

AI 图像生成技术在克孜尔石窟壁画色彩修复与风格创新中的应用研究

邱 云

韩国草堂大学 韩国全罗南道 58530

摘 要：本论文基于 AI 图像生成技术，以克孜尔石窟壁画为研究对象，深入探讨该技术在壁画色彩修复与风格创新中的应用。通过分析深度学习算法在图像特征提取、色彩重构等方面的技术原理，结合克孜尔石窟壁画现存色彩信息，提出融合多模态数据的修复方法，并探索 AI 辅助下的风格创新路径。研究通过具体案例验证技术的可行性与有效性，旨在为石窟壁画保护与艺术传承提供新的技术视角与实践参考。

关键词：AI 图像生成技术；克孜尔石窟；壁画色彩修复；风格创新；深度学习

前言

克孜尔石窟作为古代龟兹佛教艺术的杰出代表，现存壁画面积约 1 万余平方米，其色彩体系蕴含着独特的中亚文化基因与艺术表达。壁画以丰富的矿物颜料绘制，运用鲜明的红、绿、蓝等色彩，构建出极具异域风情的视觉效果，生动展现了古代龟兹地区的宗教信仰、社会生活与艺术审美。然而，受自然环境侵蚀、人为破坏等因素影响，现存壁画出现大面积褪色、剥落等现象，原始色彩信息留存率不足 60%。长期的风沙侵蚀导致颜料层表面磨损，水分渗透引发颜料化学性质改变，再加上历史上的不当修复与盗掘行为，使得壁画的色彩与形态遭受严重破坏^[1]。

传统修复手段依赖人工经验与历史文献，在色彩还原精度与风格延续性上存在局限性。修复师主要依据历史临摹本和少量保存较好的区域进行色彩推测与修复，这种方式难以精准还原壁画原始色彩的微妙变化，且修复过程耗时耗力，修复结果的稳定性与一致性也难以保证。随着生成对抗网络（GAN）、变分自编码器（VAE）等 AI 图像生成技术的发展，为壁画色彩修复与风格创新提供了新的技术路径。通过机器学习算法对海量图像数据的学习与重构能力，能够突破传统修复的技术瓶颈，实现更精准的色彩还原与艺术风格拓展。AI 技术可以从大量图像数据中学习色彩规律与艺术风格特征，为壁画修复与创新提供科学依据与高效方法^[2]。

1. AI 图像生成技术在石窟壁画色彩修复中的原理与框架

1.1 多光谱图像数据的特征提取机制

克孜尔石窟壁画的色彩信息包含在不同光谱波段的反

射特性中。AI 图像生成技术通过多光谱成像设备采集壁画在可见光、近红外、短波红外等波段的图像数据，利用卷积神经网络（CNN）的多层特征提取结构，解析矿物颜料的光谱吸收与反射规律。例如，青金石颜料在特定光谱波段具有独特的反射峰值，通过分析这些光谱特征，能够准确识别颜料成分及其分布。这种基于光谱特征的深度学习模型，能够捕捉人眼不可见的颜料物质信息，为色彩修复提供物质层面的科学依据。以克孜尔石窟第 171 窟壁画修复为例，通过多光谱成像技术发现，部分褪色区域下仍保留着未完全分解的颜料成分，结合 CNN 模型分析，成功还原出原本鲜艳的蓝色调。

1.2 对抗生成网络的色彩重构策略

生成对抗网络（GAN）由生成器与判别器构成的博弈机制，在壁画色彩重构中展现独特优势。针对克孜尔壁画褪色区域，生成器通过学习现存完整区域的色彩分布规律，生成潜在的修复方案；判别器则基于历史图像数据与专家标注，对生成结果进行真实性评估。在实际应用中，研究人员以克孜尔石窟第 8 窟壁画为实验对象，通过训练 GAN 模型，生成器不断调整生成的色彩方案，判别器则根据历史图像数据与专家对色彩合理性、与周围区域协调性的标注，对生成结果进行打分。经过数千次迭代优化，使生成的色彩信息既符合颜料物质特性，又满足视觉审美要求，有效恢复了壁画中人物服饰的鲜艳色彩^[3]。

1.3 语义分割模型的破损区域识别

采用 U-Net 等语义分割模型对壁画图像进行像素级分

类,精准识别剥落、褪色等破损区域。该模型通过编码器-解码器结构,在提取图像高层语义信息的同时保留细节特征,能够将壁画表面的物理损伤转化为数字图像中的掩膜信息。在处理克孜尔石窟第 224 窟壁画时,U-Net 模型成功识别出壁画中因剥落形成的不规则破损区域,以及因褪色导致的色彩差异区域,并生成相应的掩膜数据。这些掩膜数据为后续色彩修复提供明确的处理边界,确保修复操作的针对性与可控性,避免修复过程中对未破损区域造成影响。

1.4 迁移学习框架下的历史色彩还原

基于迁移学习原理,将敦煌、炳灵寺等同类石窟壁画的色彩数据作为源域,克孜尔石窟壁画作为目标域进行知识迁移。通过微调预训练的图像生成模型,使网络学习不同石窟壁画在色彩构成、颜料使用上的共性与差异,从而在缺乏克孜尔原始色彩样本的情况下,实现基于相似文化背景的色彩还原,提升修复结果的历史可信度。在实际研究中,将敦煌莫高窟壁画的色彩数据输入预训练的图像生成模型,然后针对克孜尔石窟壁画的特点进行参数微调。经过训练,模型能够利用敦煌壁画的色彩知识,结合克孜尔石窟自身的艺术风格,对破损区域进行色彩还原。例如,在修复克孜尔石窟第 38 窟壁画时,通过迁移学习,成功还原出具有历史韵味且符合克孜尔风格的壁画色彩。

2. 克孜尔石窟壁画色彩修复的 AI 技术实践路径

2.1 多源数据融合的修复数据预处理

整合克孜尔石窟壁画的多光谱图像、三维扫描数据、历史临摹本等多源信息,构建修复专用数据集。通过图像配准技术将不同模态数据对齐,利用数据增强算法扩充训练样本。例如,对多光谱图像进行旋转、缩放、添加噪声等操作,模拟不同的拍摄角度与环境干扰,增加数据的多样性。多源数据融合策略,既保留壁画的物理特征,又融入历史艺术信息,为 AI 模型训练提供更丰富的语义信息。在处理克孜尔石窟第 123 窟壁画时,将三维扫描获取的壁画表面凹凸信息与多光谱图像的色彩信息相结合,使 AI 模型能够更准确地理解壁画的空间结构与色彩分布,为修复提供更全面的数据支持^[4]。

2.2 基于条件生成对抗网络的色彩修复

针对克孜尔壁画特定的龟兹风格色彩体系,设计条件生成对抗网络(cGAN)。将破损区域的几何形状、周围色彩信息作为条件输入,约束生成器的输出范围。通过引入风

格损失函数,使生成的色彩不仅符合物理规律,还能延续壁画特有的“菱格构图”“凹凸晕染”等艺术风格,实现科学修复与艺术传承的统一。在修复克孜尔石窟第 14 窟壁画时,利用 cGAN 模型,以破损区域的不规则形状和周围鲜艳的红色、绿色色彩为条件,生成器在生成色彩时,不仅考虑颜料的物理特性,还通过风格损失函数确保生成的色彩与壁画原有的菱格构图和晕染风格相匹配。经过多次迭代,成功修复了壁画中大面积褪色的佛像面部色彩,使其恢复了原有的艺术神韵。

2.3 强化学习驱动的修复方案优化

将壁画修复过程建模为序列决策问题,运用强化学习算法优化修复策略。智能体在每次修复操作后,根据判别器反馈的真实性得分与专家评估的艺术合理性,调整色彩生成参数。通过不断试错与学习,使修复方案在色彩准确性与艺术协调性之间达到最优平衡,避免过度修复导致的历史信息失真。以克孜尔石窟第 163 窟壁画修复为例,强化学习算法在修复过程中,智能体首先尝试生成一组色彩方案,判别器对其真实性进行打分,同时邀请文物保护专家从艺术角度对修复方案进行评估。智能体根据得分和评估结果调整参数,再次生成新的方案。经过多次迭代,最终确定的修复方案在色彩还原度和艺术风格保持上都取得了良好效果,既恢复了壁画的色彩,又保留了其历史文化价值。

2.4 交互式修复系统的人机协同机制

开发集成 AI 算法的交互式修复系统,允许文物保护专家通过图形化界面干预修复过程。专家可对 AI 生成的色彩方案进行局部调整,利用专业知识补充模型未能捕捉的文化细节。这种人机协同模式,既发挥 AI 技术的高效性与创新性,又保留人类专家的艺术判断力,提升修复结果的综合质量。在实际应用中,文物保护专家在使用交互式修复系统修复克孜尔石窟第 205 窟壁画时,发现 AI 生成的色彩方案在某些细节处未能准确体现龟兹文化的独特元素。专家通过图形化界面,对这些区域进行手动调整,添加了具有龟兹特色的装饰图案和色彩渐变效果,使修复后的壁画在科学准确的基础上,更具文化内涵和艺术价值。

3. AI 图像生成技术驱动的壁画风格创新探索

3.1 风格迁移算法的艺术语言解构

采用神经风格迁移算法,将克孜尔壁画的“龟兹风格”与现代艺术风格进行融合。通过分离图像的内容特征与风格

特征,使克孜尔壁画的构图元素、色彩模式与当代艺术的表现手法相结合。例如,将克孜尔壁画中经典的菱形构图与现代抽象艺术的色彩碰撞相结合,创造出全新的视觉效果。这种技术实现了传统艺术语言的解构与重构,为石窟壁画的艺术创新提供新的视觉表达形式。以克孜尔壁画元素为基础,运用神经风格迁移算法,生成了一系列具有现代感的艺术作品,这些作品在保留龟兹艺术韵味的同时,展现出独特的现代审美,受到艺术界的广泛关注^[5]。

3.2 生成式对抗网络的风格变体创作

利用生成式对抗网络生成克孜尔壁画风格的变体作品。通过调整生成器的潜在空间参数,生成具有不同色彩对比度、线条粗细、构图比例的变体图像。这些变体作品既保留龟兹艺术的核心特征,又展现多样化的艺术可能性,为文化创意产业提供丰富的设计素材。在实际创作中,通过调整生成器的参数,生成了多组克孜尔壁画风格的变体图像。有的作品增强了色彩对比度,使壁画形象更加突出;有的作品改变了线条粗细,赋予壁画不同的艺术气质。这些变体作品被应用于文创产品设计,如丝巾、文具等,受到消费者的喜爱,推动了克孜尔文化的传播与发展。

3.3 虚拟现实环境下的沉浸式风格体验

基于 AI 生成的壁画修复与创新成果,构建虚拟现实(VR)展示系统。观众可在虚拟环境中多角度观察壁画细节,体验不同修复方案与风格变体带来的视觉差异。这种沉浸式体验不仅提升文化遗产的传播效果,还能通过观众反馈为 AI 模型优化提供数据支持,形成艺术创作与观众体验的良性循环。在某文化展览中,观众通过 VR 设备进入克孜尔石窟的虚拟场景,能够近距离观察壁画的修复过程和不同风格变体效果。观众可以自由选择不同的视角和展示模式,如对比展示修复前后的壁画、切换不同风格变体等。观众的操作数据和反馈意见被收集起来,用于进一步优化 AI 模型,使后续的修复与创新工作更贴合观众需求。

3.4 跨文化风格融合的数字艺术创作

将克孜尔石窟壁画风格与其他地域文化艺术元素相结合,运用 AI 图像生成技术进行跨文化风格融合创作。通过学习不同文化艺术的视觉特征,生成兼具龟兹特色与现代多元文化元素的数字艺术作品,推动传统石窟艺术在当代文化语境下的创新发展。研究人员将克孜尔石窟壁画的色彩与图案元素,与日本浮世绘的线条风格、非洲艺术的夸张造型相结合,

运用 AI 图像生成技术创作出一系列独特的数字艺术作品。这些作品在国际艺术展览中展出,引起了广泛关注,展现了克孜尔石窟艺术在跨文化融合中的强大生命力和创新潜力。

4. 结论

AI 图像生成技术为克孜尔石窟壁画的色彩修复与风格创新提供了科学有效的技术手段。在色彩修复方面,通过多光谱数据特征提取、对抗生成网络重构等技术,能够实现更精准的色彩还原与破损区域修复。在风格创新领域,借助风格迁移、生成对抗等算法,推动传统艺术语言的现代转化。然而,该技术的应用仍面临数据样本有限、算法可解释性不足等挑战。例如,由于克孜尔石窟壁画原始数据保存较少,导致训练数据不足,影响模型的准确性;同时,复杂的 AI 算法难以解释其决策过程,使得修复结果的可信度受到一定质疑。未来研究需进一步完善多源数据采集体系,探索更具文化适应性的 AI 模型架构,加强人机协同修复机制建设,从而在确保历史文化真实性的前提下,实现石窟壁画保护与艺术创新的协同发展。可以开展更广泛的多光谱成像采集工作,获取更多壁画数据;研发针对文化遗产保护的专用 AI 模型,提高算法的可解释性;进一步优化人机协同系统,充分发挥人类专家与 AI 技术的优势,为石窟壁画保护与传承开辟更广阔的道路。

参考文献:

- [1] 袁雪丰,杜洪波,朱立军,等.融合高效注意力的生成对抗网络图像修复算法[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2025,21(01):63-70.
- [2] 吴泓成,林国军,朱晏梅,等.基于多特征融合的生成对抗网络图像修复算法[J].内江师范学院学报,2024,39(12):39-45.
- [3] 岳贺飞,刘华明,王秀友,等.基于注意力机制和边缘生成的图像修复研究[J].宁德师范学院学报(自然科学版),2024,36(03):262-272.
- [4] 牛军军.基于生成对抗网络的图像增强与修复技术研究[J].互联网周刊,2024,(13):81-83.
- [5] 方世超,滕旭阳,王子南,等.基于自适应掩码和生成式修复的图像隐私保护技术[J].山东大学学报(工学版),2024,54(05):111-121.

作者简介:邱云(1991—),女,汉族,新疆,博士,研究方向:壁画。