

基于双向渐进结构拓扑优化算法的创新设计研究

蒲阳^{1,2}, 鲍鼎文^{3,4}

(1.南京艺术学院 设计学院, 南京 210013; 2.华中师范大学 美术学院, 武汉 430079; 3.澳大利亚皇家墨尔本理工大学 建筑与城市设计学院, 墨尔本 3000; 4.南京阿米巴结构优化研究院, 南京 210031)

摘要: **目的** 在数字化设计的背景下, 探索基于结构性能化的算法找形方法, 运用双向渐进结构拓扑优化算法 (Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization, BESO) 展开创新设计实践研究。**方法** 在理解双向渐进结构拓扑优化算法的基本内涵、相关理论、历史发展和现状应用的基础上, 分析其算法生成的优势及可行性, 并以算法的组织模式与生形原理为前提, 对其进行几何划分、约束条件、优化技术、结构模拟、材料设定、迭代生形等内容协同一体的生成策略研究, 提供了多元选择的设计机会。**结果** 得到了运用双向渐进结构拓扑优化算法进行的基于初始形态设计、拓扑优化设计和后处理与制造三步骤创新设计实践结果。**结论** 此设计实践方案验证了该算法生成方法的设计应用可行性, 同时也为多领域应用该算法提供了新思路和新方向。

关键词: 双向渐进结构拓扑优化算法; 算法设计流程; 创新设计实践

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)22-0062-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.22.008

Innovative Design Based on Bi-directional Evolutionary Structural Optimization Algorithm

PU Yang^{1,2}, BAO Ding-wen^{3,4}

(1. School of Design, Nanjing University of the Arts, Nanjing 210013, China; 2. School of Fine Arts, Central China Normal University, Wuhan 430079, China; 3. School of Architecture and Urban Design, RMIT University, Melbourne 3000, Australia; 4. Nanjing Ameba Institute of Engineering Structure Optimization, Nanjing 210031, China)

ABSTRACT: In the context of digital design, the work aims to explore the algorithmic shape finding method based on structural performance, and use the Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization (BESO) algorithm to carry out innovative design practice research. Based on the understanding of the basic connotation, theory, historical development and current application of the Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization (BESO) algorithm, the advantages and feasibility of its algorithm generation were analyzed and a collaborative research was conducted on the generation strategy of geometric division, constraints, optimization techniques, structural simulation, material setting and iterative shape generation with the premise of the organization mode and shape generation principle of the algorithm, so as to provide multiple options for design opportunities and optimal results. A three-step innovative design practice based on initial morphology design, topology optimization design and post-processing and manufacturing by a Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization algorithm was obtained. This design practice scheme verifies the feasibility of the design application of this algorithm generation method, and also provides new ideas and directions for the application of this algorithm in multiple fields.

KEY WORDS: Bi-directional Evolutionary Structural Optimization algorithm; algorithm design process; innovative design practice

收稿日期: 2022-06-11

基金项目: 2021 教育部首批新文科研究与改革实践项目 (2021160036); 2022 年江苏省研究生科研创新计划项目 (KYCX22_2288); 2022 年湖北省社科基金一般项目 (后期资助项目) (HBSK2022YB526); 华中师范大学 2022 年校级教学研究项目

伴随着第四次工业革命的到来, 数字技术对全球经济、生产及生活都带来了深刻影响, 设计也面临着一次全新革命。设计开始从关注“人造物世界”转而面向“系统性世界”, 试图发掘一种全新的设计文化, 一种基于未来可持续的“社会和环境反馈”交互行为, 一方面关注人与数字技术交互下产生何种复杂形态来适应生存; 另一方面关注人们如何向真实自然学习来实现长久的可持续目标。然而, 设计师最初利用数字技术在进行设计形态找形过程中, 仅局限于对复杂造型的过度追求, 而对其真实使用合理性并未考虑周全。经过 30 年至今为止的数字技术研发、数字实践应用和数字思维构建, 如今的设计找形开始从“外形数据”到“结构数据”的逻辑转变, 关注重点从生形的复杂性和多元性转变到形体的安全性和合理性。为此, 一些结构算法也应用到生成过程中, 将设计分析与结构分析形成一个设计推动过程, 使设计结果兼具形态美观性和结构合理性。本文运用拓扑优化中较为先进的 BESO 算法生成方法来进行设计实践研究。因该算法具备模拟自然形态和性能可持续的特征, 故本次实践旨在通过该算法将数据权重代入平台进行形态找形, 在满足功能合理、行为合适、结构优化和材料适配上得到兼具美观性及合理性的优化设计结果, 试图以此来探索数字时代背景下人类在系统性世界的可持续生活方式。

1 双向渐进结构拓扑优化算法的内涵及现状

1.1 算法的内涵及发展

拓扑优化算法是一种基于计算机平台的结构受力分析方法。在原有算法仅限于创建、控制和修改二维或三维几何图形的基础上进行有效数据分析, 并在连续体结构中生成有机空隙和有效形体。目前已有的结构优化主要有三个类型: 尺寸优化是计算板材最佳厚度或桁架最佳截面; 形状优化是计算结构的最优边

界及开洞形状; 拓扑优化是在规定设计区域内生成高性能、轻量化、低耗材的最优结构设计^[1]。因此, 拓扑优化是兼具形体设计工具与性能设计工具两种特征的方法。与此同时, 拓扑优化是一种基于图解静力学理论的分析方法, 是利用图例和图解来求解力学问题的方式。德国工程师卡尔·库尔曼 (Karl Culmann) 首次在 1866 年《图解静力学》一书中提出利用图解法计算一般连续体受力, 并示范如何使用这些方法解决各种实际结构力学问题^[2]。可以说, 图解静力学是运用几何图形关系来表达结构形状与受力水平之间的关系, 是“形与力”的可视化图解关系, 可在图解中控制受力情况来改变结构几何形状, 直至达到优化效果。

当然, 性能化拓扑优化方法已发展出多种类型的形图与力图结合力学分析方法, 常见的有渐进结构优化法 (Evolutionary Structural Optimization, ESO)^[3]和双向渐进结构优化法 (BESO) (见表 1)。这两种方法的优化策略都是学习自然结构 (如骨骼、贝壳和树木) 自发进化特征, 从而获得优异结构。ESO 算法是澳大利亚皇家墨尔本理工大学谢亿民教授 (Mike Xie) 在 1993 年和 G.P.Steven 率先提出的, 他将有限元分析结果作为依据, 逐渐移除结构设计域中的低效单元, 从而使材料达到最佳分布^[4]。如一个在重力作用下的方形悬挂物体通过去除低效力单元, 最终获得一个表面应力分布均匀、近似苹果的形态 (见图 1)。这种因删除低效单元使结构自重减轻的优化方式叫应力优化^[5]。然而当结构在受力获得的变形能力, 在保证参数均衡的条件下对结构刚度影响最小来优化结构体积, 这类称为刚度优化。二者均是基于达到最佳优化结构的拓扑方法^[6]。

尽管 ESO 算法向自然学习, 却缺乏数理逻辑推导, 优化过程中仅支持删除项, 未支持增加项, 同时还存在数值不稳定现象。一是单向优化只减少单位, 如有误删问题, 无法在后续工作中对其进行添加; 二

表 1 ESO 法与 BESO 法的对比^[11]
Tab.1 Comparison of ESO and BESO^[11]

年份	名称	特征	过程
1993	渐进结构优化法 (ESO)	有限元分析, 删除低效结构单元, 保留有效结构单元, 结构结果实现最大优化, 直至最佳收敛条件	参数设定; 有限元分析; 敏感度计算; 优化规则; 收敛条件
1998	双向渐进结构优化法 (BESO)	具备删除与增添单元两种方式, 结构优化至高效实用的拓扑结构	参数设定; 拓扑关系提取; 有限元分析; 敏感度计算; 优化规则; 删除增加率更新; 收敛条件

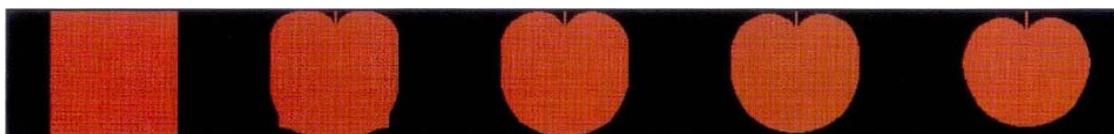


图 1 通过 ESO 算法模拟物体在自重作用下悬挂在空中的最优形态
Fig.1 Optimal shape of a simulant suspended in the air under self-weight by ESO algorithm

是棋盘格现象, 过高估计单点连接的刚度, 未能达到物理层面的最优。于是, 谢亿民教授继而在 1998 年提出 BESO 算法, 相较于 ESO 具有更好的稳定性与通用性, 单元具备可被删除与添加的属性, 一定程度上弥补了 ESO 算法的短板, 将未充分利用材料重新分配到最需要的位置上^[7]。如谢亿民教授与马克·贝瑞 (Mark Burry) 在 2005 年运用 ESO 算法对西班牙巴塞罗那圣家族大教堂进行建造研究^[8], 团队发现安东尼奥·高迪 (Antonio Gaudi) 利用绳索悬吊小球来进行倒置设计来模拟适合砌筑建筑体的受压设计, 与 ESO 或 BESO 的生成方法有很多相似之处。马克·贝瑞利用 ESO 方法研究了地震荷载对教堂受难门上柱子的影响, 并对柱子原型进行二维倾斜表面的有限元分析, 再进行三维模型的计算分析, 通过反复迭代后得到柱子的受力结果, 表现为顶端有分叉现象, 这与高迪教堂空间柱子的形态达到高度相似^[9]。

1.2 算法的现状及应用

BESO 算法已被应用于诸多领域, 例如增材制造、建筑设计和生物材料等, 它成为推动形态与结构设计协同一体化过程的新兴力量。在数字化背景及国家政策的扶持下有望促进更多产业进行生产方式转型, 达到更智能的数字化转型需求及社会创新层面的发展 (见表 2)。

首先, 在工程领域应用方面, BESO 算法最初是应用在土木工程等相关学科实践上, 主要目的是大幅度提高结构施工性能。如澳大利亚墨尔本 BKK 建筑事务所的城际高速公路步行桥结构设计。拱桥承担 4 kpa 的人行静荷载, 结合 BESO 算法后得出实体设计和壳管设计。另外, 拓扑优化计算也广泛应用于汽车工业、航空航天、机械制造等学科领域中, 如德国梅塞施密特·伯尔科·布洛姆公司的民用飞机上用于支撑客舱机身地板的支撑梁 MBB, 被誉为是连续体拓扑优化的经典案例; 其次, 在建筑领域应用方面, 拓扑优化技术常应用在建筑节点设计, 可有效提高结构效率、降低材料使用量。如日本建筑师矶崎新 (Arata Isozaki) 与结构工程师佐佐木睦朗 (Mutsuro Sasaki)

合作, 2011 年运用 BESO 算法生成卡塔尔国际会议中心入口处自由有机形态^[12]。国内同济大学袁烽教授 2015 年设计的上海 Fab-Union Space 展馆, 采用 BESO 算法对核心交通空间进行了力流传导与功能美学的有机形态找形; 最后, 在设计领域应用方面, 因拓扑优化算法自然生成的仿生形态, 能让非工程专业的设计师在创作过程中激发出更多的设计灵感。加上合理的结构优化处理, 能使复杂多元的形态得以实际建造。如英国建筑师扎哈·哈迪德 (Zaha Hadid) 2015 年设计的 Volu 壳体式用餐亭, 运用渐进结构优化法进行去除低应力单元得到合适的有机形式, 最终由工厂加工的单曲面铝板现场拼装而成^[13]。

1.3 算法的优势及可行性分析

BESO 算法生成方法是一种前沿结构优化分析及设计方法, 从上述内涵与发展中可看出, 它是具备结构性能优化与设计形态生成的两种特征, 具有以下几点优势

1) 实现设计与结构的协同一体化。BESO 算法构建了一个以有限元分析数据为结果导向, 同时面向多元形体生成的新型生成工具, 一方面提供了更多新思路的设计生成方法, 能在保证结构合理的同时具备一定自然仿生形态的美学要求, 使不具备美学基础的多领域专业人士都能得到美观极佳的效果。另一方面使设计师也具备了工程师的能力, 实现了角色的转型, 使设计更具合理且真实性。

2) 实现有效结构及节点的最佳优化。在实际工作中, 设计师往往需要反复输入或调整参数条件来达到最优结果, 而 BESO 算法在生成过程中实现数据自主优化, 既保证准确性也节约时间成本, 真正做到人力、材料、结构、建造等多方面的最优解。

3) 实现虚拟层面与实践层面的协同性。拓扑优化算法是能将复杂形态切实做到真实实际落地, 而不只存在于虚拟层面的可视化。计算机虚拟参数设置与实际设计条件的协同, 设计师虚拟层面操作与实际建造过程的协同, 虚拟层面的反复测试反馈与真实材料结构的测试协同。

表 2 BESO 算法应用部分典型案例
Tab.2 Some typical examples of BESO algorithm applications

类别	项目	概要	国别
工程领域	BKK 建筑事务所的城际高速公路步行桥结构设计	考虑人行静荷载的实体体设计; 考虑人行步道的壳体设计	澳大利亚
	梅塞施密特·伯尔科·布洛姆公司 MBB 支撑梁	支撑客舱机身地板荷载的最优结构件	德国
建筑领域	矶崎新与佐佐木睦朗的卡塔尔国际会议中心入口处	基于仿生形态生成, 以钢材与混凝土等材料数据为约束条件的生成结果	卡塔尔
	上海 Fab-Union Space 展馆	交通空间结构找形	中国
设计领域	扎哈·哈迪德的 Volu 壳体式用餐亭	最佳优化结构适配设计师特有形式语言	迈阿密

2 双向渐进结构拓扑优化算法的设计流程

2.1 算法的生成原理

BESO 算法的生成原理遵循系统性设计规划, 并提供多种维度导向的最优结构结果, 减少成本和资料浪费, 主要包括生成组织模式与优化生成原理。首先, 生成组织模式是包括数据信息、约束条件、运行方式和导向结果在内的设计规划 (见图 2)。BESO 算法以数字技术作为底层组织架构, 其技术可服务于自然语言转译、智能数据分析、可制造的物理模拟、计算机软硬件支撑条件等。并在此基础上逐步发展为满足结构形态导向、结构使用导向、结构结果导向的多种客观条件需求方式, 有效减少资料消耗和废弃率, 从而实现最终可持续目标。其次, 优化生成原理主要是基于有限元分析 (Finite Element Analysis, FEA) 原理, 利用数学近似的方法对真实物理世界的几何条件和载荷情况进行模拟, 并利用简单且相互作用的单元来表示求解域。ESO 算法将连续体结构的设计区域划分为独立单元, 并用函数值“0”和“1”来表示空单元和实单元。BESO 算法则在优化过程中将误删的单元通过灵敏度过渡技术进行恢复处理, 表现出结构编码和拓扑形状之间的关系 (见图 3)。主要生成实现过程包括设定结构优化区域的边界条件; 定义优化初始参数; 有限元分析求解并更新单元灵敏度; 对灵敏度数值按大小排序确定其单元优化阈值; 删除或添加单元且更新相关设计变量。检验是否满足体积约束结果, 是则继续, 否则返回调整; 检验是否满足收敛准则结果, 是则迭代终止, 否则返回调整 (见图 4)。

目前能实现渐进结构拓扑优化的主要常用软件

包括 Abaqus、Karamba3D 和 Ameba (见表 3)。Abaqus 是专业有限元分析软件, 具备全面的单元类型和结构计算能力、优化能力, 可实现多维可视化功能。缺点是操作过于繁琐。Karamba3D 是基于 Rhino 和 Grasshopper 的有限元分析插件, 具备一定的拓扑优化功能, 可结合 Grasshopper 自带遗传算法堆结构进行优化。虽然增加了与设计师的互动性, 但对渐进结

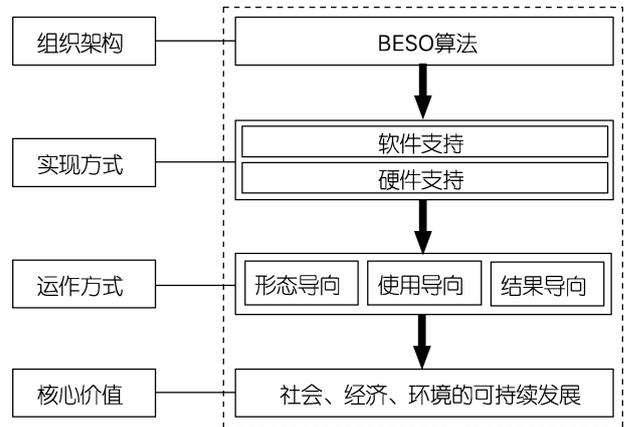


图 2 BESO 算法的生成组织模式
Fig.2 Generative organization model of BESO

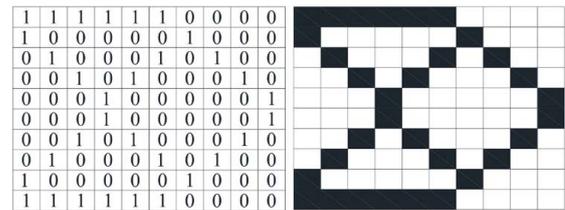


图 3 左：结构单元编码，右：设计区域拓扑形状
Fig.3 Left: structural cell coding and right: design area topology shape

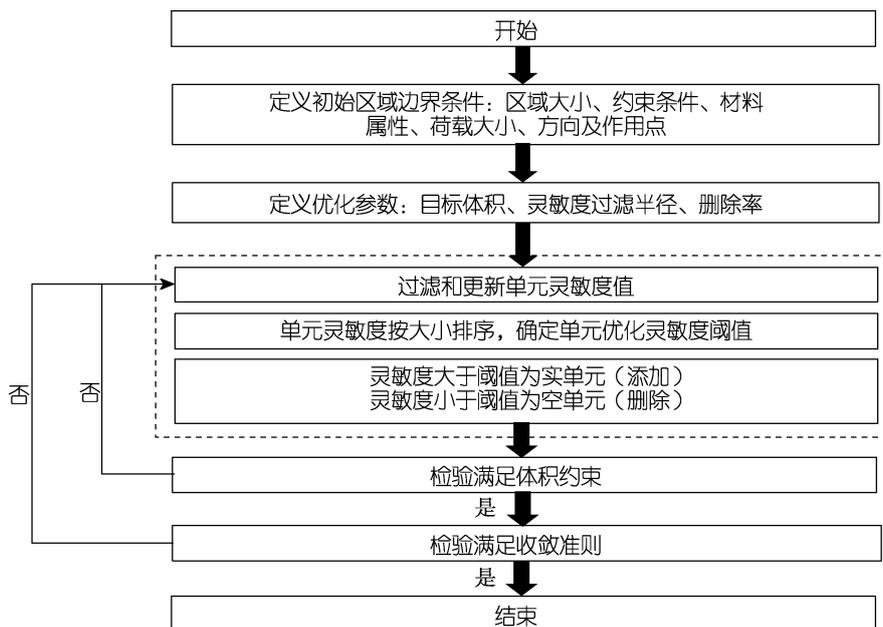


图 4 BESO 算法的生成原理
Fig.4 Generation principle of BESO algorithm

表3 基于渐进结构拓扑优化的软件内容总结
Tab.3 Summary of software content based on Evolutionary Structural Optimization

时间	名称	开发单位	特征及优势	过程
1978	Abaqus	David Hibbitt、Bengt Karlsson 和 Paul Sorensen 三人合伙的 HKS 公司	可分析复杂的固体力学与结构力学系统；可模拟极复杂和非线性问题；可做单一零件的力学和多物理场的分析；可做系统性的分析和研究	建立初始模型；创建数学；装配部件；荷载条件定义；边界条件定义；划分网格；提交计算；后处理
2014	Karamba	Clemens preisinger 与 Bollinger+ Grohmann Engineer 结构工程事务所	因力生形的力学分析插件，交互方便，可避免在其他力学分析软件中会遇到的几何体绘制或模型导入等问题。基本符合建筑师使用习惯	建立初始形体；结构分析参数设定（数据转化，边界条件设定，荷载情况设定，材料设定，截面尺寸设定）；结构分析及分析结果可视化
2018	Ameba	谢亿民院士领导的中国团队“谢亿民科技”	计算优化得到合理仿生结果；云端运行技术，独立优化计算库，具备前后处理格式开源，拓展性能好，可与外部软件进行连接	拾取几何模型；定义支座约束；施加荷载；设置优化参数；选择材料；自动生成前处理文件；求解计算；结果显示

构拓扑优化的能力有限。Ameba 是 2018 年由谢亿民教授团队研发的专门针对 BESO 算法的插件，具备多样网格处理能力，可实现二维和三维拓扑优化的数据处理，采用云端运算方式，极大提高了运算效率。本文的设计实践也是基于 Ameba 来进行的算法生成实验研究。

2.2 算法的生成策略

借助 Ameba 软件平台来实现 BESO 算法生成策略，具体生成操作流程可分为三个步骤：初始形态设计、拓扑优化设计、后处理和制造（见图 5）。首先，初始形态设计主要解决模型的前期预设条件问题，即对设计区域进行有限元网格划分的数据读取，且划分

密度越高、数量越大、单元尺寸越小，可影响后续模型运行细节更精细。初始模型有目标模型和非目标模型之分。目标模型是指面对真实世界的某个实体进行几何模型的构建，所有的虚拟数据是能适配于真实制造的，如桥梁节点的优化建模。非目标模型是利用 BESO 算法仿生建模特色，得到富有美学特征的设计形态，同时保证结构的合理性。其次，拓扑优化设计是生成策略最重要的一个环节，包括对各种荷载条件设定、设定优化参数、选择材料、集中数据处理前文件、登录账号云端计算、迭代生形结果显示等过程，数据关联直接导致整个设计与优化过程的最终结果。最后，后处理和制造是对设计形体的精修数据输出，如将拓扑优化后的锯齿状单位数据结果进行后期处理，使其达到均匀平滑效果。与此同时，将虚拟结果与制造设备进行数据转接，读取打印等输出数据，进行尺寸分析、材料分析、设备运行分析、打印终端分析等数据，再进行三维打印或数据切割等数控设备的实际操作，这个过程形成了彼此互联的协作系统。

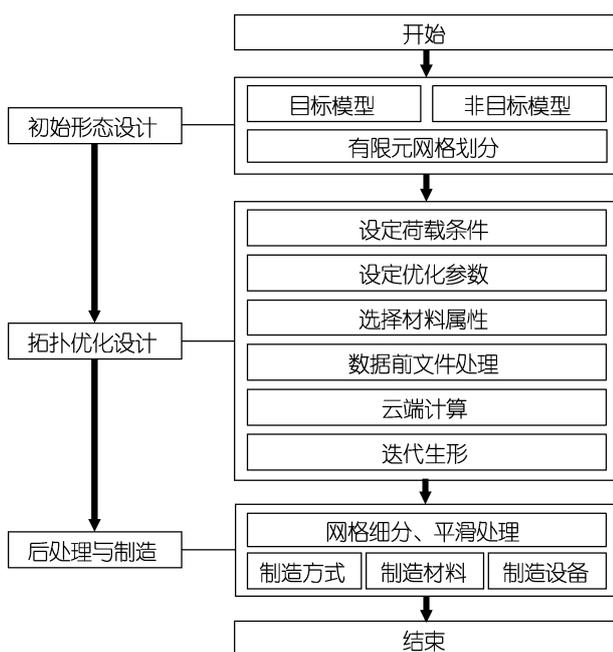


图5 BESO算法生成策略
Fig.5 BESO algorithm generation strategy

3 双向渐进结构拓扑优化算法生成设计实践

3.1 项目背景

本次研究是基于笔者参与同济大学建筑与城市规划学院发起的“数字未来”（Digital FUTURES）国际工作营中由皇家墨尔本理工大学澳大利亚工程院谢亿民院士主导的“重构：从自然形态中重构建筑”项目组实践结果，旨在从自然系统中得到设计实践的仿生方法，从而达到向自然学习、对自然模拟，再到与自然共生的设计目标。

3.2 主题定位

本次设计实践原型来自于我国著名四大名石之一“太湖石”，并以“数字太湖”为主题，旨在将传

统文化与数字文化进行一次实验性设计碰撞,从设计文化因素和设计类型因素两方面进行主题定位。

从设计文化因素出发(见表 4),有关太湖石最早记述于唐代白居易《长庆集》:“石有族,太湖为甲,罗浮、天竺次焉”。其生成采集方法记录于唐代吴融《太湖石歌》中“洞庭山下湖波碧、波中万古生幽石。铁索千寻取得来、奇形怪状谁得识”。由此可知,太湖石是将洞庭水下石灰岩作为生成岩床,经过长年的激流冲击和暗流涌动,使石灰岩表面出现涡洞与褶皱,呈现洞洞相连的嵌空之姿。在宋代米芾《园石谱》中针对这种特殊形态提出相石四法“瘦、漏、透、皱”等 4 种特征。瘦表现为体态挺拔、造型秀丽;漏表现为上下穿通、玲珑剔透;透表现为孔洞贯通、纹理纵横;皱表现为凹凸相间、内在有序。

据研究得知,已有学者在基于太湖石“瘦、漏、透、皱”的特征,采用 BESO 算法来进行生成过程模拟^[14](见图 6)。

因太湖石由水流冲击而成的特点,在计算机平台中将提取到的不同时间段水流数据与初始模型进行算法协同,通过不同模拟情况得到不同时间数据、不同力学数据下的变形过程,最终得到虚拟平台模拟自然生成的结果^[15]。这些相关研究表明两方面内容:一方面关注传统文化的新时代传承,传统文化在面临数字技术时往往会处于被动状态,采用何种方式来适应数字时代成为传统文化不可避免的现实问题;另一方面关注传统文化在数字时代中如何激活新的设计思路,数字技术具备的多元生成属性给设计界带来了以往不具备的复杂形态,这些形态与传统文化中的许多形态有着极高的相似之处。虽然二者在成型工艺上存在差异,但其设计来源都是对自然界的一种衍生与再创。传统工艺是工匠手工制成,有既定的成型规则;而数字技术成型方式可以是多版本的最优集合,工艺成型手段可以是 3D 打印或者智能制造等。

另外,太湖石表现为布满孔洞的复杂自然形态,也称“弹子窝”。这种“孔洞”特色与生物界“仿生学”理论,以及建筑学中的“孔洞空间”理论有着异曲同工之妙。首先,仿生学中对于自然形态基本保持着相互兼容的态度。如伊恩·伦诺克斯·麦克哈格(Ian Lennox McHarg)的《设计结合自然》关注自然演变

规律,真正让人们重视起仿生设计的关注。达西·温特沃斯·汤普森(Thompson D'Arcy Wentworth)的《生长和形态》将自然与数学几何相结合,研究生物进化和成长的新方法。其次,建筑师斯蒂芬·霍尔(Steven Holl)在 1999 年的《视差》中首次提出“孔洞性”的概念,即通过不同形态开口方式来创造一种建筑内外彼此交融的关系,丰富用户在视觉、空间知觉和活动感受上的体验。霍尔将孔洞表现为路径或是开敞/半开敞的抽象空间,实体侧壁可从不同方向打开,使空间具备贯通无限连续体的流动性^[16]。太湖石的孔洞虽是自然成型结果,但其效果与霍尔的孔洞性同样是体验性、现象性的表达。因此,仿生设计与孔洞形态在设计领域的研究已经由来已久,这为 BESO 算法生成提供了理论研究基础。

从设计类型因素出发,本次设计实践以家具设计为例。早在明代文震亨《长物志·水石》一文中称“石令人古、水令人远,园林水石,最不可无。”可见石文化已经和古琴、书画等这类陈设一样,成为古代文人生活情趣和品位的象征。回到本次设计实践中,可理解为是将石文化在当代家具设计中的数字化表达。家具作为建筑空间设计中不可获取的一种重要元素,它在历史的每个时代都反映着人类科技的发展水平,如里特维尔德的红蓝椅、密斯的巴塞罗那椅等。如今的计算机建模技术与 3D 打印等智能制造方式更是带给家具产品新的设计方向,如扎哈·哈迪德的 Rise Chair 等作品。本文则是以拓扑优化算法与先进制造技术来形成协同设计,不仅展示拓扑优化技术在家具设计上的成型优势,同时也表达了数字技术下传统文化的创新传承方式。

3.3 生成过程

太湖石的天然孔洞生成有几个重要因素:原石材料、环境温度、地下水冲刷、其他化学成分腐蚀等。它是通过不断删减多余材料而形成最终石材优美形态,与 BESO 算法生成方法一致,两者都是在对材料的优劣进行筛选、对比、去除和成型的过程。基于 BESO 方法的家具设计流程与传统家具设计方法截然不同,这里将整个 workflow 分为初始形态设计、拓扑优化设计、后期处理和制造三个阶段。

表 4 设计文化因素分析
Tab.4 Analysis of design cultural factors

分析项	太湖石	BESO 算法	转化及结合
客观条件	真实物理世界	计算虚拟平台	从自然中进行重构,物理与虚拟协同生成
形态特征	“瘦、漏、透、皱”,石灰岩表面出现涡洞与褶皱	自然形态模拟,二维及三维连续体块的有效形态表达	软件平台的模拟孔洞形态
生成原因	长年地下水流冲击和腐蚀	进化方式模拟,增加和删减单位来保留有效区域	环境、时间、气候等约束条件的生成

	Vf= 90% Rnd= 50% Rmin=3×Size	Vf= 80% Rnd= 50% Rmin=3×Size	Vf= 70% Rnd= 50% Rmin=3×Size	Vf= 80% Rnd= 40% Rmin=3×Size	Vf= 80% Rnd= 30% Rmin=3×Size	Vf= 80% Rnd= 40% Rmin=2×Size	Vf= 80% Rnd= 40% Rmin=1×Size
Iteration1							
	Teat 1_1	Teat 2_1	Teat 3_1	Teat 4_1	Teat 5_1	Teat 6_1	Teat 7_1
Iteration2							
	Teat 1_2	Teat 2_2	Teat 3_2	Teat 4_2	Teat 5_2	Teat 6_2	Teat 7_2
Iteration3							
	Teat 1_3	Teat 2_3	Teat 3_3	Teat 4_3	Teat 5_3	Teat 6_3	Teat 7_3
Iteration4							
	Teat 1_4	Teat 2_4	Teat 3_4	Teat 4_4	Teat 5_4	Teat 6_4	Teat 7_4
Iteration5							
	Teat 1_5	Teat 2_5	Teat 3_5	Teat 4_5	Teat 5_5	Teat 6_5	Teat 7_5
Iteration6							
	Teat 1_6	Teat 2_6	Teat 3_6	Teat 4_6	Teat 5_6	Teat 6_6	Teat 7_6
Iteration7							
	Teat 1_7	Teat 2_7	Teat 3_7	Teat 4_7	Teat 5_7	Teat 6_7	Teat 7_7
Iteration8							
	Teat 1_8	Teat 2_8	Teat 3_8	Teat 4_8	Teat 5_8	Teat 6_8	Teat 7_8
Iteration9							
	Teat 1_9	Teat 2_9	Teat 3_9	Teat 4_9	Teat 5_9	Teat 6_9	Teat 7_9
Iteration10							
	Teat 1_10	Teat 2_10	Teat 3_10	Teat 4_10	Teat 5_10	Teat 6_10	Teat 7_10

图6 7种不同参数下10次太湖石迭代的截面^[14]

Fig.6 Profile results of 10 iterations of stones with seven different parameters^[14]

1) 初始形态设计。初始阶段的形态设定不强求于对太湖石原始形态的复刻模拟,而是通过 BESO 算法随机三维拓扑优化进行仿生形态生成,来对中国传

统艺术意象手法的重构。中国古代美学术语中追求“意向美学”,在《易传》中有“观物取象”之说。在形象元素方面,太湖石体现在多个符号组合的孔洞

形态基础上, BESO 算法仿生生成则由多约束方法来得到多孔区域空腔形态, 两者皆有多孔性的生成; 在寓意元素方面, 太湖石是古代文人追求物我为一, 亲近自然, 返璞归真的重要载体, BESO 算法的结构优化是模拟自然结构体态而成, 两者皆有自然观的表达。可见, 传统艺术意象与数字仿生意象不谋而合。与此同时, 在家具数字模拟过程中需将人体尺度、材料选择、产品功能、制造成本和运输方式等内容纳入考虑范围。因此, 在 Rhino 平台中率先创建能支持后续去除优化工作的原始网格模型。需对整体网格模型进行加厚处理, 以便在优化过程中提高自主生成性, 从而形成丰富的“瘦、漏、透、皱”之势, 同时增加模拟太湖石形态的类型数量, 以求得到最佳造型。

2) 拓扑优化设计。最大化结构刚度优化目标, 达到在指定的荷载和边界条件下最小化结构柔顺度。使用以 BESO 算法为基础的软件 Ameba 来执行拓扑优化, 能够根据座椅的受力及支撑条件, 自动地生成结构合理、形态有机的轻量化设计。考虑到后期制造和整体美观的层面感, 整个过程中将迭代过程分为整体迭代和部分迭代。第一步整体迭代: 先将初始模型 (Brep) 进行边界条件首次迭代, 包括坐面荷载、扶手荷载、靠背荷载、支撑点、非设计区域等部分的参数设置 (见图 7)。并设定优化参数来获取初步迭代形体, 保持默认敏感度 (S), 体积分数设定 0.1 (vf), 进化率设定 0.01 (ert) (增加优化时间、提高优化精度), 过滤半径 2 倍 (rmin) (删减 2 倍以下单元), 并默认最大迭代步数以求最终计算结果。得到初始座椅模型及优化结果的有限元应力数据 2.77Mpa (见图 8)。因拓扑优化通常会产生由大量不规则四面体单元组成, 模型表面存在大量的“锯齿”单元, 此类单元在设计及制造软件中被视为非流形模型, 因此需要进行后处理以获得光滑的流形表面, 以满足产品的质量要求。在每步迭代过程中, 满足材料体积分数约束 (Volume fraction) 的要求下, 其总应变能 (Total energy) 稳步应变, 其柔顺度曲线最终趋于稳定以得到高效、美观的收敛结果 (见表 5)。第二步部分迭代: 将太湖石复杂形态与拓扑算法生成协同表现为以下几点: “瘦”在参数定义下表现为拓扑空间的迭代复杂次数, 次数越多则优化程度越高, 形态表现越纤秀; “漏”和“透”皆是模拟太湖石贯通的空间体积比, 在算法生成过程中, 消除元素越多则形成裂孔洞越多; “皱”则将不规则多孔体块进行优化修复, 以便后期制造。为了实现以上几点的迭代需求, 这里将家具进行分为前腿、座面和后腿三大部分进行分区域模拟及优化 (见表 6~8)。运用 Ameba 进行分区域孔洞形态的反复迭代, 然后再模拟生成除孔洞以外的线性形态效果。通过多种算法计算的协同操作下得到的优化结果, 设计师只需要在结果上从美学和舒适度等角度加以修饰, 通过反复地算法优化与人工微调, 最终完成成熟的产

品设计过程 (见图 9)。

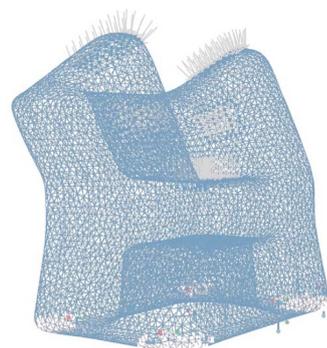


图 7 模型网格划分和边界条件设定
Fig.7 Model meshing and boundary condition setting

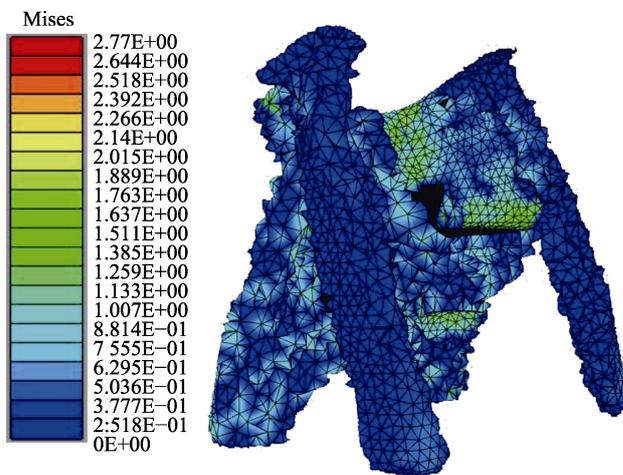


图 8 三维拓扑优化结果应力云图
Fig.8 3D topology optimization results stress diagram

表 5 三维 BESO 算法优化过程
Tab.5 Three-dimensional BESO algorithm optimization process

迭代步数	体积分数约束	总应变能	非流形	流形
25	0.641 8	0.027 19		
40	0.531 3	0.030 67		
65	0.397 8	0.039 08		
80	0.336 4	0.046 33		
109	0.244 3	0.064 98		

表6 分区迭代优化一：前腿优化过程
Tab.6 Partitioned iterative optimization I: front leg optimization process

迭代步数	体积分 数约束	总应变能	优化单元	非流形	流形
0	0	0			
13	0.697 1	1.618			
27	0.543 2	1.819			
43	0.421 7	2.219			
57	0.340 2	2.508			

表7 分区迭代优化二：座面优化过程
Tab.7 Partitioned iterative optimization II: seating surface optimization process

迭代步数	体积分 数约束	总应变能	优化单元	非流形	流形
0	0	0			
5	0.840 1	7.424			
9	0.758 9	7.753			
12	0.711 4	8.058			
19	0.622 7	8.831			

表8 分区迭代优化三：后腿优化过程
Tab.8 Partitioned iterative optimization III: hind leg optimization process

迭代步数	体积分 数约束	总应变能	优化单元	非流形	流形
0	0	0			
5	0.840 1	2.725			
11	0.726 4	3.074			
17	0.645 7	3.476			
22	0.590 9	3.889			

3) 后期处理与制造。为了进一步验证拓扑优化带来的结构性能优越性,需要使用有限元分析来检验应力分布和位移。同时,制造阶段考虑设计方案涉及的预算、材料、时间、运输和几何特征,选择增材制造方式来快速制造复杂的三维结构。通过适当的连接和装配方案,可以对设计的模型进行相应的拆分。当原始家具组装完成,则可进行表面处理,如打磨、抛光和喷漆,以提高表面质量并提供特殊的表面特征(见图10)。

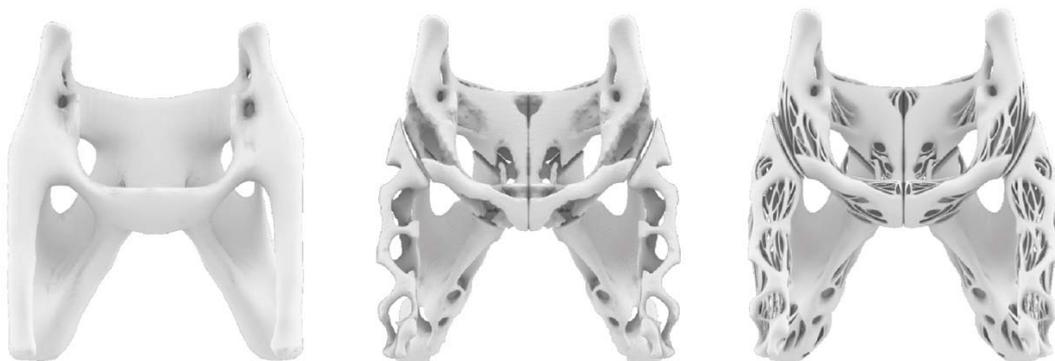


图9 整体优化、分区优化、细节优化
Fig.9 Overall optimization, partition optimization and detail optimization



图 10 “数字太湖”家具设计实物照片
Fig.10 Physical photo of "Digital Taihu" furniture design

4 结语

BESO 算法是目前较为先进的拓扑优化算法, 它不仅理工科中得到有效的实际应用, 同时也逐渐向艺术与学科进行多维度思路探索。本文在梳理 BESO 算法组织模式与生成原理研究基础上, 明确其算法在产品中的生成策略和优化方法, 探索数字技术如何赋能传统文化的再激活, 并以“数字太湖”为主题的创新设计来进行实验论证与路径探索。然而因 BESO 算法在形态、结构、材料、节能等多方面皆有性能数据的综合考虑, 本文仅以家具设计实践为代表进行实验探索, 并不能全面说明其拓展实践能力, 在后续的工作中可结合更多不同层级、不同背景、不同类型的实验来进行拓展探索, 结合更多新工具和新设计方法体系来验证 BESO 算法应用的多样可行性, 为推动数字算法生成方式来实现可持续设计创造更多机会。

参考文献:

- [1] 李昊. 基于渐进结构拓扑优化原理的形体生成方法初探[D]. 南京: 东南大学, 2020.
LI Hao. Preliminary Study on the Method of Shape Generation Based on the Principle of Topological Optimization of Progressive Structure[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [2] 孟宪川, 赵辰. 图解静力学简史[J]. 建筑师, 2012(6): 33-40.
MENG Xian-chuan, ZHAO Chen. Brief History on Graphic Statics and Its Related[J]. The Architect, 2012(6): 33-40.
- [3] XIE Y M, STEVEN G P. A Simple Evolutionary Procedure for Structural Optimization[J]. Computers & Structures, 1993, 49(5): 885-896.
- [4] XIE Yi min. Generalized Topology Optimization for Architectural Design[J]. Architectural Intelligence, 2022, 1(1): 2.
- [5] HUANG X, XIE Y M, BURRY M C. Advantages of Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization (BESO) over Evolutionary Structural Optimization (ESO)[J]. Advances in Structural Engineering, 2007, 10(6): 727-737.
- [6] HUANG X, XIE Y M. Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures[M]. New York: Wiley, 2010.
- [7] YANG X Y, XIE Y M, STEVEN G P, et al. Bi-Directional Evolutionary Method for Frequency Optimization[C]. STEVEN G P, QUERIN O M, GUAN H, et al. Proceedings of the Australasian Conference on Structural Optimisation. Sydney: Australia, 1998, 231-237.
- [8] BURRY J, FELICETTI P, TANG Ji-wu, et al. Dynamical Structural Modeling: A Collaborative Design Exploration[J]. International Journal of Architectural Computing, 2005, 3(1): 27-42.
- [9] 谢亿民, 左志豪, 吕俊超. 利用双向渐进结构优化算法进行建筑设计[J]. 时代建筑, 2014(5): 20-25.
XIE Yi-min, ZUO Zhi-hao, LYU Jun-chao. Architectural Design through Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization[J]. Time + Architecture, 2014(5): 20-25.
- [10] YAN Xin, BAO Ding-wen, ZHOU Yu-fang, et al. Detail Control Strategies for Topology Optimization in Architectural Design and Development[J]. Frontiers of Architectural Research, 2022, 11(2): 340-356.
- [11] 谢亿民, 黄晓东, 左志豪, 等. 渐进结构优化法(ESO)和双向渐进结构优化法(BESO)的近期发展[J]. 力学进展, 2011, 41(4): 462-471.
XIE Yi-min, HUANG Xiao-dong, ZUO Zhi-hao, et al. Recent Developments of Evolutionary Structural Optimization (Eso) and Bidirectional Evolutionary Structural Optimization (Beso) Methods[J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(4): 462-471.
- [12] SASAKI M, ITŌ T, ISOZAKI A. Morphogenesis of Flux Structure[M]. London: AA Publications, 2007.
- [13] LOUTH H, REEVES D, KOREN B, et al. A Prefabricated Dining Pavilion: Using Structural Skeletons, Developable Offset Meshes, Kerf-Cut and Bent Sheet Materials[M]. London: UCL Press, 2017: 58-67.

(下转第 101 页)