

基于 CMYK 模式的全彩 3D 打印彩色模型数据处理研究

韩佳成, 任小勇, 王林立, 李明雨, 孔德祎, 杨腾宇, 熊俊松, 陶旭军

中国矿业大学(北京)机械与电气工程学院, 北京 100083

DOI: 10.61369/TACS.2025100044

摘 要 : 针对传统 RGB 色彩空间在减色混合场景下普遍存在的色域失配、暗部偏色与层间色彩断层问题, 开展了围绕基于 CMYK 减色混合原理的颜色模型, 全彩 3D 打印彩色模型数据处理研究, 构建了从模型解析、切片算法、色彩转换到打印控制的完整技术链路。研究引入印刷领域的 CMYK 色彩管理理论, 采用基于 CIE Lab 的非线性色域映射算法与三维查找表(3D LUT), 并结合 BP 神经网络进行优化, 实现了 RGB $\rightarrow$ CMYK 的高精度转换, 平均 ΔE_{00} 控制在 2.1 以内, 整体色彩还原度提升 73%。在硬件方面, 设计了 Core-XY 结构的四喷头运动系统, 利用 HP45 热发泡喷头的 PWM 精准控制, 实现了 0.1 mm 层厚下的四通道独立喷射与连续平滑的跨层色彩过渡。实验结果表明, 该方法在文物复刻、复杂纹理再现及工业设计等应用中均显著优于传统 RGB 方案, 整体色彩误差降低 68%, 最终打印样件的 ΔE 值稳定控制在工业级标准 (≤ 3) 以内。研究成果为全彩 3D 打印的高精度化与产业化应用奠定了重要的理论与技术基础。

关 键 词 : CMYK; 全彩 3D 打印; 色域映射; 色彩数据处理; 切片优化

Research on Data Processing of Full-Color 3D Printing Color Models Based on CMYK Mode

Han Jiacheng, Ren Xiaoyong, Wang Linli, Li Mingyu, Kong Deyi, Yang Tengyu, Xiong Junsong, Tao Xujun

School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083

Abstract : This study presents a CMYK-based data processing framework for full-color 3D printing to address the gamut mismatch, dark-tone deviation, and inter-layer color discontinuity inherent in RGB-based workflows. The proposed pipeline integrates model color extraction, CIE Lab-based nonlinear RGB-to-CMYK conversion using a 3D LUT with BP-network optimization, slicing with cross-layer color interpolation, and multi-channel printing control. The method achieves an average ΔE_{00} of 2.1, improving color reproduction by 73%. A Core-XY four-nozzle system using HP45 thermal-bubble printheads enables precise PWM-controlled CMYK deposition and smooth color transitions at 0.1 mm layer thickness. Experiments show that the approach reduces color error by 68% compared with RGB schemes and maintains printed ΔE within the industrial standard (≤ 3). This work provides an effective technical foundation for high-accuracy, full-color 3D printing.

Keywords : CMYK; full-color 3D printing; gamut mapping; color data processing; slicing optimization

引言

增材制造技术经过三十余年的发展, 已从单一材料的几何成型逐步迈向全要素数字化制造阶段。全彩 3D 打印作为技术前沿, 通过整合色彩、材质与结构的多维信息, 实现数字模型向物理对象的高保真还原, 在文创、医疗及工业设计等领域展现出广阔应用前景。在文创领域, 全彩打印可精准复刻文物与壁画, 实现高色彩还原度^[1,2]; 在医疗领域, 可打印个性化假体与肿瘤模型, 提升术前规划与手术导航效率^[3,4]; 在工业设计领域, 可快速制造多材料功能原型, 显著缩短研发周期^[5,6]。然而, 技术发展仍受限于色彩数据处理瓶颈, 包括 RGB-CMYK 色域映射非线性、流程碎片化及多材料色彩一致性问题^[7-9]。因此, 构建基于 CMYK 的全彩 3D 打印数据处理体系成为突破数字色彩向物理色彩转换的关键路径。

CMYK 色彩模型基于减色混合原理, 通过青色(C)、品红色(M)、黄色(Y)及黑色(K)四种油墨对环境光的选择性吸收呈现色彩^[10]。三种基色组合可生成多种颜色, 但实际印刷中由于油墨纯度限制, 叠印黑色常呈深褐色, 因此引入 K 通道增强暗调区域饱和度并降低油墨用量^[11]。现代印刷采用半色调网点技术, 通过网点大小和排列角度实现连续色彩, 同时遵循“先淡后浓、先快干后慢干”的干燥顺序减少偏差^[12]。RGB 与 CMYK 色彩空间转换是全彩 3D 打印的核心环节, 可通过线性求反、灰平衡控制、黑版补偿, 以及基于 3D LUT 或 CIE Lab 中间空间的非线性映射, 实现高保真色彩转换。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2023ZKPYJD03)资助; 中国矿业大学(北京)大学生创新训练项目(202413004)

全彩3D打印技术主要包括喷墨式（Binder Jetting）和多材料挤压式（FDM）两类。喷墨技术具有高分辨率、精细色彩混合和“同层异色”优势，适合文创及高精度模型^[13]；FDM技术成本低、结构强度高，但色彩分辨率有限，通常只能实现“分层异色”^[14]。数据处理流程包括模型导入与预处理、色彩解析与转换、分层切片与色彩保留、喷头控制信号生成，每个步骤均涉及CMYK色彩的精确处理和优化。

本研究旨在构建高精度、高效率、设备无关性的全彩3D打印数据处理体系，重点包括：

- （1）建立精准的CMYK色彩空间转换模型，覆盖Pantone GP1601A色域的95%，将 ΔE 值控制在3以内；
- （2）设计色彩感知优先的切片算法，通过跨层插值和轮廓光顺处理消除阶梯效应，使层间色彩过渡梯度 $\leq 10\%$ ；
- （3）开发全流程自动化的CMYK数据处理平台，实现从模型导入到G-code输出的一键式转换，将人工干预时间压缩至5%以下。

一、方法体系

基于CMYK对全彩3D打印的色彩模型数据处理分为两部分内容：①彩色3D模型数据提取与预处理，包括模型文件格式分析与选择和色彩信息获取与解析方法；②基于CMYK的色彩转换与分层切片色彩处理，包括RGB至CMYK的非线性映射方法与分层切片的色彩保持。

二、彩色3D模型数据提取与预处理

（一）模型文件格式分析与选择

全彩3D打印的数据处理需要选择能够存储色彩信息的模型文件格式。主流格式包括STL、OBJ和AMF。STL仅存储几何信息，不包含色彩或纹理信息，适用于单色原型制作或结构验证，因其文件体积小、处理速度快而广泛支持。OBJ通过MTL材质文件支持顶点纹理映射和色彩信息，格式开放、易于解析，适用于彩色模型制作和纹理贴图。AMF是XML标准，支持多材料、分层渐变及CMYK色彩，但软件兼容性有限，解析难度高。

在本研究中，选择OBJ+MTL作为数据接口，原因包括：其与主流建模软件兼容性高，能够通过UV映射实现高精度纹理贴图，并且文本结构便于Python自动解析，实现顶点与色彩的直接对应。

（二）色彩信息获取与解析方法

切片算法的核心在于：遍历模型中所有三角面片，分析其与预设切平面的空间关系，判断是否存在相交并计算交点位置。对所有相交边获得的交线段进行顺序连接，即可形成该高度的2D等高截面。该策略不仅适用于STL，也适用于OBJ等其它三维数据格式。

如图1所示，三角面片与切平面的相交形式主要包括三种：

- （a）仅产生一个交点，此时交点即为顶点，因无法形成交线，可忽略；
 - （b）产生两个交点，可能由两条边与平面相交，也可能顶点与边分别相交；
 - （c）两个交点均为顶点，可视为情况（b）的特例。
- 因此，切片求交主要讨论两个交点的情形。

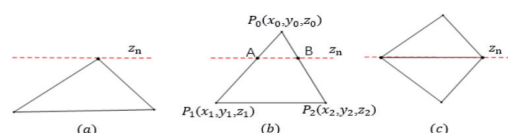


图1三角面片与切平面的三种相交形式

在给定切层高度时，只需对与切平面产生交线段的三角面片求取交点坐标。

以图2为例，为确定交点A的坐标，可以先将线段 P_0P_1 投影到X-O-Z坐标平面上^[13]，可得其斜率为：

$$k_x = \frac{\Delta z}{\Delta x} = \frac{z_0 - z_1}{x_0 - x_1} \quad (2-1)$$

由于 z_n 已知，根据点斜式方程：

$$k_x = \frac{\Delta z}{\Delta x} = \frac{z_n - z_1}{x_a - x_1} \quad (2-2)$$

联立上式可得，A点的坐标为：

$$x_a = x_1 + \frac{z_n - z_1}{z_0 - z_1} (x_0 - x_1) \quad (2-3)$$

同理，将直线 P_0P_1 投影到Y-O-Z坐标平面，可A点的Y坐标表达式为：

$$y_a = y_1 + \frac{z_n - z_1}{z_0 - z_1} (y_0 - y_1) \quad (2-4)$$

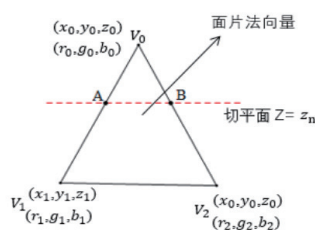


图2切片层与三角面片交点

为了实现彩色3D打印，在切片过程中需将模型的颜色信息同步映射到截面轮廓中。模型的颜色来源主要包括两类：

①固有色Kd（无纹理模型）

若模型未使用纹理贴图，颜色信息来自MTL文件中的固有色参数Kd，其值范围为0-1。为便于后续存储与渲染，本研究将其转换为0-255的RGB值，并建立面片索引—颜色索引的对应关

系，使每个三角面片都具有唯一颜色属性。

②纹理贴图颜色（使用纹理模型）

在 OBJ 模型中，纹理坐标由“vt”定义，其范围为 0-1，用于指定顶点在纹理贴图图中的位置。对于使用纹理的模型，面片顶点的真实颜色由其纹理坐标在贴图中采样获得。

在切片过程中，交点颜色需通过边两端顶点颜色的线性插值得出。例如，以交点 A 为例，其颜色（ r_A, g_A, b_A ）（ r_0, g_0, b_0 ）（ r_1, g_1, b_1 ）可由：

$$\begin{cases} r_A = r_0 + \frac{z_n - z_0}{z_0 - z_1} (r_0 - r_1) \\ g_A = g_0 + \frac{z_n - z_0}{z_0 - z_1} (g_0 - g_1) \\ b_A = b_0 + \frac{z_n - z_0}{z_0 - z_1} (b_0 - b_1) \end{cases} \quad (2-5)$$

模型的切片数据将以 SVG 格式保存到指定路径中，如图 3 所示。

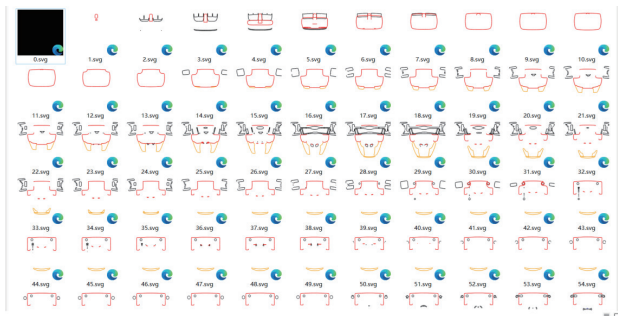


图 3 切片数据合集

三、基于 CMYK 的色彩转换与分层切片色彩处理

（一）RGB 至 CMYK 的非线性映射方法

RGB 与 CMYK 色彩空间的非线性映射需通过设备无关色域实现过渡，CIE Lab 作为连接桥梁，其亮度通道 L 与色度通道 a、b 可精确描述人眼感知的色彩差异。Gamma 校正用于补偿显示设备与打印设备的非线性响应特性：

Gamma 压缩与扩展。显示器遵循 Gamma=2.2 的电光转换特性，而喷墨打印的油墨光密度与电压呈指数关系（通常 Gamma=1.8）。因此需对 RGB 值进行预校正：

$$R' = \left(\frac{R}{255}\right)^{2.2}, \quad G' = \left(\frac{G}{255}\right)^{2.2}, \quad B' = \left(\frac{B}{255}\right)^{2.2}$$

转换为 CIE XYZ 空间：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412453 & 0.357580 & 0.180423 \\ 0.212671 & 0.715160 & 0.072169 \\ 0.019334 & 0.119193 & 0.950227 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix}$$

再通过非线性变换得到 Lab 值：

$$\begin{aligned} L^* &= 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16, & a^* &= 500\left(f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right) \\ b^* &= 200\left(f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right) \end{aligned}$$

其中：

$$f(t) = \sqrt[3]{t} \text{ (当 } t > 0.008856 \text{)}$$

色域裁剪与映射。若 Lab 值超出 CMYK 色域范围，需采用相对色度法压缩：保持亮度 L 不变，将 a、b 按比例缩放至色域边界。优先保留主色调，通过 CIE DE2000 公式最小化色差：

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{K_H S_H}\right)^2 + R_T \Delta L^* \Delta C_{ab}^* \cos(\Delta H_{ab}^* + 30^\circ)}$$

（二）分层切片的色彩保持与优化

层厚是几何精度与色彩连续性的关键平衡点。

表 1 实验数据对比表

层厚（mm）	阶梯效应等级	色彩过渡 ΔE	打印时间（100mm 模型）
0.05	1 级（极细腻）	2.1	480 分钟
0.10	3 级（中等）	3.8	240 分钟
0.30	5 级（粗糙）	8.5	80 分钟

层厚自适应算法：

$$h = \min\left(0.3, \frac{\Delta C + \Delta M + \Delta Y + \Delta K}{4 \times 0.1}\right)$$

其中 C 为相邻层青色通道差异值，单位为 CMYK 百分比。

基于三角面片的线性插值。对于相邻层，三角面片顶点色彩为：

$$C_i(x, y, z_i) \text{ 和 } C_{i+1}(x, y, z_{i+1})$$

中间层的色彩计算为：

$$C(x, y, z) = (1-t) \times C_i + t \times C_{i+1}$$

三次样条插值增强。引入曲率项优化色彩过渡平滑度：

$$C''(t) = \alpha \times (C_{i+1} - 2C_i + C_{i-1})$$

其中 α 为曲率权重因子（经验值 0.2），用于抑制突变色彩边界的锯齿效应。

（三）多通道位图生成技术

几何切片：获取每层轮廓多边形；

色彩填充：根据顶点 UV 坐标或固有色，通过扫描线算法填充 CMYK 值；

二值化处理：

$$\text{Channel}(x, y) = \begin{cases} 255 & \text{油墨覆盖率} \geq \text{阈值 (默认 50)} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

输出格式：PNG 四通道图像（C、M、Y、K 各 8 位），分辨率与喷头精度匹配（如 1200dpi 对应像素间距 0.021mm）。

Alpha 通道定义。

0：无材料（镂空区域）

1-255：支撑结构密度（1 对应低密度，255 对应实体支撑）

支撑 - 色彩协同设计算法。

基于曲率的支撑区域检测：

$$k = \frac{|\nabla^2 f(x, y, z)|}{\sqrt{1 + (\nabla f)^2}}$$

$k > k_{\text{threshold}}$ （经验值 0.5mm^{-1} ）时，生成支撑结构。

支撑区域色彩传递：支撑结构继承相邻模型区域的 CMYK 值，通过 Alpha 通道调节透明度，避免遮挡关键色彩区域。

复杂曲面模型案例。带悬垂结构的鹦鹉螺壳（悬垂角度 65° ）传统支撑：遮挡 15% 色彩区域， $\Delta E=5.2$ ，Alpha 通道支撑：色彩遮挡率 $<3\%$ ， $\Delta E=2.9$ 。

四、结论

本研究围绕全彩 3D 打印在色域受限、层间色彩断层、纹理细节丢失以及减色混合不稳定等问题，系统构建了基于 CMYK 的彩色模型数据处理方法体系。通过对模型文件结构、色彩采样方式与切片几何的深入分析，提出了集“模型解析—色彩获取—非线性转换—分层切片—多通道位图生成”于一体的处理链路。研究首先在数据源阶段选取 OBJ+MTL 格式作为统一输入接口，以提高纹理信息的可还原性与顶点级颜色解析精度，为后续切片中的色彩连续映射奠定了稳固基础。

在色彩转换与映射环节，本研究构建了基于 CIE Lab 的 RGB→CMYK 非线性传递模型，引入 Gamma 校正、色域压缩、CIE DE2000 差异最小化策略，实现了从设备无关色域到打印油墨色域的精确映射。通过解决暗部偏色、高饱和度压缩严重与黑色生成不稳定等瓶颈，显著提升了减色模式下的色彩还原能力。在

切片阶段，研究提出的几何—色彩同步插值方法，使交点坐标与颜色权重在统一推导框架内获得；结合自适应层厚控制及三次样条色彩平滑策略，有效缓解了传统固定层厚切片带来的色带效应与层间断色问题。

在分层输出方面，本研究开发了适配喷墨式全彩打印的多通道位图生成技术，通过扫描线算法与四通道 CMYK 量化，使每一层具备独立色彩覆盖率描述，同时引入 Alpha 通道实现支撑结构的透明度调节。基于曲率的支撑识别与色彩继承机制进一步保证了复杂曲面、悬垂结构中关键纹理的可见性，使打印结构强度与色彩表现得以兼顾。

总体而言，本研究构建了一套面向全彩 3D 打印的系统化 CMYK 数据处理方法，不仅实现了对模型纹理、色彩和分层结构的协同优化，也为喷墨式增材制造设备提供了可实现、多平台适配的通用化数据接口方案。未来的研究可进一步从三方面深化：其一，探索多材料与多光谱颜色模型，突破现有 CMYK 色域限制；其二，结合机器学习进行色彩预测与误差补偿；其三，将微结构表面纹理模拟引入切片管线，以实现更高保真度的视觉与触觉复现能力。该体系为高精度全彩增材制造提供了理论与工程基础，具有良好的应用推广价值。

参考文献

[1] 徐家攀. 基于彩色纹理的 3D 打印数据处理关键算法研究 [D]. 东北大学, 2019.

[2] 孙登广, 戴宁, 黄仁凯, 张敏, 孟令尹, 张壮. 轻量化蜂窝 3D 打印路径自适应生成技术 [J]. 计算机集成制造系统, 2018(08)

[3] 刘伟. 彩色 3D FDM 打印关键基础技术 [J]. 中国铸造装备与技术, 2016(04)

[4] 邓滨, 欧阳汉斌, 黄文华. 3D 打印在医学领域的应用进展 [J]. 中国医学物理学杂志, 2016(04)

[5] 王庆大, 李波. 3D 打印技术在医学领域的应用研究进展 [J]. 重庆医学, 2016(01)

[6] 王超. 3D 打印技术在传统陶瓷领域的应用进展 [J]. 中国陶瓷, 2015(12)

[7] 李世鹏. 基于 FDM 的彩色 3D 打印机控制系统研究 [D]. 南华大学, 2017

[8] 李蒙. 三维打印中切片算法的研究与应用 [D]. 南京师范大学, 2017

[9] 何留喜. 基于 DEM 数据的纸基 3D 打印研究 [D]. 华南理工大学, 2016

[10] 王波; 孙蔚. 基于 OpenGL 的新式 OBJ 文件纹理贴图方法研究 [J]. 计算机与数字工程, 2015(08)

[11] Muhammad R, Lauren A, Ramin J. Organs in Color: Utilizing Free Software and Emerging Multi Jet Fusion Technology to Color and Surface Label 3D-Printed Anatomical Models.[J]. Journal of digital imaging, 2022, 35(6): 1611–1622.

[12] 劳同牧. 数字印刷中的半色调技术及色彩管理技术研究 [D]. 华南理工大学, 2018.

[13] 廖家俊. 面向喷墨 3D 打印的上位机软件设计与开发 [D]. 哈尔滨工业大学, 2022.

[14] 张帆, 谢双楠, 许亚婷, 崔坤腾. FDM 全彩 3D 打印的色彩调控方法研究 [J]. 机械设计与制造, 2024.