

参数化喀斯特溶洞穴形态设计方法 ——以桂林地区溶洞形态为例

田文达, 覃千航

广西师范大学, 广西 桂林 541006

DOI:10.61369/HASS.2026010047

摘 要 : 喀斯特形态是水对可溶性岩石进行侵蚀作用而形成的一系列地下或地表形态的总称。喀斯特地貌是大自然的杰作, 具有很高的美学、科学和自然遗产价值。桂林喀斯特地貌洞穴岩溶是世界自然遗产之一, 其科学意义和美学价值突出。然而, 由于桂林文旅的传统发展模式, 当地的喀斯特地貌洞穴并未完全被挖掘出其美学价值和文化价值。因此, 本文以中国桂林喀斯特地貌为研究对象, 提出了基于洞穴景观特征和计算机参数化算法的喀斯特洞穴地貌新设计方法。分析了不同景观造景原因和洞穴景观特征, 总结了洞穴景观形态设计的要素, 通过结合不同算法插件生成形态的“grasshopper平台”, 实现了具有洞穴景观特征的形态生成, 并分析了实际案例, 并探讨了其在交互式设计中的潜在作用。

关 键 词 : 桂林溶洞; 数字设计; 参数化设计; 交互设计

Parametric Design Method for Karst Cave Morphology: A Case Study of Cave Morphology in Guilin Area

Tian Wenda, Qin Qianhang

Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541006

Abstract : Karst morphology refers to a series of underground or surface landforms formed by the erosion of soluble rocks by water. Karst landforms are masterpieces of nature, possessing high aesthetic, scientific, and natural heritage value. The karst caves in Guilin are recognized as a World Natural Heritage site, renowned for their outstanding scientific significance and aesthetic value. However, due to the traditional development model of cultural tourism in Guilin, the aesthetic and cultural values of local karst caves have not been fully explored. Therefore, this paper takes the karst landforms in Guilin, China, as the research object and proposes a new design method for karst cave landforms based on cave landscape characteristics and computer parametric algorithms. It analyzes the causes of different landscape formations and the characteristics of cave landscapes, summarizes the elements of cave landscape morphology design, and achieves the generation of forms with cave landscape characteristics through the "Grasshopper platform" that combines different algorithmic plugins. It also analyzes practical cases and explores their potential role in interactive design.

Keywords : Guilin karst caves; digital design; parametric design; interactive design

引言

喀斯特地貌是一种独特的地质地貌, 它指的是由流水侵蚀可溶性岩石而形成的地下或地表的一系列形态。喀斯特溶洞是由地下水的溶解和侵蚀作用在碳酸盐岩石中形成的洞穴和次生碳酸盐沉积物, 形成了诸如石笋、钟乳石、石柱、石幔等景观。中国南方喀斯特世界自然遗产地中的桂林洞穴具有非凡的科学、文化、美学和旅游价值。尤其是中国桂林的喀斯特地区, 形成了大量的大型洞穴系统以及丰富的地下洞穴堆积物, 其喀斯特地貌特征和地貌多样性在世界范围内都是独一无二的。因此, 桂林喀斯特地貌洞穴应当充分地彰显其美学价值、文化价值与科学价值, 全面展现世界遗产品牌应有的内涵, 并树立世界遗产地的真实品牌形象^[1]。

桂林拥有丰富的文化旅游资源, 尤其是喀斯特地貌资源, 但其自身的发展也存在很多问题。桂林溶洞景区吸引力不足, 核心竞争力欠缺; 当前桂林溶洞旅游产品存在文化价值单一、未能充分展现桂林溶洞世界自然遗产特色优势、品牌建设缺乏鲜明特色等问题^[2]。因此, 本文提出一种基于仿生算法的桂林洞穴形态数字化设计方法, 该方法可将喀斯特地貌特征与洞穴地形作为仿生算法的输入要素。不同喀斯特特征将生成不同路径, 设计师可根据路径选择下一步骤, 从而设计出特定的数字化形态。它增加了桂林石窟数字研究、展示和旅游的多样性, 可以更好地加强自然遗产保护与社会经济发展活动之间的联系, 加强世界遗产教育和知识共享, 希望这一方法能为设计师提供不同的需求、不同的选择和参考。

项目信息: 2023年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目: 桂林山水文化体感交互体验设计研究(项目编号: 2023KY0031)。

一、桂林溶洞形态参数化设计方法

（一）参数化生成形态方法构建

喀斯特溶洞本身就是一种自然形成的结构，它是由数百年甚至上千年间薄层中饱和的碳酸钙物质的溶解、沉积或侵蚀作用而形成，也是中国南方喀斯特地貌的组成部分之一。Grasshopper平台及其众多的算法插件为算法模拟洞穴自然生成提供了可行性。介于传统建模方式构建洞穴数字模型是一个复杂过程，因此我们选择通过Grasshopper平台，通过结合不同算法模块，简化构建过程，并使形态可调可控，逐步完成洞穴形态的参数化模型生成。

传统的造型思路，通常基于几何原理分析形态结构与成型原理，在构建参数化形态时，使用力学模拟等方法更为高效，因此，在构建参数化生成溶洞形态方法时，笔者团队使用“分析原理——模拟规律——生成形态”的思路作为指导。

（二）溶洞形态特征与成因分析

溶洞是独立的地下空间，具有一定直径的地下管道或由可溶性岩石的溶蚀作用（可能有少量侵蚀）形成的长连续的流水空间，在地下水的溶蚀和搬运作用下，形成了世界上色彩最丰富、溶蚀和沉积形态最丰富的洞穴资源。这些喀斯特岩体主要包括石笋、石钟乳、石柱、石幔、侧石坝等。^[3]钟乳石生长在洞穴的地面，形似竹笋从地里长出来，是由石灰岩缝隙渗入洞内的水，在渗入过程中与二氧化碳和石灰岩发生反应，形成水滴，在地面沉淀出碳酸钙晶体，然后钟乳石通过不断沉积碳酸钙而生长而成。钟乳石、石笋与石笋的生长方向相反，倒挂在洞顶，形态如乳状，是碳酸钙基质沿洞顶裂隙和孔隙向下生长的沉积物。起初呈现为轻微隆起，随着碳酸钙水的持续补充，钟乳石逐渐增大并延长。石柱向下生长，石笋向上生长，两者结合形成石笋柱，由于石笋和石钟乳的沉积速率较慢，石笋柱的形成需要很长时间。石幔是沿洞顶、洞壁裂隙或平缓裂隙的出水堆积物中，由一层薄薄的碳酸钙水溶液形成的沉积物，从地表以波状、裙状、多褶或叠层形式沉积下来。侧石坝在水流沿特定坡度下泄时，或洞穴滴水沿洞壁沉积形成堰塞体的过程中，会形成阶梯状的碳酸钙侧石。莲花石是一种由滴水、池水和流水协同沉积形成的碳酸钙沉积物，通常呈圆形或泥泞状^[4]。岩溶洞穴熔岩形态的形成环境主要为强地下水动力作用下的溶蚀作用和弱地下水动力作用下的化学溶蚀作用^[5]。根据不同形态洞穴熔岩的水动力成因效应，对洞穴熔岩的形态特征及水动力成因效应进行了分析（图1），该分析结果作为桂林洞穴熔岩形态参数化实现方式的参考标准。

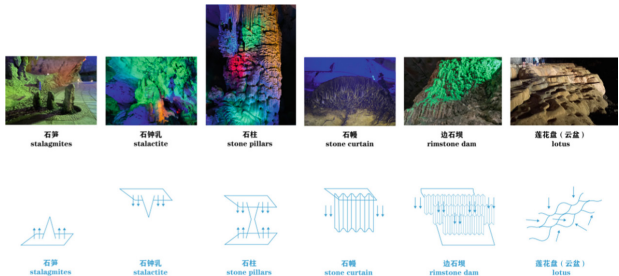


图1. 桂林溶洞喀斯特形态特征与成因分析

（三）多种溶洞形态的参数化构建

根据不同形态的成形原理，可以借助不同的算法工具来进行组合，以模拟具体成形过程中的受力与形变情况，进而构建出具备相应地形特征的形态。

通过对钟乳石形态特征的分析发现，靠近洞壁的石钟乳部分可概括为不同圆环的融合（图2），钟乳石在生长过程中会逐渐从底部向上尖化，其高度与底部直径的比例较大。由于生成过程中受空间、材质、湿度等因素影响，钟乳石的生长位置具有一定的随机性，我们通过Grasshopper中的随机点函数定位钟乳石的中心点，以该随机点为中心绘制圆形区域。随后借助MetaBall插件将这些参数转换为不同密度的能量线，并赋予Z轴方向的矢量。通过调整形状、高度、层数以及顶底面尺寸，即可快速获得具有钟乳石形态特征的等高线。算法的介入使得生成所需的钟乳石造型变得轻松高效（图3）。

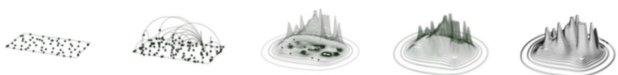


图2 使用随机点算法生成石笋形态的过程

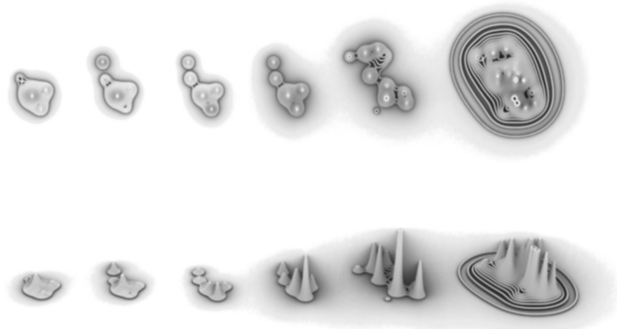


图3 算法生成的石笋形态

与石笋不同，莲花盘在形成过程中逐渐变宽。莲花盘具有更宽的底盘，其顶部与底部面积的比例更接近，且高度小于石笋。因此，我们可以通过调整顶部面积、高度和形态参数，采用与石笋相同的理念，生产出具有多种莲花特征的形态（图4）。



图4 算法生成莲花盘形态

在探索钟乳石形态生成方法时，我们采用模拟电场技术实现其形态构建。首先，基于线点法构建电场：通过使用Grasshopper软件中的电场与力插件，以平面为参考面建立电力厂模型。通过添加干涉线，可获取电场中不同位置点的受力关系（图5）。随后利用曲线干涉线构建钟乳石形态。通过观察干涉线对电场中点的影响，发现干涉线附近区域的受力变化最大，因此对这些点施加沿Z轴负方向的位移即可确定空间坐标。通过控制干涉线的形状和电场强度，最终获得可构建钟乳石形态的空间点分布。最

后,利用空间中的点构建网格,以获得一组具有钟乳石特征的形状。

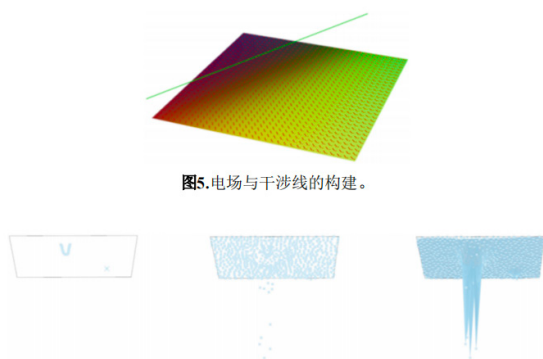


图5.电场与干涉线的构建。

通过对石柱形态的观察发现,洞穴空间内的石柱形态具有支撑性特征。DESO算法通过模拟作用力生成初始石柱形态:首先构建基于蝗虫模型的基本力模型,采用 Ameba 插件计算模型受力并进行结构优化以获得初始模型;随后对初始模型进行对称性处理和表面优化;最后将模型导入 Zbrush 进行表皮纹理处理,最终获得石柱形态的完整模型,如图6。

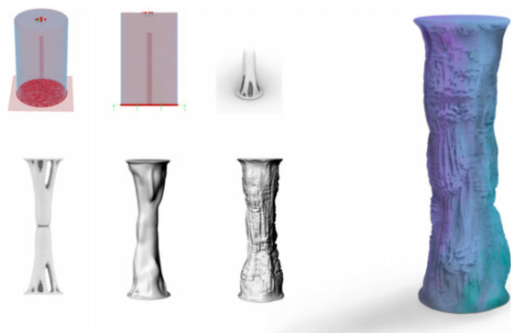


图6 石柱生成过程及生成石柱的形态

二、桂林洞穴熔岩参数形态的应用场景及交互

(一) 旅游产品开发

旅游产品开发是连接自然遗产与公众认知的重要纽带,也是实现世界自然遗产价值转化的关键路径^[6]。针对桂林喀斯特洞穴传统旅游产品对地质特征与美学价值呈现不足的问题,本研究创新性地将参数化设计技术融入旅游纪念品开发,通过数字化手段重构洞穴景观的形态与内涵,为游客提供兼具科学性、艺术性与个性化的体验载体。

参数化算法是旅游产品开发的核 心技术支撑。通过 Grasshopper 平台对桂林喀斯特洞穴的地质数据进行深度解析,本研究精准还原了岩层的溶蚀痕迹、纹理细节与形态特征——从钟乳石的垂坠曲线到石笋的层叠结构,从溶洞的曲面轮廓到地下河的侵蚀痕迹,算法生成的数字模型不仅保留了自然景观的科学真实性,更通过形态优化实现了艺术化表达。这种“数据-形态”的转化,使得原本静态的洞穴景观转化为可灵活组合的数字元素库,为产品开发提供了丰富的形态基础。图7中展示的尖塔组合、曲面造型、柱状结构等多样形态,正是参数化技术对喀斯特地貌

特征的抽象与再创造,既体现了自然形态的多样性,也满足了纪念品的审美需求。

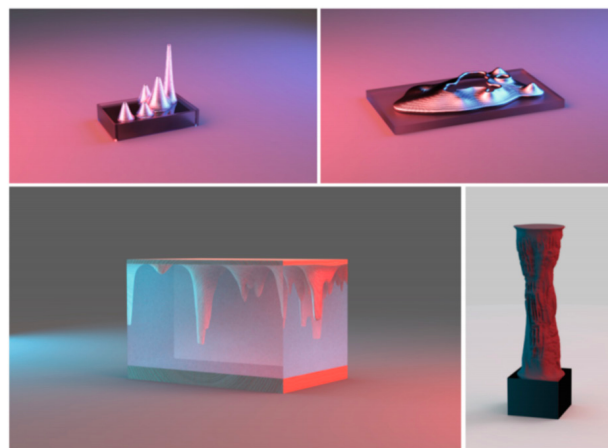


图7 喀斯特洞穴地貌形态文创产品设计

旅游产品的核心价值在于满足游客的个性化需求。本研究通过参数化技术构建了“形态-材质-功能”的定制化体系:游客可根据个人偏好,自由组合不同景观元素(如选择尖塔状、曲面状或柱状形态),搭配金属、树脂、陶瓷等不同材质(金属材质展现现代科技感,树脂材质保留自然纹理,陶瓷材质体现文化厚重感),甚至添加个性化元素(如刻字、图案)。这种“一人一设计”的定制流程,让纪念品从“标准化商品”转变为“个人与洞穴的独特联结”,增强了游客的情感认同。例如,游客可选择模拟特定洞穴(如芦笛岩的钟乳石群)的形态,搭配透明树脂材质,制作成桌面摆件,既保留了洞穴的神秘感,又成为家庭空间的装饰亮点。

旅游产品开发的 价值不仅在于经济收益,更在于对自然遗产价值的传播。从经济层面看,定制化产品满足市场对个性化、高品质纪念品的需求,提升了产品附加值,为当地文旅产业开辟了新的经济增长点;从文化层面看,纪念品通过形态与材质传递了喀斯特地貌的科学知识(如形成过程、地质特征)、美学价值(自然形态的艺术美感)与文化价值(世界自然遗产的地位);从传播层面看,游客将定制纪念品带回家后,成为桂林喀斯特文化的“移动传播者”——通过社交分享(如朋友圈、家庭展示),让更多人了解洞穴的科学文化内涵,扩大了遗产的公众认知范围。

综上所述,参数化技术驱动的旅游产品开发,实现了桂林喀斯特洞穴价值的有效转化:既通过定制化设计满足了游客的个性化需求,又通过纪念品传递了自然遗产的科学、文化与美学价值,为世界自然遗产的可持续利用提供了“技术-体验-传播”一体化的创新路径。

(二) 互动家庭护理产品

根据洞穴形态生成的产物,可基于游客在洞穴中体验的深刻视听感受,设计出天然疗愈家居产品。与传感器相连的照明装置可置于卧室或特定区域,用户通过触控或语音指令即可触发产品变化,例如洞穴中的朦胧灯光,同时伴随滴水声与流水声,帮助

使用者放松身心、获得宁静。

（三）沉浸式场景构建

在数字化时代背景下，沉浸式体验已成为文化传播与公众教育的重要载体^[7]。针对桂林喀斯特洞穴的数字化展示需求，本研究创新性地构建了多层次的沉浸式场景体系，通过精心设计的交互空间与体验机制，打破传统游览模式的局限，为公众提供全方位、多感官的洞穴文化认知途径。

沉浸式场景构建以洞穴景观特征为设计核心，通过 Grasshopper 参数化平台生成的洞穴形态为基础，结合现代交互设计理念，创造出身临其境的虚拟体验空间。设计过程中，我们深入分析了桂林喀斯特洞穴的地质特征与美学特质，提取了钟乳石、石笋、石柱等典型地貌元素，并通过算法优化实现了自然景观的数字化重构。这种基于真实地质数据的场景生成方法，确保了虚拟场景的科学性与艺术性的统一。

在交互体验层面，本研究创新性地设计了多种参与式体验模式。线上导览系统支持游客通过手机平台和家用 VR 设备，实时感受桂林石窟的魅力。在算法生成的洞穴景观中，游客可以参与虚拟游戏，如在地形复杂的洞穴环境中进行集体“捉迷藏”活动，这种游戏化体验不仅增强了参与感，还能在娱乐过程中潜移默化地传递洞穴文化知识。

沉浸式场景构建的最终目标是实现文化传播与公众教育的双重价值^[8]。系统生成的游戏过程视频记录功能，既满足了游客的成就感需求，又为社交分享提供了优质内容。这种设计不仅提升了游客的体验满意度，更通过社交传播扩大了桂林喀斯特地貌文化的传播范围，为自然遗产的文化价值挖掘与公众认知提升开辟了新路径。

通过沉浸式场景构建，我们成功将静态的洞穴景观转化为动态的交互体验空间，实现了从“观看”到“参与”的转变，为自然遗产的数字化保护与传播提供了创新解决方案。

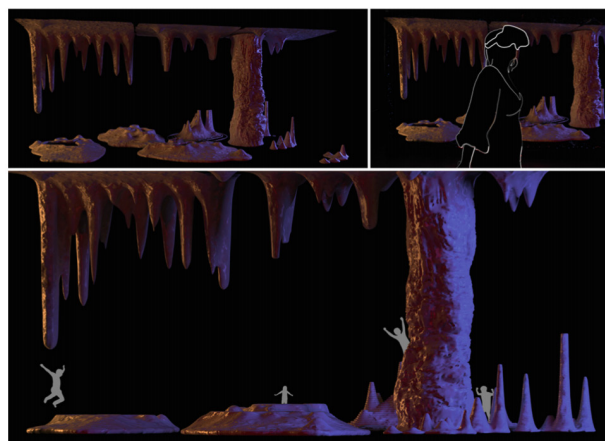


图8 洞穴生态景观疗愈虚拟现实场景

三、结论

本文针对桂林喀斯特洞穴目前因地理限制、单一旅游开发模式及传播局限而导致公众认知不足的问题，深入探讨并实践了一种基于参数化设计的创新重塑方法。

研究表明，通过 Grasshopper 平台结合计算机参数化算法，能够精准提取并重构桂林喀斯特洞穴的景观形态特征。这种方法不仅成功将复杂的自然岩溶形态转化为可操作的数字化设计语言，更有效解决了传统文旅模式下洞穴美学价值与科学价值挖掘不充分的难题。通过将数字化成果转化为可实施方案，并融入交互设计理念，本文打破了自然遗产地观赏的时空壁垒，为公众提供了深入理解喀斯特地貌科学内涵与美学特质的新视角。

综上所述，数字技术与参数化设计的引入，不仅弥补了现有开发模式在文化价值传播上的短板，更契合世界遗产地保护与认知自然文化的核心宗旨。本研究为桂林喀斯特洞穴的学术价值提升与传播影响力拓展提供了切实可行的路径，同时也为自然遗产地的数字化保护与展示提供了具有参考价值的范式。

参考文献

- [1] 许春晓, 黄兰萍. 中国南方喀斯特自然遗产地旅游形象价值结构——基于旅游社交网站评论的研究 [J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2020, 43(04): 26–34.
- [2] 王维康, 孙以栋, 俞强. 文旅融合视域下世界自然遗产保护与利用研究——以浙江省衢州市江郎山为例 [J]. 建筑与文化, 2020, (08): 112–113.
- [3] 李文莉, 韦延兰, 史文强. 桂林山水何以甲天下 [J]. 中国矿业, 2021, 30(S1): 486–488.
- [4] 李文莉, 韦延兰, 史文强. 走进神秘而美丽的溶洞 [M]// 中国矿业: 卷 30. 中国地质科学院岩溶地质研究所 / 自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004, 2021: 228–230.
- [5] 何宇彬, 邹成杰. 关于喀斯特洞穴发育深度问题 [J]. 中国岩溶, 1997(02): 72–80.
- [6] 李枝初, 梁福根. “世遗”背景下拓展桂林喀斯特科普游的必要性 [J]. 桂林师范高等专科学校学报, 2016, 30(5): 4.
- [7] 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(02): 121–142.
- [8] 刘晓茜, 李曦明, 何人可. 基于交互虚拟现实技术视域下非遗文化数字化传承与创新 [J]. 艺术工作, 2022(01): 93–98.