

# 基于仿生算法的亲生物设计生成探索

## ——以仿生多孔空间为例

陈宁<sup>1</sup>, 刘宇波<sup>1,2\*</sup>, 邓巧明<sup>1</sup>

1. 华南理工大学建筑学院, 广州 510641

liuyubo@scut.edu.cn

2. 亚热带建筑与城市科学全国重点实验室, 广州 510641

### 摘要:

随着城市化进程的推进, 环境问题日益严峻, 亲生物设计逐渐受到关注。亲生物设计旨在通过直接引入自然、类比自然形态或参与式自然体验将自然元素与形式特征融入建筑空间。传统的亲生物设计方法在空间形式的有机转化和造型的抽象提炼等方面存在优化空间。

本文提出了一种结合仿生算法与性能模拟优化的亲生物设计流程, 通过模拟自然界风化过程生成多孔空间, 并利用性能模拟进行形态筛选和优化, 最终构建出既具自然特征又符合现代建造需求的空间, 为亲生物设计提供灵感, 也为计算性设计探索应用场景。

**关键词:** 亲生物设计; 仿生算法; 性能模拟; 生成设计; 多孔空间

**Abstract:** With the advancement of urbanization, environmental problems have become increasingly severe, and biophilic design has gradually attracted attention. Biophilic design aims to integrate natural elements and formal features into architectural spaces through the direct introduction of nature, analogies to natural forms, or participatory natural experiences. Traditional biophilic design methods have optimization space in organic transformation of spatial forms and abstract refinement of shapes.

This article proposes a biophilic design process that combines bionic algorithms and performance simulation optimization. It generates porous spaces by simulating the natural weathering process, and uses performance simulations to screen and optimize shapes, and finally forms space that has natural characteristics and meets modern construction needs. This research provides inspiration for biophilic design and explores application scenarios for computational design.

**Keywords:** Biophilic design; Bionic algorithm; Performance simulation; Generative design; Porous space

### 引言

随着城市化进程的不断推进, 自然环境逐渐被钢铁混凝土取代, 导致生态系统退化、生物多样性减少, 以及人类与自然的关系日益紧张。这种环境变化不仅影响了动植物的生存空间, 也对人类的健康产生了负面影响, 同时快节奏的生活和工作的压力使人类的身心健康受到威胁。因此, 重建人与自然之间的联系显得尤为重要。

自然环境对人类具有疗愈作用，重建城市、建筑与自然之间的联系，不仅能有效缓解人们的压力、改善健康状况，还可以改善生态环境及动植物的生存环境，因此，亲生物设计的概念自提出起就引发很多设计师的关注。亲生物设计（Biophilic Design）通过在设计中引入自然元素，旨在提高建筑空间的舒适度，增强人类与自然的情感联系，并促进身心健康。因此，亲生物设计可以修补当代城市与自然的关系，构建出一种人与自然和谐共生的环境，为健康、绿色的人居空间环境设计提供基础论据与方向指引。

尽管传统建筑设计方法能够在一定程度上整合自然元素，但在实际应用中往往难以有效模拟自然形态，且施工复杂度较高。相比之下，仿生算法展现出在亲生物设计中的巨大潜力。通过模拟自然界的形态和过程，仿生算法可以为建筑设计提供更加创新和有效的解决方案，能够更精确地再现自然特征，同时克服传统设计的局限性。本文将探讨如何结合仿生算法优化亲生物设计，推动建筑与自然的和谐共生。

## 1 研究背景

### 1.1 亲生物设计的概念与发展概况

亲生物设计是指将人类对自然的亲和力融入建筑环境设计中，寻求人和自然和谐共生的空间设计，这一概念源于“生物亲和”理论。生物亲和指的是人类保留原始时期与自然的天然情感联系，这一情感使人产生对自然的依恋。<sup>[1]</sup>

亲生物设计的发展可分为四个时期：19世纪之前的萌芽期、19世纪起的初级应用时期、1964-2000年的理论探索时期和2000年至今科学应用时期。<sup>[2]</sup>在萌芽期，亲生物设计以装饰为主，自然元素被广泛运用于建筑与艺术中，如古希腊的植物柱头及巴比伦空中花园等；初级应用时期，亲生物设计经历了工艺与美术运动、新艺术运动和现代主义建筑初期；理论探索时期，亲生物设计的概念逐渐形成，1964年美国社会心理学家埃里希·弗洛姆首次提出亲生物（biophilia）理论的概念后，1984年美国生物学家爱德华·威尔逊在《Biophilia》中进一步推广亲生物理论并探讨人类被自然环境吸引的进化和心理基础，随后耶鲁大学社会生态学教授史蒂芬·凯勒特（Stephen R. Kellert）进一步探讨亲生物假说并提出亲生物设计等概念。科学应用时期始于2006年美国罗德岛会议，亲生物设计在建筑与城市环境中得到广泛实践，相关理论与实践日益丰富。<sup>[3]</sup>

### 1.2 亲生物设计的策略与案例分析

亲生物设计策略主要分为三类：直接引入空间中的自然（Nature in the Space）、间接类比自然形态（Natural Analogs），以及通过设计创造参与式的自然的空间（Nature of the Space）。<sup>[4]</sup>

直接引入自然指在建筑中融入绿色植物、水景等自然元素，改善生态质量并促进居住者身心健康，如意大利的垂直森林项目通过垂直绿化引入自然，同时不同季节带来立面的景观变化。间接类比自然形态通过模仿自然界的形态与肌理，营造接近自然的视觉感受并唤起与真实的自然相似的感受，同时提升建筑功能性，如日本长崎的礼堂通过几何分形设计和木材的运用呈现类似树木的建筑结构。自然的空間则是通过特定的空间组织，结合光影、声音、气味等多感官刺激的参与式体验，激发人类对自然环境的亲近感和人类进化过程中对自然环境的本能反应，如开阔的展望空间、围合的避难空间、神秘空间等，如美国洛杉矶艺术博物馆通过视错觉使巨石在壕沟中呈现悬浮的空间效果，进而带来具有神秘感和危险性的空间体验。亲生物设计通过这三种策略，将自然元素融入建筑与空间设计中，增强人类与自然的情感联系。



图1 不同亲生物设计案例对比(图片来源:《Biophilic design in architecture and its contributions to health, well-being, and sustainability: A critical review》)

亲生物设计策略可应用于环境、使用者、城市、单体建筑等层面上,如在环境层面修复和创造自然环境,在使用者层面设计有助于身心理健康的亲生物空间,在城市层面创造人与自然共生的人居环境,在单体建筑层面将自然的元素或形式巧妙地引入到建筑空间中,营造舒适的室内外空间。目前,亲生物设计在办公建筑设计、校园规划与建筑设计、城市设计等不同尺度等范围开展,同时部分国外的建筑评估体系还有针对亲生物设计的定义和阐述,如美国的 WELL Building 建筑认证体系以及新加坡的 Attributes to a Sustainable Built Environment 政策文件。<sup>[5]</sup>

表1 亲生物设计的三种设计策略与 25 个特性(图片来源:作者自绘)

1. 直接体验自然	2. 间接类比自然	3. 参与式空间和场所体验
光	图像	景色与庇护所
空气	材料	有组织的复杂性
水	纹理	流动性
植物	颜色	过渡空间
动物	形状和形式	场所
风景	信息丰富度	整合部分创造整体
天气	变化、年龄和时间的痕迹	
景观	自然几何学	
火	模拟自然光和空气	
	仿生学	

### 1.3 当前亲生物设计存在的局限性及计算性设计的潜力

尽管亲生物设计在理论和实践中取得诸多进展,但传统的设计方法在实际应用中仍有局限性。首先,传统设计往往依赖设计师的直觉和经验,难以系统化地实现自然形态的模拟,最终设计效果可能过于具象或抽象。其次,亲生物设计中的有机形态和复杂结构,可能给实际施工带来困难,增加项目的成本和能耗。此外,传统设计方法在面对现代建筑性能需求时,往往难以兼顾美学与功能性,导致设计效果大打折扣。

为了克服这些局限性,基于仿生算法的亲生物设计方法展现出一定的潜力。计算性设计工具可以通过分析自然形态规律,并设定一系列生成规则模拟自然过程,快速高效地生成复杂形态,并启发设计思路。同时,还可结合环境性能模拟分析生成的形体,使设计师能够在设计的早期阶段就对生成形体的环境性能进行评估与优化,从而提高设计的可行性。通过调整生成规则中的不同参数,设计师能够根据具体设计需求筛选和细化方案,实现设计目标的优化。

## 2 基于仿生算法的亲生物设计流程与算法工具

本文探索构建基于仿生算法的亲生物设计流程，利用计算性设计工具生成丰富的模拟自然的形态，并借助性能模拟进行进一步的方案优化。本文将结合野生动物展览馆竞赛的场地和设计要  
求，构建亲生物设计流程，通过模拟自然界的多孔岩石形态，塑造适合动植物生长停留的空间，  
创造人与生物共同使用的亲生物空间，满足人们直接和间接体验自然的需求。

## 2.1 软件平台

本研究使用 Rhinoceros 软件及其可视化编程插件 Grasshopper，Grasshopper 提供 Ladybug 等组件，可以在 Rhinoceros 界面中生成和控制几何图形并通过编程实现参数化设计，本次研究使用 Ladybug 插件进行性能模拟与优化，通过集成仿生算法和性能模拟工具，本研究旨在实现从形态生成到性能优化的全流程设计。

## 2.2 基于仿生算法的设计流程构建

结合软件平台，本研究通过风蚀算法模拟自然界中岩石风化过程，生成丰富的模拟自然形态的多孔空间，结合性能模拟和体素化处理，优化生成形体。

具体设计流程构建如下：首先，明确设计目标、设计对象以及场地信息等，以本研究的设计目标为例，通过创造适合动植物生存的空间引入动植物，满足直接体验自然的设计目标；同时通过模拟天然岩石的整体丰富形态，实现间接类比自然的目标；此外在行走路径和空间感受上，塑造接近自然的空间体验、形成有组织的复杂性，实现体验自然的参与式空间和场所体验。确定设计目标后需要筛选合适的仿生算法生成初步的形态。此过程中，设计师可以通过调节算法的参数，控制形态的复杂性和有机性，确保生成的形态既符合自然的特征，又满足建筑的基本功能需求。在生成初步形态的基础上，通过性能模拟工具对设计进行优化和调整，使得最终的设计方案在环境性能指标上达到最优，最后根据具体设计要求深化完成设计。

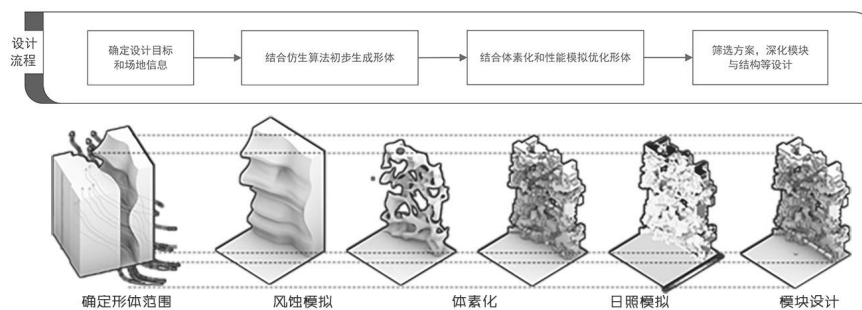


图 2 基于仿生算法的设计流程示意图（图片来源：作者自绘）

## 2.3 算法工具介绍

### 2.3.1 风蚀算法

仿生学通过学习自然形态或自然过程、总结自然规律，借助自然寻找解决问题的新方法，自然物体的组织、结构和功能原理为仿生设计提供了依据。结合前文设计目标，本研究选择自然岩石的仿生算法，算法参考论文《Porous space — biomimetic of tafoni in computational design》，风蚀算法通过总结自然风化岩石的形态和生成规律，模拟自然界中风化作用对岩石等地质体的侵蚀过程，生成具有自然形态特征的丰富形体，为后续设计和优化提供基础。<sup>[6]</sup>

对风化岩石的研究和分类始于 19 世纪，直径大于 0.5 m 的蜂窝腔被称为 tafoni。tafoni 的多孔形态可以提供良好的自然通风与日照条件，形成适合动植物生存的空间，算法通过将风化岩石的形体特征提炼为点线面空间，并结合物理和化学风化规律，实现对自然风化过程的模拟。

具体流程如下：

1. 输入待风化岩石的初始形体；
2. 输入层数  $x$ ，层数转换为点云密度参数；
3. 生成初始点云；
4. 根据点类型、线类型和面类型特征生成二维 Voronoi 控制点，这些控制点由随机数  $n$  控制随机生成；
5. 生成控制 Voronoi 多边形，分别提取表示点类型、线类型和曲面类型的多边形；
6. 对三种相应的多边形进行分割、圆整、偏移等操作；
7. 合并成封闭曲面。

风蚀算法生成的形体如下，其形体可以从几个方面满足亲生物设计的要求：首先是直接体验自然，形体通过提供植物生长和动物活动的空间，实现人们直接体验和接触自然的需要；其次是间接体验自然，整体多孔复杂形体模拟自然界中岩石丰富的几何形态，对比主观设计的多孔结构，形态更接近自然，可以实现人对自然的间接想象与体验；同时，人们在建筑行走过程中体验感受有组织的复杂性，实现人对自然参与式的空间和场所体验。

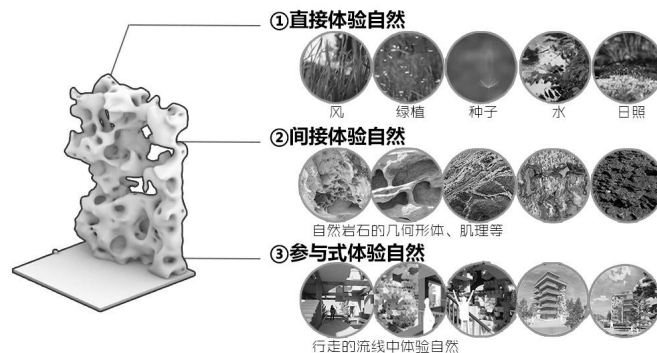


图 3 基于风蚀算法生成的形体与亲生物设计（图片来源：作者自绘）

### 2.3.2 体素化等形体参数化处理

体素化是一种将复杂形态分解为基本单元的形体处理方法，通过输入形体的外轮廓范围生成均匀点阵并保留形体内部的点，将设计后的模块单元赋予精简后的点位，可以有效简化复杂形态的分析与处理。在风蚀模拟等基础上生成复杂曲面形体后，通过体素化处理，将生成的多孔形态转化为可控的参数化模型，既能一定程度地保留多孔形体的整体空间效果和空间丰富度，又便于后续的性能模拟以及形态细节与结构控制。由于对复杂曲面形体进行模块化处理更符合当下工业化模块式生产与建造逻辑，体素化处理具有模块化生产与建造的可能性，同时后续还可以结合动植物的需求进一步设计模块单元。

### 2.3.3 性能模拟

性能模拟可以在设计阶段对生成形体和空间的环境性能进行评估与优化，确保最终的设计方案不仅具备自然形态的特征，还能在能源效率、舒适性等方面达到预期效果。本文选择 Ladybug 为

性能模拟平台，将 epw 气候数据链接给气象文件输入端，设置模拟时段、分析网格尺寸的参数，对日照时长等性能指标进行直接模拟。

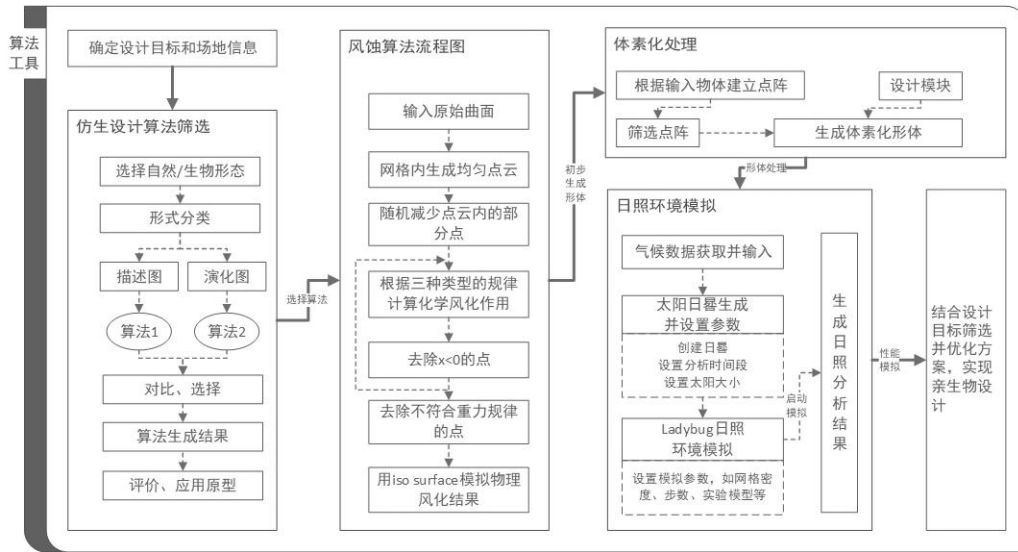


图 4 算法工具示意图（图片来源：作者自绘）

### 3 基于仿生算法的亲生物设计实验探索

#### 3.1 设计对象确定与参数设置

本节以意大利野生动物展览馆竞赛为例展开实验探索，竞赛场地位于意大利伦巴第大区的塞比诺泥炭沼泽自然保护区，要求设计展览类型的建筑，其关键在于构思一个以自然为中心的设计方案，旨在为动物提供新的庇护所、支持鸟类筑巢、帮助本地植物繁殖等，并允许游客在尊重生态系统的情况下观察野生动植物。

经过分析确定设计对象为观鸟塔，结合前文提出的设计流程与算法工具，要求观鸟塔提供动植物栖息空间的同时，空间呈现自然的形态、使游客可以直接和间接体验自然。具体参数设置选择意大利当地的气候条件和信息作为输入信息，同时结合竞赛提供的场地设定基本形体的范围。

#### 3.2 基于仿生算法的形态生成及方案筛选

在形态生成阶段，结合前期设定的形体范围以及初步的分区，借助风蚀算法塑造动植物活动区域，生成了初步的多孔空间形态，这种形态保留了自然界的有机特征，复杂多孔的造型可以为动植物的活动提供丰富的空间，满足设计需求。

具体形态生成的过程如下：首先，通过风蚀算法对设定的初始体块逐步侵蚀，快速生成多种复杂且有机的形体，经过参数调整和性能模拟，筛选符合设计目标的方案进行下一步的优化。

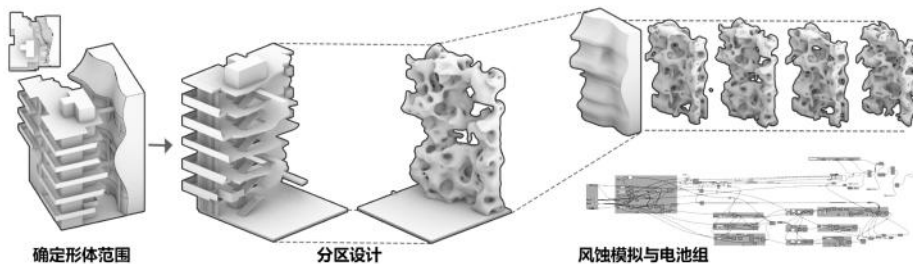

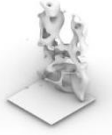






图 5 基于仿生算法的形态生成过程示意图（图片来源：作者自绘）

在算法生成的形体筛选过程中，考虑到后期种植植物并吸引鸟类等动物使用的可能性，选用日照总时数作为评价指标。为方便计算，先对生成形体进行体素化处理，具体通过均匀布置 500mm 的点阵并筛选在形体内的点，基于筛选后点的位置放置尺寸定为 500mm 的立方体模块单元，由此实现保留形体基本形式的情况下将其转化为模块单元的组合体，并计算各个单元体顶面的日照时数之和。通过调整以下三个对生成形体影响较大的参数：点密度、样本体素、构建等值面样本值，对比以下六个方案的总日照时数，选择平均值表现最佳的方案 4 作为后续优化的形体。

表 2 不同方案参数、模拟结果与效果图对比（图片来源：作者自绘）

方案	参数设置			模块单元数量	日照总时数 (平均每个单元全年小时数)	效果示意图
	点密度	样本体素	构建等值面样本值			
方案 1	26	0.9	1.2	7891	1567.37	
方案 2	26	0.8	1.2	8206	1561.77	
方案 3	23	1.0	1.4	5381	1896.37	
方案 4	23	0.8	1.5	4675	1902.54	
方案 5	23	0.8	1.2	8073	1475.83	
方案 6	23	0.9	1.2	8404	1407.94	

### 3.3 结合性能模拟的形态优化

在生成初始复杂形态后，借助体素化处理使形体更符合当下的建造逻辑，而体素化后的形体仍有很多局限，如单元堆叠造成内部空间动植物无法进入或不满足动植物生存所需的日照条件等，因此我们利用性能模拟工具对体素化后的形态进行了进一步的优化与调整。收集适宜场地相关动植物生长生活的光照要求，根据 Ladybug 模拟的模块单元表面全年日照时数的数据，以每年 365 天换算为日均时长，综合考虑动植物生存需要，将模块的分为五类：①光照条件很适宜（日均时

长 8.5-12h)、②光照条件适宜(日均时长 6-8.5h)、③光照条件一般(日均时长 4-6h)、④光照条件不适宜(日均时长 2-4h)、⑤光照条件很不适宜(日均时长小于 2h)。

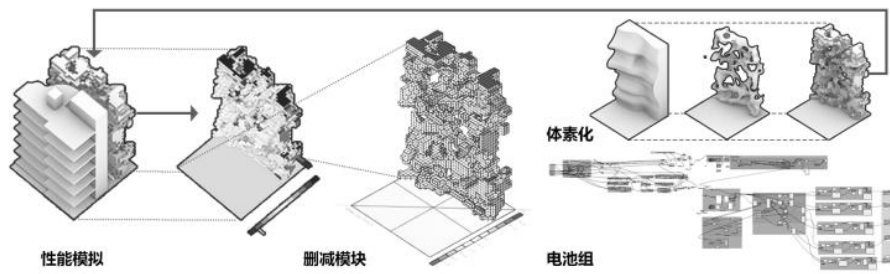
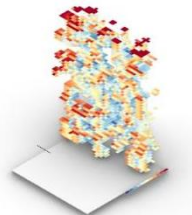
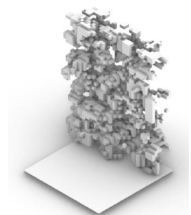


图 6 结合性能模拟的形态优化示意图(图片来源:作者自绘)

对方案 4 进行性能模拟,得到的数据如下表,有 11.19%的模块单元光照条件不适宜植物生长,对此类日照时数过低的、不符合要求的模块进行删减,另一方面根据不同动植物生长对日照时长的需求,对模块进行分类,方便进一步展开模块分类设计。最终,优化后的形体在日照时数方面达到了预期的效果,满足动植物需求。

表 3 方案 4 模拟结果与数据分析(图片来源:作者自绘)

方案 4 模拟结果 示意图	模块 单元 数量	各类模块数量与占比					删减模块后 方案效果示意图
		①很适 宜	② 适宜	③ 一般	④不 宜	⑤很 不 适宜	
	890	1130	2132	523	0		
	4675	19.04%	24.17%	45.60%	11.19%		0%

### 3.4 方案评估与最终优化

在形体生成并借助性能模拟优化后,综合考虑人与动植物需求,进一步深化模块设计和结构设计,兼顾建筑的造型、环境性能、施工可行性等因素,确定最终的设计方案。

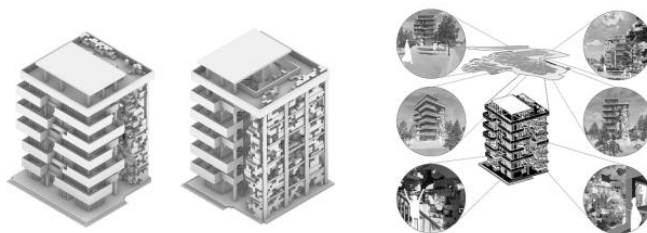


图 7 方案最终效果示意图(图片来源:作者自绘)

## 4 结论与展望

### 4.1 实践应用潜力

本文的研究验证了基于仿生算法与性能模拟相结合的设计方法在亲生物设计中的应用潜力。基于仿生算法的亲生物设计不仅能够在功能上满足现代建筑的性能要求,还能在形态上实现自然与建筑的融合,其中丰富的多孔空间满足动植物栖息需求的同时,可以满足人们对自然的直接体



验；而整体多孔复杂形体可以满足人们对自然形态与形式、纹理与几何造型等方面的联想，实现人对自然的间接体验；同时，在建筑的行走体验中感受有组织的复杂性，可以实现人对自然参与式的空间和场所体验。

仿生算法生成具有自然形态特征的形体与空间，其丰富性与多样性优于传统基于经验的设计，性能模拟工具则为设计的优化与调整提供了数据支撑与科学依据，同时体素化处理可以满足模块化生产与建造的需要，由此可见基于仿生算法的亲生物设计具有应用的潜力。

## 4.2 研究的局限与不足

尽管本研究探索了新的设计方法，但仍存在一些局限和不足。首先，仿生算法的应用需要一定的计算资源和时间，建筑性能模拟与优化也需要耗费一定的时间成本，一定程度上影响设计效率。其次，在实验中性能模拟目前只考虑了日照时长，而光照强度和日照时长均会影响植物的生长，此外还有通风性等环境因素也未纳入分析，后续研究可尝试借助多目标优化求解。此外，性能模拟是基于比较理想的条件展开，在实际设计中有更多影响因素干扰模拟结果，如周边环境、不同气候和季节、不同建筑材料等，这些因素可能对最终设计效果产生影响。最后，体素化等形体处理虽然有利于方案的模块化设计，但也导致处理后的形体与仿生算法生成的初步形体存在差别，影响人对自然的感受，且体素化可能带来比较单调的形体，后续研究可以寻求更多形体处理手法，在保留自然形态特征的同时兼顾施工的可行性。

## 4.3 未来研究展望

未来亲生物设计的研究可以从以下几个方面深入探索：首先，可以进一步优化仿生算法，选取合适的自然对象进行仿生模拟，同时提升其计算效率与稳定性，以便在更大规模的项目中应用。其次，性能模拟方面应进一步综合考虑动植物与人群使用需求并结合多目标优化进行求解，使生成空间更加舒适。再者，可以结合人工智能和机器学习技术，加快算法生成、性能模拟的流程，并提高数据的准确度。此外，还可以通过实地实验，验证基于仿生算法的设计在实际应用中的表现，为亲生物设计的发展提供更多的实践经验。

## 结语

综上，亲生物设计在应对城市化带来的环境挑战方面展现了显著潜力，亲生物设计通过将自然元素引入建筑空间，不仅可以缓解人类的生活压力，改善健康状况，还能修复生态环境，增加动植物的生存空间。本文探讨了基于仿生算法的亲生物设计方法，开辟了实现自然形态模拟的新途径，也为亲生物设计提供更多可能性。未来的研究可以在提升算法效率、结合人工智能技术、以及实践验证设计效果等方面进一步深入，以推动亲生物设计的实际应用与发展。通过不断探索与优化，亲生物设计可以实现自然与建筑更加紧密的融合，打造更加健康与和谐的空间，促进城市环境的可持续发展。

## 参考文献

- [1] Gullone E. The Biophilia Hypothesis and Life in the 21st Century: Increasing Mental Health or Increasing Pathology? [J]. Journal of Happiness Studies, 2000, 1(3):293-322. DOI:10.1023/A:1010043827986.
- [2] 张军杰, 杨锐, 王德虎, 等. 亲生物设计发展历程与建筑应用 [J]. 沈阳建筑大学学报: 社会科学版, 2021, 23(5):7.

- [3] Zhong W , Schrder T , Bekkering J .Biophilic design in architecture and its contributions to health, well-being, and sustainability: A critical review[J].Frontiers of Architectural Research, 2022, 11(1):114-141.DOI:10.1016/j.foar.2021.07.006.
- [4]席天宇,秦欢,于文洛,等.基于生物亲和理论的亲生物建筑设计——以皮克林宾乐雅酒店为例[J].建筑与文化, 2021(2):2.DOI:10.19875/j.cnki.jzywh.2021.02.028.
- [5]叶颂文,余文娟.高层高密度城市下的亲生物设计模式研究[C]//国际绿色建筑与建筑节能大会.2016.
- [6]Ye W, Chen S, Zhao X, et al. Porous space—biomimetic of tafoni in computational design[J]. Architectural Intelligence, 2022, 1(1): 18.