of Engineering, Yuxi Normal University, Yuxi Yunnan

Received: March 24, 2026; accepted: April 29, 2026; published: June 11, 2026

## Abstract

Traditional sugar painting, as a Chinese intangible cultural heritage, possesses unique artistic value. However, it faces challenges such as low efficiency in manual production and difficult inheritance. This study innovatively integrates 3D printing technology. Through hardware structure design, control system development, sugar formula optimization, and process experimentation, a 3D sugar painting printing system and human-computer interaction interface capable of outputting complex patterns have been developed. This system significantly enhances production efficiency, reduces manual dependency, and supports personalized customization, providing a new path for the digital preservation and cultural and creative application of traditional sugar painting.

\*通讯作者。

文章引用: 官昱颖, 何仁芬, 周健, 王绍龙, 徐艳婷, 李婷, 王晓艳. 传统糖画的3D智能打印机设计与开发[J]. 仪器与设备, 2026, 14(2): 208-215. DOI: 10.12677/iae.2026.142024

## Keywords

Sugar Painting, 3D Printing, Intangible Cultural Heritage, Smart Manufacturing

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

糖画技艺起源于中国民间，凭借其吉祥喜庆的图案和丰富的象征意义，成为传统节庆和民俗文化的重要组成部分。其创作技法融合了水墨画、书法、皮影、剪纸等多种传统艺术形式，糖画艺人通过使用勺子作“笔”，糖液作“墨”，在汉白玉石板上创作出富有动感和层次的艺术作品，展现了独特的审美风格[1]。作为中国非物质文化遗产，糖画不仅在传统节日和旅游景点中广泛传播，还承载着中华饮食文化与民间手工艺的深厚底蕴。然而，糖画制作依赖于艺人高度熟练的手工技艺，导致其效率低、质量不稳定且成本较高，制约了其广泛传播和技术传承。

近年来，3D 打印技术在制造业、医疗、艺术等领域的应用日益广泛，成为了复杂结构快速成型和个性化定制的有力工具。将 3D 打印技术引入糖画制作，能够在保持艺术性和美感的基础上显著提高生产效率，满足现代消费者对个性化定制的需求[2]。因此，探索基于 3D 打印的糖画制作方法，不仅为传统糖画技艺的传承创新提供了新路径，也为文化与科技的深度融合提供了有益实践。

## 2. 相关工作

### 2.1. 食品 3D 打印研究现状

食品 3D 打印具备个性化、精准化、柔性制造等显著核心优势，目前已在巧克力、面团、肉制品、糖果等食材成型中广泛应用，成为食品智能制造与创意食品的关键技术方向。

在熔融沉积成型(FDM)食品打印领域，现有研究多聚焦于热敏性食材的温控、流变特性与挤出稳定性。针对巧克力、糖浆等热熔型材料，研究者通过优化加热模块、喷嘴结构与温控算法，实现连续稳定挤出；同时围绕食材配比、黏度、冷却速率等参数开展实验，建立打印温度、挤出流速、运动速度与成型质量的关联模型。但现有食品 3D 打印研究多面向工业化零食、营养定制食品，专门针对传统糖画工艺、适配非遗艺术表达的专用打印设备与材料体系仍较为缺乏。

在设备与控制层面，主流食品 3D 打印机多采用通用三轴运动平台，针对高黏性、高温易结晶糖浆的专用喷嘴、防堵结构与闭环温控系统研究不足；且多数设备未结合传统手工艺的线条流畅性、艺术完整性需求进行路径规划优化，难以满足糖画精细线条与连续造型要求。

### 2.2. 非物质文化遗产数字化研究现状

非遗数字化已成为传统文化保护、传承与创新的核心路径，涵盖数据采集、数字建模、智能再现、文创转化四个关键环节。

在传统手工艺数字化领域，现有研究通过图像采集、三维扫描、矢量提取等技术，完成剪纸、皮影、木雕、糖画等技艺的图案与工艺数据留存；部分研究借助 AR/VR、交互设计实现非遗技艺的沉浸式展示，提升传播体验。但多数成果停留在数字化记录与展示层面，缺乏将数字模型直接转化为自动化制造的闭环系统。

在非遗智能制造转化方向,少量研究尝试将数控技术、3D打印用于陶艺、木雕等硬质材料加工,但面向食品类非遗(糖画、糖人、面塑)的智能打印装备与产业化方案极少。此类技艺兼具“食品属性”与“艺术属性”,需同时满足食品安全、口感风味、艺术形态三重约束,技术难度更高,相关系统设计、材料配方、工艺控制的研究存在明显空白。

### 3. 创新点

本研究通过将传统糖画技艺与数字化技术相结合,提出了以3D打印技术为核心的糖画创新制作方法。随着消费者对个性化文创产品需求的增加,糖画作为一种传统非遗文化被赋予了新的文化价值和市场前景。针对糖画传统制作工艺中效率低、成本高的问题,本研究构建了专用的糖画3D打印设备,并开发了配套软件平台,采用FDM技术喷涂冷却糖浆,在保持艺术性与美感的基础上,实现了糖画图案的自动化生成与精确喷射控制[3]。

此外,本研究还提出了兼顾打印性能与食品安全的糖浆配方优化方案,确保了糖画工艺的可控性和可重复性。同时,在文化层面,本研究通过数字化技术重塑传统糖画艺术,拓展了其在现代社会中的审美与传播边界[4]。本研究不仅实现了糖画制作过程的现代化,还提高了生产效率与文化传播力,为非遗数字化保护、创新性传承及产业化发展提供了新的技术路径和理论支持[5]。

### 4. 研究方法与技术路线

#### 4.1. 技术路线

本研究遵循“文化元素数字化→打印机硬件搭建→软件开发→材料实验→功能验证与优化”的技术框架,逐步实现糖画智能打印技术的系统设计与优化。

本研究的整体技术路线与实现路径首先以传统糖画的文化元素数字化为起点,通过图案提取与数据建模构建基础数据支撑,并同步完成打印机相关数据结构的建立。在此基础上,开展3D糖画打印系统的硬件搭建,包括铝型材框架构建、运动机构安装(步进电机、丝杆与导轨)、喷嘴及温控模块设计、控制单元部署以及人机交互模块集成,同时配套进行软件开发与参数调节界面设计,实现系统的整体联动。随后,通过材料实验对糖浆配方进行变量设置与多环境打印测试,筛选出兼顾喷射性能与成型效果的最优配方。最后,通过功能验证与优化环节,结合人工与打印效果对比、指标检测与问题定位,逐步完善系统性能,最终形成完整的3D糖画打印技术体系,实现传统糖画工艺向数字化、智能化制造的转化。

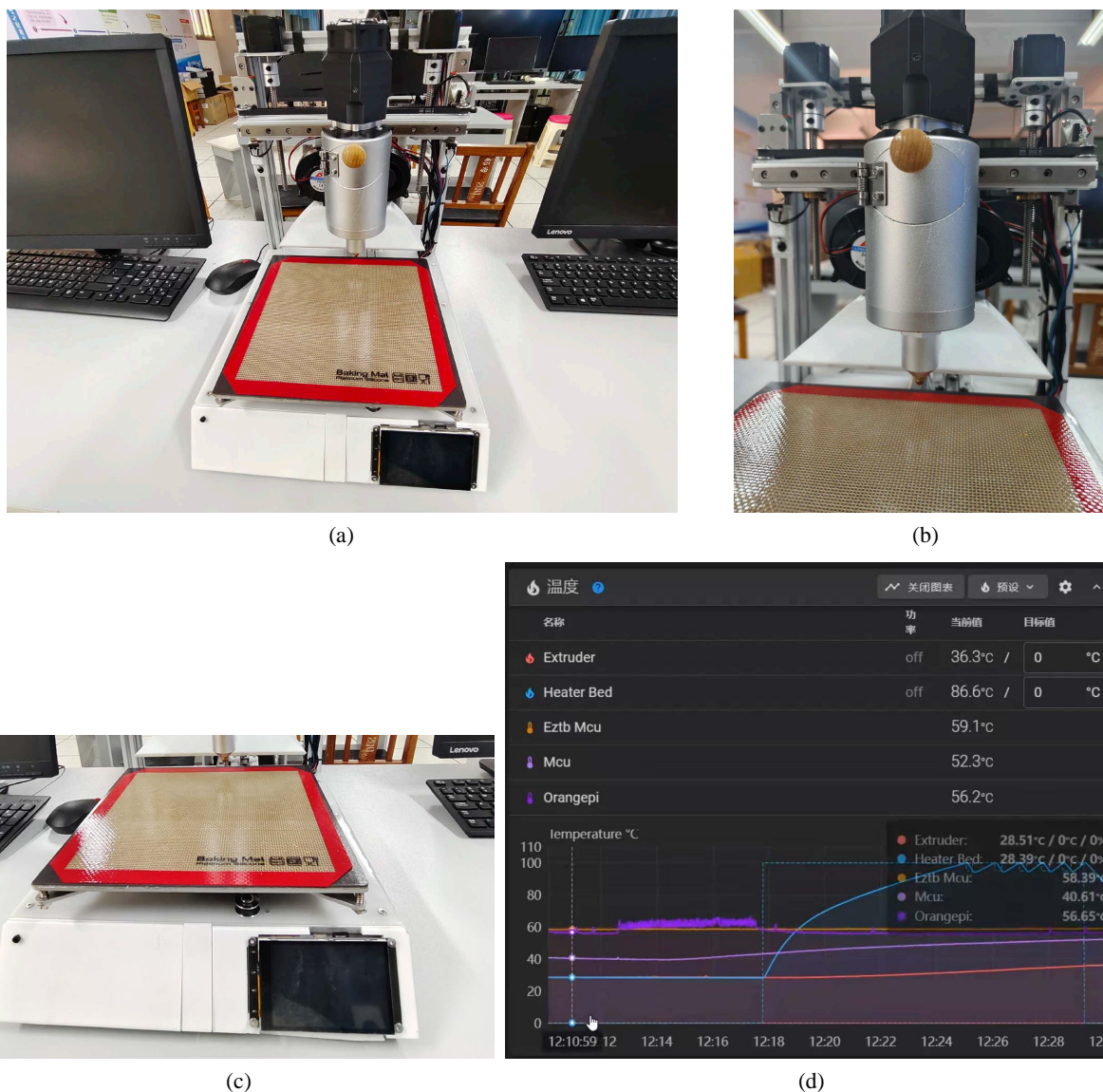
#### 4.2. 硬件系统设计

本研究针对糖画3D打印的工艺需求,设计并搭建了一套稳定、高精度的硬件系统,主要包括结构框架、运动机构、喷嘴系统、控制单元及人机交互模块,整体硬件系统结构如图1(a)所示。

在结构设计方面,系统采用截面尺寸为20 mm×20 mm的6061铝合金型材构建整体框架,以保证设备的刚性与稳定性。框架整体尺寸为400 mm×300 mm×350 mm(长×宽×高),采用模块化拼接结构,通过角码与螺栓连接,便于后期拆卸与维护。同时,在底部设置厚度为5 mm的防滑橡胶垫,以增强设备与工作台之间的摩擦力。实验测试表明,该结构在运行过程中振幅可控制在0.1 mm以内,满足精细打印的稳定性要求。

在运动控制方面,系统采用步进电机、丝杆与线性导轨相结合的三轴运动机构,实现打印头在X、Y、Z方向的精确运动。三轴均选用42型步进电机(高度47 mm),并配合16细分驱动器,使系统最小位移精度达到0.0125 mm,可满足糖画线条宽度在0.5~2 mm范围内的精细打印需求。在传动方式上,X/Y轴采用T8滚珠丝杆(导程8 mm,定位精度±0.02 mm)与MGN12线性导轨组合,传动效率可达90%以上,

有效减少运动卡滞现象；Z轴则采用同步带传动(带宽 6 mm)，在保证稳定性的同时提升升降速度，其最大运动速度可达 100 mm/s。此外，系统在三轴均设置光电限位开关(响应时间  $\leq 1$  ms)，实现极限位置保护，避免机械碰撞对设备造成损伤。



**Figure 1.** (a) Overall hardware structure; (b) High-temperature nozzle and temperature control module; (c) Human-machine interface; (d) PID temperature control curve

**图 1.** (a) 整体硬件结构; (b) 高温喷嘴与温控模块; (c) 人机交互界面; (d) PID 温度控制曲线

在喷嘴系统方面，为适应糖浆材料的高温与黏性特性，设计了专用高温喷嘴结构。喷嘴主体采用 304 不锈钢材料(耐温  $\leq 800^{\circ}\text{C}$ )，内壁经抛光处理(粗糙度  $Ra \leq 0.8 \mu\text{m}$ )，以降低糖浆残留和堵塞风险。喷嘴口径设置为 0.8 mm、1.2 mm 和 1.5 mm 三种规格，可根据不同图案复杂度进行更换。在加热控制方面，喷嘴外部缠绕 20 W 陶瓷加热片，配合 PT100 温度传感器(测量精度  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ )，并通过 PID 温控算法实现闭环温度调节，使糖浆始终保持在  $105^{\circ}\text{C} \sim 115^{\circ}\text{C}$  的适宜流动区间，从而保证挤出过程的连续性与稳定性。高温喷嘴结构与温控模块实物如图 1(b)所示。

在控制系统方面,采用“上位机+下位机”的双处理器架构。其中,下位机基于STM32F072RBT6芯片,实现对步进电机、加热模块及传感器的实时控制;上位机采用基于Cortex-A7架构的全志H3处理器,负责复杂任务调度与人机交互功能。系统整体运行于Klipper固件框架下,上下位机通过CAN总线实现高速通信,确保控制指令传输的实时性与可靠性。同时,系统具备自动PID参数整定功能,可根据实际打印工况动态优化喷嘴温度控制曲线,从而减少温度波动对打印质量的影响。

在人机交互方面,系统配备3.5英寸TFT触摸显示屏,用于实时显示打印进度、喷嘴温度及系统运行状态,并支持用户对打印参数进行动态调整。在数据处理与传输方面,系统兼容OrcaSlicer切片软件,可对糖画图案进行路径切片处理,并通过Wi-Fi实现打印文件的无线传输。此外,上位机内置32GB TF卡作为本地存储介质,可存储多组打印任务,支持连续打印及多图案切换,提升系统的实用性与灵活性。人机交互界面与操作显示效果如图1(c)所示。

在加热控制方面,喷嘴外部缠绕20W陶瓷加热片,配合PT100温度传感器(测量精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ),并通过PID温控算法实现闭环温度调节,使糖浆始终保持在 $105^{\circ}\text{C}\sim 115^{\circ}\text{C}$ 的适宜流动区间,从而保证挤出过程的连续性与稳定性。为验证PID温控效果,对喷嘴温度进行实时采集,喷嘴PID温度控制曲线如图1(d)所示。由曲线可知,系统升温迅速、超调量小,稳态波动 $\leq \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ,温控精度与稳定性满足打印要求。

### 4.3. 软件系统开发

本研究围绕糖画3D打印系统的软件需求,构建了集图案设计、路径规划与打印控制于一体的软件平台,实现了从图案输入到设备执行的完整流程,软件系统整体架构如图2所示。

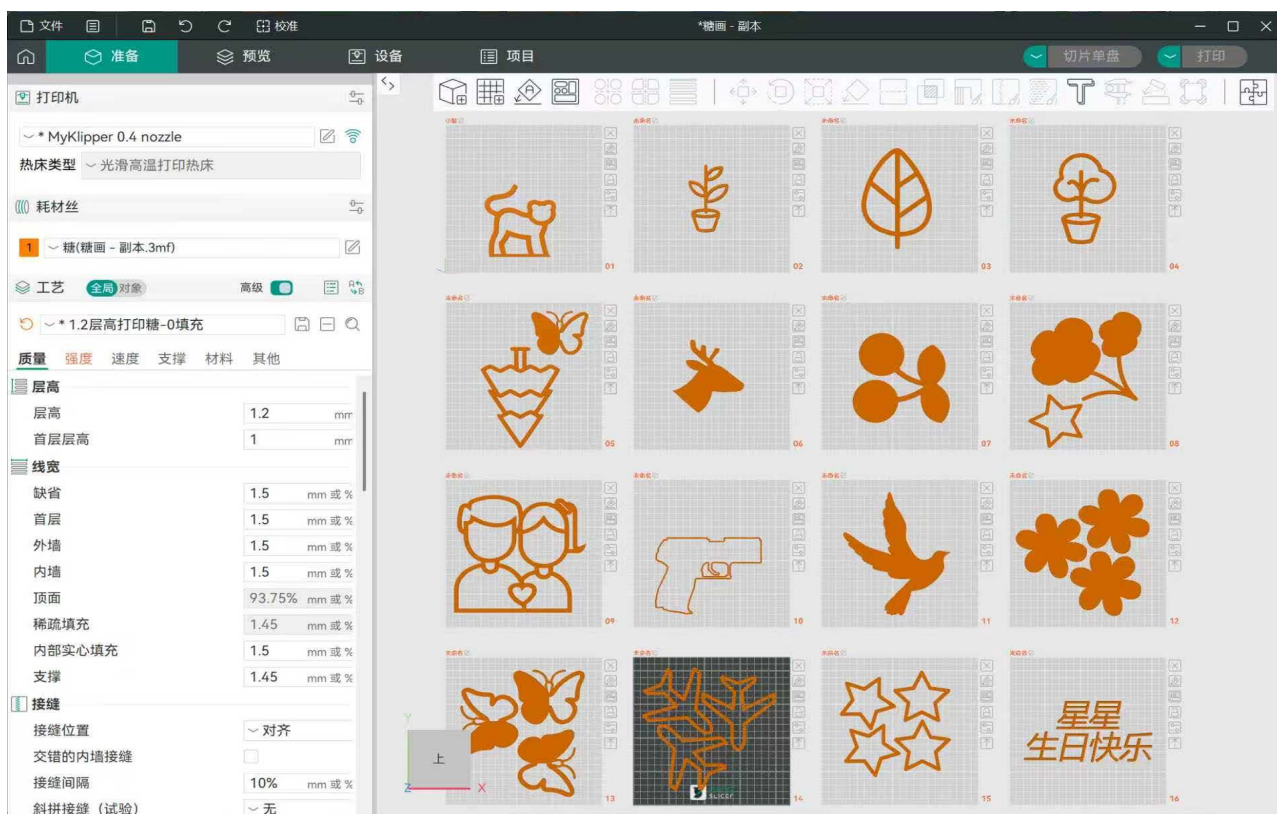


Figure 2. Overall architecture of the sugar painting 3D printing software system  
图2. 糖画3D打印软件系统整体架构

在图案设计模块中,系统支持模板调用与自定义上传两种输入方式。模板库内置 200 余幅标准化糖画图案,按“几何图案”、“动物形象”、“民俗文字”等类别进行分类,用户可对图案尺寸进行调整(50 mm×50 mm 至 200 mm×200 mm)。对于自定义输入,系统支持 JPG、PNG 及 SVG 格式图像(分辨率不低于 300 dpi),并通过边缘检测算法自动提取图案轮廓,将其转换为矢量路径,轮廓提取精度可达 95% 以上。在图案编辑方面,系统提供线条宽度调节(0.5~3 mm)、图案旋转(0°~360°)、镜像翻转等功能,同时支持多图案叠加组合,以满足个性化设计需求。

路径规划模块采用“分层切片+轮廓填充”算法,将矢量图案转换为 G-code 控制指令。针对 100 mm×100 mm 的标准图案,指令生成时间可控制在 2 s 以内。同时引入路径优化策略,自动剔除冗余路径,可使路径长度缩短约 15%~20%,从而提升打印效率。

此外,系统根据图案复杂度自适应选择路径策略:对于简单几何图案采用连续直线路径以提高打印速度;对于复杂曲线图案采用分段圆弧插补以保证曲线平滑性;对于文字类图案采用最短路径规划以确保笔画连续性。

在人机交互方面,系统界面简洁直观,支持对打印温度、挤出流速及打印速度等关键参数进行实时调节,实现打印过程的可视化控制与优化。

## 5. 实验与结果分析

### 5.1. 打印实验

为验证所提出糖画 3D 打印系统的性能与稳定性,本研究选取几何图案(五角星)、动物形象(兔子)及文字(“生日快乐”)三类典型图案作为测试对象,设计多组打印参数进行对比实验。

实验设置两组典型工艺参数:参数 A 为喷嘴温度 110℃、挤出流速 8 mm/s、打印速度 50 mm/s;参数 B 为喷嘴温度 105℃、挤出流速 6 mm/s、打印速度 75 mm/s。通过控制变量的方法,对不同参数组合下的打印效果进行对比分析。

实验评价指标主要包括打印时间、打印成功率、线条尺寸误差及视觉观感评价。其中,线条误差通过测量实际线宽与理论值的偏差获得,观感评价则通过多名测试者对成品的完整性与流畅度进行主观评分。

实验结果表明,在参数 A 条件下,系统整体打印性能较优。具体而言,几何图案、动物图案及文字图案的打印成功率分别达到 95%、92% 和 90% 以上;线条平均误差约为 0.3 mm,显著优于参数 B 条件下的 0.6 mm。同时,在观感评价中,约 85% 的测试者认为参数 A 下打印的糖画作品线条更加流畅、结构更加完整。综上,参数 A 在打印稳定性、精度及成品质量方面均表现出更优性能,可作为本系统的推荐工艺参数。

### 5.2. 材料性能分析

实验结果表明,不同糖浆配方在喷射稳定性与冷却特性方面存在显著差异。当蔗糖质量占比超过 70% 时,糖浆黏稠度提升至 800 mPa·s 以上,在挤出过程中易出现拉丝或断流现象;当葡萄糖占比超过 30% 时,糖浆熔点降低至 95℃ 以下,冷却后易发生吸潮软化,影响成型稳定性。此外,当水分含量低于 10% 时,糖浆流动性不足,难以实现稳定挤出;而水分含量高于 15% 时,则会导致冷却时间延长,且成型后易产生变形。为进一步分析不同配方对打印性能的影响,选取两组典型配方进行对比实验,其结果如表 1 所示。

由表中数据可见,配方 A 虽然在口感上更接近传统糖画的酥脆特性,但其喷射稳定性较差,在打印复杂图案时容易出现断流问题;相比之下,配方 B 在喷射稳定性和成型性能方面表现更优,冷却时间更

短，能够满足复杂图案的连续打印需求。综合考虑打印性能与食用品质，配方 B 在本研究系统中表现出更优的综合性能，可作为优选糖浆配方。

**Table 1.** Comparison of two typical formulations

**表 1.** 两组典型配方对比

配方成分 (蔗糖:葡萄糖:水)	冷却时间 (秒)	口感	喷射稳定性	打印适应性
70:20:10 (配方 A)	28	酥脆, 甜度较高	较差 (断流率 18%)	仅适合简单几何图案, 复杂造型易断裂
60:25:15 (配方 B)	20	软硬适中, 甜度适中	良好 (断流率 3%)	适配所有类型图案, 尤其适合动物形象精细线条

### 5.3. 软件可用性测试

软件的可用性测试共邀请 10 名测试者参与测试，其中包括 3 名无数字化操作经验的手工糖画艺人、4 名普通消费者以及 3 名具备基础 3D 建模知识的技术人员。

测试任务包括三个典型操作流程：一是上传自定义图像(SVG 格式，分辨率 500×500 像素)并完成图案转换；二是调用内置“五角星”模板并将尺寸由 10 cm×10 cm 调整至 15 cm×15 cm；三是设置打印参数(包括温度与流速)并启动打印过程。在测试过程中，记录各测试者完成任务的操作时长与错误次数，并在测试结束后填写满意度问卷。

实验结果表明，10 名测试者完成全部操作流程的平均耗时为 8 min 30 s。其中，技术人员平均耗时为 5 min 10 s，且未出现操作错误；普通消费者平均耗时为 9 min 20 s，平均错误次数为 1.2 次，主要集中在参数设置误操作；手工糖画艺人平均耗时为 12 min 15 s，平均错误次数为 2.5 次，错误主要发生在图像格式转换与路径生成环节。

满意度调查结果显示，测试者总体评价较高，10 分制的平均得分为 8.6 分。其中，8 名测试者认为软件界面直观，能够独立完成操作流程；2 名手艺人建议增加视频教程以提升学习效率；9 名测试者认为系统在图案设计与打印执行之间衔接流畅，仅 1 名测试者提出应进一步简化参数设置选项。

综上，所开发软件在易用性与功能完整性方面表现良好，但在面向非技术用户时，仍需进一步优化操作引导与参数设置机制，以提升系统的普适性与用户体验。

## 6. 讨论

### 6.1. 技术优势分析

本研究通过将 3D 打印技术引入传统糖画制作体系，实现了非物质文化遗产与现代制造技术的融合。实验结果表明，所研制的糖画 3D 打印系统在结构精度、生产效率及个性化定制能力等方面均优于传统手工方式，体现出较高的技术应用价值。

在硬件方面，系统采用模块化结构与多规格喷嘴配置，有效提升了设备运行稳定性及维护扩展能力；在软件方面，实现了图案建模、路径规划与打印控制的一体化，提高了操作效率与打印精度。与传统手工糖画相比，该系统能够稳定输出高一一致性作品，并将制作效率提升约 2~3 倍，同时降低人工依赖与材料损耗。

### 6.2. 局限性与改进方向

尽管本研究取得了一定成果，但在实际应用中仍存在若干局限性。第一，糖浆材料的物理特性对环

境温湿度较为敏感, 在环境波动条件下易出现喷嘴堵塞或挤出不稳定等问题, 系统缺乏自适应调节能力; 第二, 当前路径规划算法在复杂图案处理过程中, 在打印效率与精度之间仍存在优化空间, 难以还原糖画艺人的艺术风格; 第三, 控制系统以开环为主, 缺乏全流程闭环反馈与故障自愈能力。当出现喷嘴轻微堵塞、糖浆黏度漂移等情况时, 无法实时识别并自动调整, 长时间连续运行易产生误差累积, 稳定性有待提升。

针对上述问题, 未来研究可从以下几个方面进行改进: 一是优化糖浆配方及环境适应性参数, 提升材料稳定性, 降低环境因素对打印过程的影响; 二是引入更加精细化的温控策略与闭环控制机制, 在设备中嵌入温湿度传感器、视觉检测模块与流量传感单元, 构建多传感融合的闭环控制架构。实时采集环境参数与成型状态, 动态调整喷嘴温度、挤出流速、打印速度等关键参数, 建立“环境-材料-设备”协同调节模型, 实现打印过程的动态调节, 实时感知温湿度并动态调整打印参数, 提升环境适应性; 三是进一步优化路径规划算法, 采集资深糖画艺人的经典作品与运笔轨迹数据, 通过机器学习模型学习线条曲率、运动速度、笔触力度等风格特征, 生成具备艺人艺术风格的个性化打印路径, 使设备能够模仿特定流派或艺人的创作韵味, 实现标准风格、飘逸风格、厚重风格等多种艺术效果切换, 提升作品文化与艺术价值。

### 6.3. 文化意义与应用价值

从文化视角来看, 本研究不仅实现了糖画制作工艺的数字化转化, 也为传统手工艺的保护与传播提供了新的技术路径。通过 3D 打印技术, 糖画制作突破了对个体技艺的依赖, 使其能够以标准化、规模化的方式进行再现与传播, 为其在文创产品开发、教育展示及文化旅游等领域的应用提供了新的可能。

需要指出的是, 数字化技术应作为传统手工艺的补充与延伸, 而非替代。未来研究应更加注重在数字化过程中保留糖画的艺术特征与文化内涵, 使技术手段服务于文化表达, 实现技术与艺术的协调发展。

### 6.4. 跨学科意义

从跨学科角度来看, 本研究构建了“文化遗产数字化-智能制造-食品打印”相结合的技术路径, 为非遗数字化研究提供了新的思路。相关方法与技术框架可推广至面塑、糖人、陶艺等其他传统工艺领域, 对推动非遗保护向系统化与可持续发展方向转型具有一定的参考价值。

## 基金项目

玉溪师范学院校级研究课题“传统糖画技艺的 3D 智能打印技术研究”(项目编号: 2024A012)。

## 参考文献

- [1] 董妍. 糖画技艺的可接触式交互设计及用户体验研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [2] 许媛媛. 基于 AR 技术的成都糖画文创设计实践[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2024.
- [3] [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=7jvqSX1a2LXoyIYfgNVsn4qQDa3noWYCJmy4F48nVyhN3oMT\\_sICtnk2L88gGJhs0TFrpWVm4s0gsed-trJJJKupWpuX609\\_XfY30TGOB4a6Q32frZko9PF8aBOYeH2T79364HME9DVj8qb61Q4-bnI3aCgBaJIMo1Ki-WEOhO7npqbBHXBNEmurmtkiTNkv4&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=7jvqSX1a2LXoyIYfgNVsn4qQDa3noWYCJmy4F48nVyhN3oMT_sICtnk2L88gGJhs0TFrpWVm4s0gsed-trJJJKupWpuX609_XfY30TGOB4a6Q32frZko9PF8aBOYeH2T79364HME9DVj8qb61Q4-bnI3aCgBaJIMo1Ki-WEOhO7npqbBHXBNEmurmtkiTNkv4&uniplatform=NZKPT&language=CHS)
- [4] 马晓娜, 图拉, 徐迎庆. 非物质文化遗产数字化发展现状[J]. 中国科学(信息科学), 2019, 49(2): 121-142.
- [5] 何顶新, 王维, 徐金榜, 等. 温控系统中改进的 PID 算法[J]. 电气传动, 2007, 37(8): 36-39.