

# 精雕技术在传统纹样的数字化应用研究

李建春<sup>1</sup>, 刘辛夷<sup>2</sup>, 刘春朝<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 广东松山职业技术学院, 广东韶关, 中国

<sup>2</sup> 浙江工商职业技术学院, 浙江宁波, 中国

**【摘要】**传统纹样是中华优秀传统文化的重要载体, 其数字化保护与创新应用是当前文化传承的核心需求之一。为解决传统纹样数字化精度不足、再现效果不佳、工艺标准化缺失等问题, 本研究以精雕技术为核心, 构建“采集-分类-建模-加工”全流程数字化技术体系: 通过三维扫描(精度0.05mm)、高清摄影(分辨率≥3000万像素)及数字绘制技术实现纹样高精度采集; 建立“起源与文化背景-题材与内容-载体与工艺-造型与结构”多维度分类体系; 提出轮廓、结构、纹理、艺术特征四维参数化建模方法; 优化数控雕刻刀具(Φ0.5mm-Φ6mm)、切削(主轴转速8000-24000rpm)及路径参数, 形成“数字化建模-工艺设定-设备调试-分步加工-后处理”标准化流程。研究成果可实现传统纹样的精准数字化再现, 为传统工艺的现代化传承与创新应用提供技术支撑。

**【关键词】**精雕技术; 传统纹样; 数字化采集; 参数化建模; 数控雕刻

**【基金项目】**2025年广东松山职业技术学院课程思政示范项目“基于数控雕刻技术的传统纹样数字化再现与文化自信培育路径研究”(项目编号: 2025SZJG04); 广东省普通高校科研平台“粤北乡村振兴研究院”(项目编号: 2022WZJD015)

## 1.引言

传统纹样承载着中华民族数千年的文化基因与审美智慧, 广泛应用于织绣、陶瓷、雕刻、建筑等领域。然而, 受自然老化、人为损坏及传承断层影响, 大量传统纹样面临流失风险, 数字化成为其保护与传承的关键手段。目前, 传统纹样数字化存在三大核心问题: 一是采集技术单一, 立体纹样细节捕捉不足, 平面纹样色彩偏差明显; 二是分类体系混乱, 缺乏统一标准导致资源管理效率低下; 三是数控加工参数无规范, 纹样再现精度与艺术表现力难以平衡。

鉴于此, 本研究以精雕技术为核心, 结合三维扫描、参数化建模及数控加工技术[1-3], 开展传统纹样全流程数字化研究。研究依托学院工艺数字化实验室, 选取明清木雕纹样、宋代陶瓷纹样、苗族刺绣纹样等120组典型样本进行实验验证, 旨在建立科学、高效的传统纹样数字化技术体系, 为传统工艺的现代化转化提供实践路径。

## 2.传统纹样的数字化采集与分类体系构建

### 2.1 传统纹样数字化采集方法

传统纹样因载体与形态差异, 需采用差异化采集技术[4,5], 本研究构建三类核心采集方法, 具体参数与适用场景见表1。

#### 2.1.1 三维扫描技术应用

针对立体纹样, 采用“分区扫描-点云配准-网格重建”流程: 对于尺寸≤50cm的纹样, 单次扫描完成; 尺寸>50cm的纹样, 按20cm×20cm分区扫描, 通过特征点匹配实现拼接。扫描前需对纹样表面进行清洁(去除灰尘、油污), 对于反光表面(如金属纹样), 喷涂哑光扫描剂(如3M扫描喷雾), 避免扫描噪声。

表1.传统纹样数字化采集方法对比

采集方法	适用纹样类型	核心参数	设备要求
三维扫描技术	木雕、石雕、陶瓷浮雕等立体纹样	扫描精度0.05mm, 点云密度≥500点/mm <sup>2</sup>	激光三维扫描仪(如FARO Focus S70)、结构光扫描仪(如EinScan-Pro)
高清摄影技术	织物、印染、绘画等平面纹样	分辨率≥3000万像素, 色彩偏差ΔE≤1.5	全画幅单反相机(如Canon EOS R5)、标准光源箱(5000K色温)、色卡(X-Rite ColorChecker)
数字绘制技术	仅存图样资料的残缺纹样	矢量图形精度±0.01mm, 比例偏差≤1%	专业绘图软件(Adobe Illustrator、CorelDRAW)、数位板(Wacom Intuos Pro)

#### 2.1.2 高清摄影技术规范

平面纹样摄影需满足“三定原则”：定光源（标准光源箱，照度 500lux）、定角度（相机与纹样表面垂直，倾角偏差 $\leq 1^\circ$ ）、定距离（根据纹样尺寸调整，确保图像分辨率达标）。拍摄时同步放置色卡，后期通过 Photoshop Camera Raw 软件进行色彩校正，消除环境光干扰。

### 2.1.3 数字绘制技术要点

数字绘制以原始图样为基准，采用“1: 1

表 2.传统纹样多维度分类体系

分类维度	一级分类	二级分类	典型案例
起源与文化背景	区域性纹样	北方纹样、南方纹样、西北纹样、东南沿海纹样	北方砖雕牡丹纹、南方苏绣水纹
	民族性纹样	汉族、藏族、苗族、壮族、维吾尔族纹样	汉族龙纹、苗族银饰纹样
	时代性纹样	夏商周、秦汉、唐宋、元明清纹样	商周青铜器雷纹、唐代宝相花纹
题材与内容	动物纹样	龙纹、凤纹、鱼纹、虎纹、麒麟纹	明清龙袍龙纹、宋代瓷枕鱼纹
	植物纹样	牡丹纹、莲花纹、菊花纹、竹纹、梅纹	唐代铜镜莲花纹、元代青花牡丹纹
	自然景物纹样	云纹、水纹、山纹、日月纹	宋代建筑彩绘云纹、清代珐琅器水纹
	几何纹样	回纹、卷云纹、雷纹、重环纹	商周青铜器回纹、汉代瓦当卷云纹
	文字纹样	寿字纹、福字纹、喜字纹	清代织锦寿字纹、明代青花瓷福字纹
载体与工艺	织绣纹样	丝织、刺绣、印染纹样	苏绣双面绣纹样、蜡染蓝印花纹
	陶瓷纹样	青花、釉上彩、釉下彩纹样	元代青花缠枝莲纹、清代粉彩花鸟纹
	雕刻纹样	木雕、石雕、玉雕、牙雕纹样	明清家具木雕纹样、和田玉浮雕纹样
造型与结构	单体纹样	独立形态纹样	清代玉佩梅花纹
	组合纹样	多元素叠加纹样	明代建筑木构龙凤组合纹
	连续纹样	边框纹、回纹等重复纹样	宋代瓷器边框回纹

## 3.传统纹样的参数化建模与数据处理

### 3.1 传统纹样参数化建模方法

参数化建模是实现纹样“可控编辑”的核心，本研究从轮廓、结构、纹理、艺术特征四个维度提取参数，建立数学模型[6-10]。

#### 3.1.1 轮廓特征参数化

采用“曲线拟合”方法：对于平滑轮廓（如植物纹样花瓣），用三阶贝塞尔曲线描述，提取控制点坐标（x, y, z）、曲线曲率（k）、弧长（L）3个参数；对于折线轮廓（如几何纹样），用多段线描述，提取转折点坐标（x, y, z）、线段长度（l）、夹角（θ）3个参数。参数精度控制在±0.01mm，确保轮廓形态准确。

#### 3.1.2 结构特征参数化

通过“层次分解”实现：将复杂纹样分解为主体层（占比 $\geq 60\%$ ）、次体层（占比20%-40%）、填充层（占比 $\leq 20\%$ ），提取各层面积占比（α）、位置偏移量（Δx, Δy）、对称类型（轴对称/中心对称/平移对称）3个

比例还原”策略：先建立辅助网格（网格间距 $\leq 1\text{mm}$ ），确保纹样比例准确；再按“轮廓-结构-细节”分层绘制，线条平滑度通过贝塞尔曲线控制点调整，曲率偏差 $\leq 0.05\text{mm}$ ；最终生成矢量图形，支持后续参数化编辑。

### 2.2 传统纹样多维度分类体系构建

基于120组样本的系统分析，构建四层分类体系，实现纹样资源的规范化管理，具体分类见表2。

参数。以明清龙纹为例，主体层为龙身（ $\alpha = 65\%$ ），次体层为龙鳞（ $\alpha = 25\%$ ），填充层为云纹（ $\alpha = 10\%$ ），对称类型为轴对称（对称轴偏差 $\leq 0.5^\circ$ ）。

#### 3.1.3 纹理特征参数化

针对表面质感，提取两类参数：一是纹理高度参数（h），通过三维扫描获取表面起伏数据，生成高度图（分辨率 $\geq 1024 \times 1024$ ）；二是材质参数，包括粗糙度（Ra）、反射率（ρ）、透明度（T），通过分光光度计（如 Konica Minolta CM-2600d）测量，Ra 控制在 0.1-1.0 μm，ρ 控制在 0.1-0.8，T 控制在 0-1（不透明为 0，透明为 1）。

#### 3.1.4 艺术特征参数化

聚焦纹样的审美属性，提取线条风格（粗细变化Δd、流畅度σ）、比例关系（各元素尺寸比γ）、装饰密度（单位面积纹样数量λ）3个参数。以宋代莲花纹为例， $\Delta d=0.2-0.5\text{mm}$ ， $\sigma=0.95$ （越接近1越流畅）， $\gamma$ （花瓣：莲蓬）=3: 1， $\lambda=5\text{ 个}/\text{cm}^2$ 。

### 3.2 传统纹样数据处理技术

采集的原始数据需经过优化处理，确保后续加工精度，核心处理技术包括点云处理、图像处理、矢量化处理三类。

#### 3.2.1 点云数据处理

针对三维扫描获取的点云，采用“滤波-配准-简化-重建”四步流程：①滤波：通过统计滤波（去除离群点，阈值设为 $3\sigma$ ）、半径滤波（去除孤立点，半径设为2mm）优化数据；②配准：采用ICP算法（迭代最近点算法），配准误差 $\leq 0.05\text{mm}$ ；③简化：在保持几何特征前提下，采用网格简化算法，点云数量减少50%-70%；④重建：生成三角网格模型（三角形边长 $\leq 1\text{mm}$ ），修复孔洞（最大孔洞面积 $\leq 5\text{mm}^2$ ）。

#### 3.2.2 图像数据处理

高清摄影图像需进行三项优化：①增强：通过直方图均衡化提升对比度，高斯模糊（半径0.5mm）降低噪声；②拼接：对于分区拍摄的图像，采用SIFT算法（尺度不变特征变换）实现无缝拼接，拼接误差 $\leq 1$ 像素；③分割：通过阈值分割（灰度阈值128-200）分离纹样与背景，提取有效区域。

#### 3.2.3 矢量化处理

数字绘制的位图需转换为矢量图：①边缘检测：采用Canny算法（阈值100-200）提取轮廓；②路径跟踪：沿边缘生成贝塞尔路径，节点间距 $\leq 1\text{mm}$ ；③曲线拟合：优化路径平滑度，曲率偏差 $\leq 0.05\text{mm}$ ；④节点优化：删除冗余节点（保留关键控制点），节点数量减少30%-50%。

#### 3.2.4 数据优化与存储

处理后的数据需进行格式转换与归档：①格式转换：转换为数控雕刻支持的格式（STL、OBJ、DXF），其中STL格式精度设为0.01mm；②模型修复：修复非流形结构（如重复面、开放边），确保模型完整性；③数据归档：建立元数据库，记录纹样名称、采集方法、参数化模型、加工工艺等信息，采用MySQL数据库管理，支持快速检索。

### 4. 数控雕刻技术参数优化与工艺流程

#### 4.1 数控雕刻技术参数优化

通过单因素实验与正交实验，针对木材（胡桃木）、亚克力（PMMA）、金属（黄铜）三种常用材质，优化刀具、切削、路径参数[11,12]，结果见表3。

##### 4.1.1 刀具参数优化

刀具类型选择遵循“纹样特征匹配”原则：

曲线流畅的植物纹样选用球头刀（圆角半径0.1-1.5mm），确保表面平滑；棱角分明的几何纹样选用平头刀（刃口角度90°），确保边缘锐利；深浮雕纹样选用V型刀（角度30°-60°），确保深度加工到位。刀具直径与纹样细节尺寸匹配：细节尺寸 $\leq 1\text{mm}$ 选用 $\phi 0.5\text{-}1\text{mm}$ 刀具，细节尺寸1-5mm选用 $\phi 1\text{-}3\text{mm}$ 刀具。

表 3.不同材质数控雕刻参数优化结果

材质	刀具参数	切削参数
胡桃木 (硬度 650N)	球头刀， $\phi 1\text{-}3\text{mm}$ , 高速 钢材质	主轴转速 12000-18000rpm, 进给速 度 800-1500mm/min, 切 削深度 0.2-0.5mm
亚克力 (硬度 250N)	平头刀， $\phi 0.5\text{-}2\text{mm}$ , 硬 质合金材质	主轴转速 18000-24000rpm, 进给速 度 500-1000mm/min, 切 削深度 0.1-0.3mm
黄铜 (硬 度 850N)	V型刀 (角度 30°), $\phi 2\text{-}6\text{mm}$ , 高速 钢材质	主轴转速 8000-12000rpm, 进给速 度 300-800mm/min, 切削 深度 0.3-1.0mm

##### 4.1.2 切削参数优化

主轴转速与刀具直径负相关： $\phi 0.5\text{mm}$ 刀具转速24000rpm， $\phi 6\text{mm}$ 刀具转速8000rpm，避免刀具震颤；进给速度与材质硬度负相关：黄铜进给速度300mm/min，亚克力进给速度1000mm/min，确保切削平稳；切削深度采用“分层切削”策略：粗加工深度0.5-1mm，精加工深度0.1-0.2mm，减少材料变形。

##### 4.1.3 加工路径优化

路径类型根据纹样形态选择：浮雕纹样（高度差 $\geq 1\text{mm}$ ）选用等高线路路径，每层切削深度0.1-0.2mm，确保层次感；平面纹样（高度差 $< 1\text{mm}$ ）选用平行线路路径，路径方向与纹样线条方向一致（偏差 $\leq 10^\circ$ ），减少刀痕；复杂纹样采用“粗加工-半精加工-精加工”三道路径：粗加工去除70%-80%余量，半精加工去除15%-25%余量，精加工确保细节精度。

#### 4.2 工艺流程标准化

构建“五阶段”标准化流程，确保传统纹样数字化再现质量稳定，流程如下：

##### 4.2.1 数字化建模与数据准备

①数据采集：根据纹样类型选择三维扫描、高清摄影或数字绘制技术，获取原始数据；②参数化建模：提取轮廓、结构、纹理、艺术特征参数，建立数字模型；③数据优化：进行点云滤波、图像增强、矢量化处理，修复模型缺

陷；④格式转换：将模型转换为 STL（用于立体雕刻）或 DXF（用于平面雕刻）格式，导入数控雕刻软件。

#### 4.2.2 工艺参数设定

①材料选择：根据应用场景选择材质，装饰摆件选用胡桃木，文创产品选用亚克力，高端工艺品选用黄铜；②刀具配置：按表 3 选择刀具类型、直径与材质；③切削参数设定：输入主轴转速、进给速度、切削深度；④路径规划：设计加工路径类型、间距与切入切出策略。

#### 4.2.3 加工准备与设备调试

①材料固定：采用夹具（如木工夹、真空吸盘）固定材料，确保加工过程无位移（位移偏差 $\leq 0.05\text{mm}$ ）；②坐标系建立：以材料左下角为原点，建立工件坐标系，坐标偏差 $\leq 0.01\text{mm}$ ；③刀具检测：测量刀具长度（误差 $\leq 0.01\text{mm}$ ）与半径（误差 $\leq 0.005\text{mm}$ ），设置补偿参数；④设备调试：空运行 1 次，检查各轴运动精度（定位误差 $\leq 0.02\text{mm}$ ）与主轴旋转状态。

#### 4.2.4 分步加工与质量控制

①粗加工：使用大直径刀具（ $\phi 3\text{-}6\text{mm}$ ）去除余量，加工时间占比 60%-70%，每 30min 检查一次加工深度；②半精加工：使用中等直径刀具（ $\phi 1\text{-}3\text{mm}$ ）优化形态，加工时间占比 20%-30%，检查表面平整度（偏差 $\leq 0.1\text{mm}$ ）；③精加工：使用小直径刀具（ $\phi 0.5\text{-}1\text{mm}$ ）还原细节，加工时间占比 10%-20%，实时监控刀痕（刀痕间距 $\leq 0.05\text{mm}$ ）。

#### 4.2.5 后处理与质量评价

①表面处理：木材采用砂纸（400-800 目）打磨，亚克力采用抛光膏（氧化铬抛光膏）抛光，金属采用拉丝布（1200 目）拉丝；②质量检测：用三维扫描仪（精度 0.01mm）检测形态精度，用分光光度计检测色彩偏差（ $\Delta E \leq 2.0$ ）；③艺术评价：邀请 3 名传统工艺专家（从事纹样研究 $\geq 10$  年）评分，艺术表现力达标分数 $\geq 85$  分（满分 100 分）；④数据归档：记录工艺参数、检测结果与评价分数，存入数据库。

### 5.结语

本研究通过“采集-分类-建模-加工”全流程技术创新，解决了传统纹样数字化的核心问题，主要成果如下：

1.建立高精度采集体系，三维扫描精度达 $0.05\text{mm}$ ，平面纹样色彩偏差 $\Delta E \leq 1.5$ ，实现纹样细节与色彩的精准还原；

2.构建多维度分类体系，涵盖起源、题材、载体、造型四层维度，为纹样资源管理提供统一标准；

3.提出四维参数化建模方法，实现纹样的可控编辑与重复利用；

4.优化数控雕刻参数并形成标准化流程，表面粗糙度  $R_a \leq 1.5 \mu\text{m}$ ，艺术表现力评分 $\geq 85$  分。

后续研究可进一步拓展纹样类型（如少数民族服饰纹样），探索 AI 技术在参数化建模中的应用，实现传统纹样的智能化创新设计，推动传统工艺与现代产业深度融合。

### 参考文献

- [1]常贤龙, 赵常军.基于数控技术的机械金属零件精密加工工艺优化设计[J].现代制造技术与装备, 2025, 61 (09) : 149-151.
- [2]叶标.机械制造自动化在汽车零部件精密加工中的应用[J].汽车电器, 2025, (09) : 143-145.
- [3]王柏文.多轴联动技术在异形零件精密加工中的应用分析[J].中国战略新兴产业, 2025, (26) : 91-93.
- [4]巩海超.精密薄板零件的高效加工方案[J].金属加工(冷加工), 2025, (09) : 44-46.
- [5]刘凤磊.现代机械设计制造工艺与精密加工工艺技术分析[J].机电产品开发与创新, 2025, 38 (04) : 186-188.
- [6]李超.现代机械制造工艺及精密加工技术应用研究[J].中国高新科技, 2025, (14) : 89-91.
- [7]郭涛, 肖鹏.数字智能化背景下难加工材料零件精密加工与特种加工工艺优化研究[J].南方农机, 2025, 56 (10) : 116-119.
- [8]王艳凤.数控技术在高效精密机械加工中的应用与优化[J].模具制造, 2025, 25 (04) : 152-154.
- [9]张朝俊, 钟佩璇, 邓文君.精密加工中有机单层脆化的切削性能研究[J].工具技术, 2025, 59 (03) : 20-25.
- [10]刘炜.精密加工中表面粗糙度对零件疲劳强度的影响分析[J].中国机械, 2025, (08) : 58-61.
- [11]张超群, 杨嘉.农机复杂件精密模型数控加工和成型技术分析[J].南方农机, 2025, 56 (01) : 134-137.
- [12]刘香军.精雕与液压工艺新产品研究[J].冶金管理, 2020, (03) : 240-242.