

结构性能化设计工具在家具设计中的应用和比较

黄维达

(上海视觉艺术学院 设计学院, 上海 201620)

摘要: **目的** 结合迅速发展的数字技术, 探索家具设计方法和制造手段的新范式。**方法** 在数字设计领域“强结构”设计思潮的影响下, 运用以图解静力学分析法发展起来的几种计算机结构性能化设计工具, 如 Polyframe、3DGS、Millipede3D, 以及 Ameba 等, 在家具设计中尝试将主动式结构找形与家具设计相结合, 探索数字化家具设计原理及方法。**结果** 运用不断更新的结构分析与生成工具, 将传统的、自上而下的设计师主导式设计转为自下而上的生成式全新工作流程, 也创造了更新的、更生动的家具设计语言和形式。**结论** 随着计算机技术的高速发展, 运算式设计逐渐成为设计的重要方法之一。新的设计流程从底层逻辑上打破了由包豪斯倡导的标准化材料选型和结构选型的设计局限性, 突破了传统意义上功能优先的国际主义设计样式。同时, 通过运算技术进行的材料优化、力学优化能更好地回应节能环保的需要, 形成大批量定制的新时代形式美学和建构美学。

关键词: 家具设计; 结构性能化设计; 数字化设计; 图解静力学; 有限元分析法

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)18-0184-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.18.021

Application and Comparison Study of Structure Performance-based Design Tools in Furniture Design

HUANG Wei-da

(School of Design, Shanghai Institute of Visual Arts, Shanghai 201620, China)

ABSTRACT: The work aims to explore new paradigms of furniture design methods and manufacturing means in combination with rapidly developing digital technology. Under the influence of the "strong structure" design trend in digital design, several computer structure performance analysis tools developed by the graphical statics, such as Polyframe, 3DGS, Millipede3D and Ameba, etc., were used to integrate active structure form-finding into furniture design to explore the principles and methods of digital furniture design. With constantly updated structural analysis and generation tools, the traditional top-down designer-led design was transformed into a bottom-up generative new workflow, and a new vivid furniture design language and form was also created. With the rapid development of computer technology, computational design has gradually become one of the important methods of design. The new design process breaks the design limitations of standardized material selection and structural selection advocated by Bauhaus from the underlying logic, and then breaks through the international design style that gives priority to function in the traditional sense. At the same time, material optimization and mechanical optimization through computing technology better respond to energy conservation and environmental protection, forming a new era of form aesthetics and construction aesthetics of mass customization.

KEY WORDS: furniture design; structure performance-based design; digital design; graphic statics; finite element analysis

计算机技术的迅速发展显著地促进了制造业和服务业的融合^[1], 也深深地带动了建筑设计及其相关

领域的设计理念与制造技术的发展。通过建筑信息模型 (BIM) 技术平台对建筑工程的数字化精确管理,

以及各种计算机分析和模拟设计工具对复杂建筑结构与形式高精度定制化的把控,在各种建成项目中,越来越多地实现了具有自由复杂形态的建筑项目。

具有手工艺传统的家具设计,在制造业的工业化变革中,由追随包豪斯建筑风格转变为现代主义大批量标准化的家具设计范式^[2]。而随着计算机技术不断地深入到数字化建筑设计之中,并实现了大量具有自由形态的空间环境的落地项目后,标准化的家具产品与新的环境之间的矛盾就愈加突出。家具作为建筑空间的重要组成部分,理应更好地理解 and 拓展建筑的语言,与空间相互融合^[3]。当建筑迈向数字化时,家具同样需要面对新的技术,接受挑战并做新的尝试。在一贯强调整体性设计的指导下,尝试借助“强结构”概念下的数字建筑的生成范式,探索当代家具设计的工具与方法。

1 数字化设计的概念发展

1.1 参数化设计

纵观设计的历史,几次重大的设计变革都与新技术的推动关系密切,也对设计美学提出了新的要求^[4]。农业革命时代有精湛的手工艺品,而工业革命时代有标准化的现代主义设计风格。而自 1982 年《时代》杂志宣称个人电脑作为“年度机器”,从而开启了信息和个人电脑时代以来,计算机的运算能力及其运用领域不断扩大,大容量、高速算力的属性更是让设计师有了属于数字时代强大的设计工具。

2009 年扎哈建筑事务所合伙人舒马赫等^[5]提出了参数化主义的概念,宣称计算性设计时代的到来,让脚本语言和参数化工具成为了先锋建筑师必备的设计基本功,亦成为了设计界展开研究的方向。

1.2 自下而上的生成式设计

参数化主义的提出,从根本上改变了设计的内容和形式,打破了传统由设计师自上而下的设计过程,转为由设计条件和规则限定下,经由运算的分析和模拟,自下而上自然生长而成。这种“生长”如同自然界中万物的成长由各自的基因构成所决定,同时也受到所在环境和各种条件的影响而相互区别。设计师从对设计结果的直接把控,转为对设计“基因”的设定,影响条件的理解,最后成果的筛选和精细化处理。设计师的身份正在悄悄地发生革命性的变化,而这样的设计被称为生成式设计^[6]。

2 数字化设计的研究变化

2.1 变量控制的大批量定制设计

工业时代大批量、标准化制造的生产线,保证了高质量、低成本的非定制产品的制造。由于计算机的

加入,使得在一定规则下,能够迅速穷举大量设计解决方案。同时,在 CNC、3D 打印,以及机械臂等多种数字控制制造设备的协助下同样能够实现高质量、大批量的定制制造。数字化设计的先驱——格雷戈·林恩(Greg Lynn)教授的阿莱西(Alessi)系列茶壶,是同一个空心金属块在不同参数变量控制下的 99 种非标准茶壶变体。通过数字控制的制造技术,让每件各有不同的作品都能够被精确地加工制造并完成^[7]。中国新时代的数字设计师——张周捷 2018 年推出的 EndlessForm 家具品牌,在四足无扶手单椅的形态生成中,加入不同的人体属性和姿态作为参数变量,生成了变化无穷的作品^[8]。两位设计师的作品皆依靠运算中的变量,调整生成大批形态类似且又各不相同的定制产品,而他们对成品的美学控制是其变量范围的主要影响因素之一。

2.2 科学的运算化设计

随着参数化设计的发展,对运算逻辑本身的设计(而非设计成果的控制)逐渐成为了数字化设计的重点。在对自然科学的不断探索中,通过深入自然现象、数学模型、物理模型等的科学研究,并将其融入到运算模型当中,从而形成新的设计。

2016 年 ZHACode 伦敦科学博物馆温顿展廊机械中心展厅的家具布置和中心主体装置的设计均来自飞机尾流的动力学模拟的生成设计。该设计的中心主体装置通过复杂曲面的表皮优化和数控加工完成,精确的展示出如气流般强大的流动空间。此外,鸟群飞舞、真菌觅食的集群模拟、花瓣展开的生长模拟、骨骼生长的模拟等众多来自自然现象或自然生物的模拟计算也不断地被开发和运用到设计当中^[9]。

3 结构与数字家具设计

力是世界合理性的根本,它可能是“野渡无人舟自横”的安静平和,也可能是“风乍起,吹皱一池春水”的变幻无穷^[10]。结构作为对力的回应与表达,长久以来都是家具的重要构成部分。但复杂而非直观的结构性能却常常是设计中难以突破的瓶颈。这使得家具设计师往往会选择通过结构选型来规避结构问题,从功能、材料和人文等角度进行形态设计。在计算机技术的发展下,通过不断开发的数字分析和模拟工具,让结构性能化设计问题迎刃而解。在这些技术的引导下,尝试在家具设计中,进行主动式结构找形的新尝试。

3.1 图解静力学分析法

在众多力学分析方法中,图解静力学作为一种古老的力学几何图解方法,主要运用闭合多边形图解法来研究结构在平衡静载荷作用下的应力分布和弹性变形^[11]。它曾经是建筑结构设计的重要内容,而后

工程力学偏向运用更为复杂的现代数学进行解析,图解静力学便退出了设计师的知识体系。

当代学者通过研究发现,作为多面体的静力学图解可以直观地反向驱动形态生成,并在研究的基础上开发了众多以图解静力学原理为基础的结构分析工具,比如宾夕法尼亚大学 PSL 实验室(多面体结构实验室)开发的 PolyFrame 3D 和参数化设计的 Grasshopper 开源平台发布的 3DGS 等。

图解静力学的回归,打破了建筑与工程之间深远的隔阂。设计师借助计算机程序对结构进行力学分析并参与设计,是将结构设计从被动式设计优化转向主动式设计找形,寻找新的形式语法的关键。

3.1.1 Polyframe 家具设计

宾夕法尼亚大学的 PSL 实验室(多面体结构实验室)由马苏德·阿克巴扎德(Masoud Akerbazadeh)博士主持,他师从著名的苏黎世理工大学 Philippe Block 教授,图解静力学是他的博士研究方向,也是之后他在 PSL 的主要研究课题。马苏德博士将二维凸多边形静力图解拓展到三维闭合多面体形的静力图解。运用图解反向求解,即任意一个封闭三维凸多面体也可以求解出一个结构平衡体。马苏德博士在此基础上开发了加载于三维矢量曲面建模软件 Rhino 平台上的 Polyframe 3D 插件^[12]。

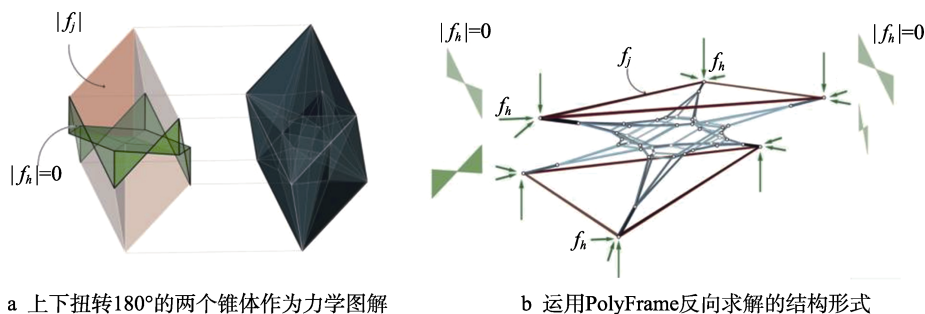


图 2 形态生成图解
Fig.2 Form-finding diagram

3.1.2 3DGS 家具设计

贝尔格莱德大学建筑学院的奥格宁·格罗瓦茨(OGNJEN GRAOVAC)博士在美国宾夕法尼亚大学 PSL 实验室和苏黎世理工大学 Block Research Group 实验室所做研究的基础上,在 Grasshopper 这个参数化开源平台上发布了 3DGS(3D GRAPHIC STATICS)插件^[13]。

3DGS 的工作原理与 PolyFrame 十分相似:通过对封闭凸多面体进行内部几何划分,再由模拟计算进行结构形态翻译。当设计师定义不同的多面体和不同切分方法时,其翻译出的静力结构体也不同。相比 Rhino 平台下自由的 PolyFrame 插件界面,3DGS 插件能够更好地与 Grasshopper 平台其他工具衔接,能

PSL 于 2020 年发布的作品《拉丁舞者》(Saltatur the Dancer)即由 PolyFrame 生成。该作品是由预制混凝土和钢索建构的大跨度 3 支点的超薄玻璃桌,见图 1。整体家具占地 4.44 m^3 ,主体结构部分由 0.06 m^3 混凝土杆件组成,与桌面及地面的接触支点为自由布点的远距离 3 个支点支撑,具有强大的力学效率和轻薄而富有张力的形态表现。作品在 Rhino 平台上由 1 个直立的六棱柱开始几何变形并自定义切分,再通过 PolyFrame 3D 进行图解力学的反向求解,生成结构形态,见图 2。作品无论从形态生成上还是材料用量上都能体现出含蓄而精确的控制力。



图 1 《拉丁舞者》
Fig.1 "Saltatur the Dancer"

够以更加数字化的手法干预初始几何体的切分,以生成更具有复杂性的结构形态。

三足扶手单椅在设计时就运用了 3DGS 工具进行找形,见图 3。首先,将椅子的初始形态设定为封闭单斜面六面体,并通过 Grasshopper 平台的 Voronoi 进行形体内部的多次切分,见图 4。切分后的几何体借助 3DGS 反向求解出平衡的结构形式。并将其深化为以细木直杆和 3D 打印多向连接件节点构成的椅子。

PolyFrame 和 3DGS,因其初始形体与设计输出之间呈几何对偶关系,使得这两种基于多面体的静力学图解法对设计师的结构理解有较高的要求。设计师对结构的生疏往往会导致对后期成果失去控制,从而使形态过于复杂。相反,对有经验的设计师在对成果

的准确预判下,这两种模拟计算都是非常高效准确和易于控制的设计工具。

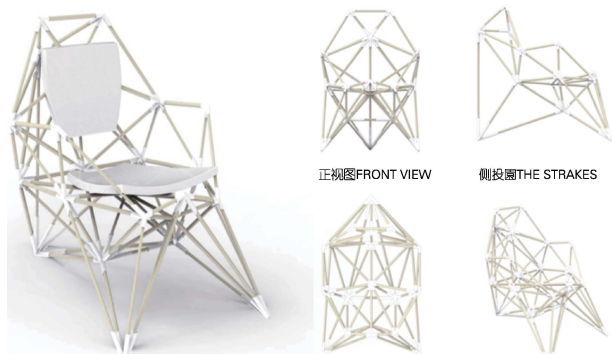


图 3 3DGS 生成扶手椅(江恩光、林丽设计,黄维达指导)
Fig.3 Armchair generated by 3DGS (designed by JIANG En-guang, LIN Li, instructed by HUANG Wei-da)

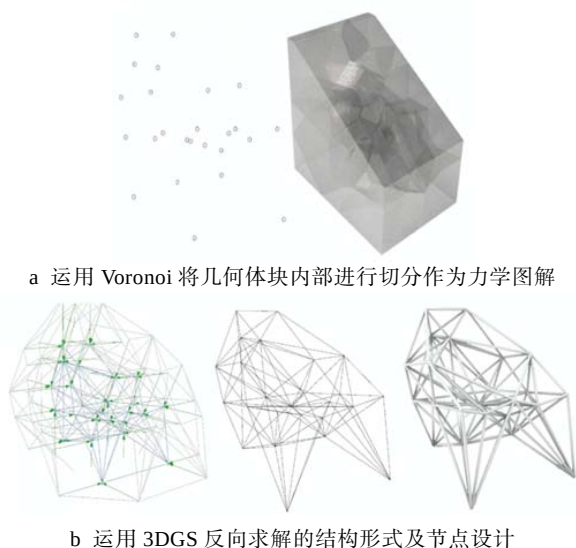


图 4 形态生成图解
Fig.4 Form-finding diagram

3.2 有限元分析法

有限元分析法(Finite Element Method, FEM)是依赖于计算机技术发展起来的现代渐进式结构优化方法^[14]。与图解静力学分析法不同的是,有限元分析法通过对形体内多个均匀分布的采样点进行力学计算,以图解方式呈现出内部受力的疏密关系。再通过对材料的不断删减,渐进地寻求接近最优化的材料分布方式,从而生成高效的、结构形态。有限元分析法需要较大的算力进行多次迭代计算,以不断接近最优解。

Millepede 3D 和 Ameba 即是基于有限元分析法的两个重要的结构设计工具。设计师通过对形态和力学平衡的建构,借助程序图解形态内部的应力迹线分布情况,并通过对比受力的疏密关系,生成有较高效率的结构形态。

3.2.1 Millepede 3D 家具设计

Millepede 3D 是由哈佛大学设计学院潘·米查拉多斯教授(Panagiotis Michalatos)^[15]在 Grasshopper 平台发布的基于有限元分析法的结构分析插件。它具有如设计域、荷载、支撑,以及材料属性等完整的力学模型参数。Millepede 3D 的即时运算速度比较快,输出形态能够快速响应参数输入调整,非常适合设计师使用。

图 5 的侧躺单椅设计中,运用了 Millepede 3D 作为结构和形态生成工具。相比前面的插件, Millepede3D 突破了多面体初始形态的局限,允许自定义体块轮廓。因此,设计中首先根据人体的坐姿姿态,在 Rhino 中建立身体接触面的曲面轮廓和下部几何轮廓,同时在底部创造性地设定了五个不均匀的地面支点,建构出初始模型。再运用 Grasshopper 中的 Mesh 工具设置多个采样点,并运用 Millepede 3D 的短暂计算,图解出经过这些采样点的应力迹线分布情况。在有限元分析法中,采样点的数量越多,图解出的受力分析越精确,相对的运算时间就越长。通过对应力线疏密程度的提取与优化,进一步形成椅子的结构形态,见图 6。

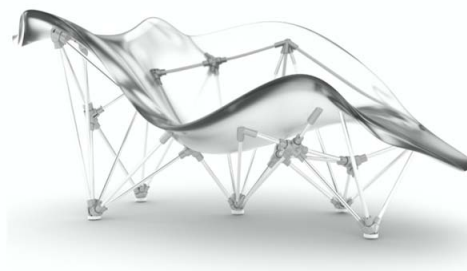


图 5 Millepede3D 生成躺椅设计
(许元苗设计,黄维达指导)
Fig.5 Lying lounger generated by Millepede3D
(designed by XU Yuan-miao, instructed by HUANG Wei-da)

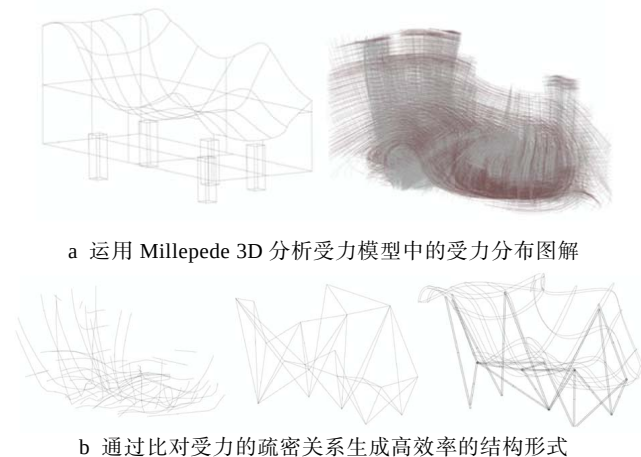


图 6 形态生成图解
Fig.6 Form-finding diagram

3.2.2 Ameba 家具设计

同样基于有限元分析法, Ameba (阿米巴, 又称变形虫)是由皇家墨尔本理工大学的谢亿民等^[14]领导的中国团队——谢亿民科技发布在 Grasshopper 平台上的结构分析插件。阿米巴工具同样认可自定义的形态作为力学模型的初始条件。相比 Millepede 3D, Ameba 借助云计算平台,可进行加大规模的多次减法迭代计算,渐进地寻求最优解。强大的算力,使其能够输出流畅的、具有复杂拓扑网格面的精细成果,生成类似骨骼式的自然形态,见图 7。谢亿民等^[16]最新发布的基于双向进化的结构分析工具 BESO 3D,在减法迭代的基础上增加了加法运算,以极少的性能损耗,打破唯一最优解的限定,能够更好地匹配多样化的形式要求。

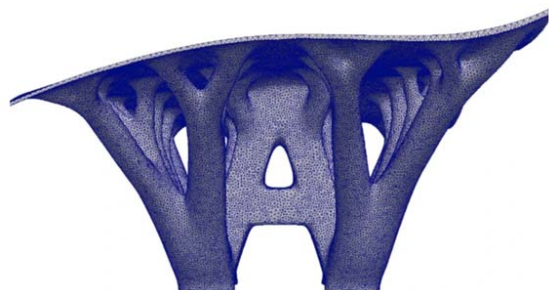


图 7 Ameba 网格面结构找形
Fig.7 Mesh surface form-finding by Ameba

然而响应速度是其精准的算力付出的代价。设计调整与输出之间比较漫长的运算时间,这不仅对设计师的计算机性能和网络性能有一定的要求,也在一定程度上影响了设计工作的流畅性。

即便如此,由 Ameba 官网发布的视频可知,该工具已经被运用于家具产品、建筑构件、建筑主体结构和桥梁等多个尺度的设计中,见图 8。依附于强大的云计算平台和先进的加减材料拓扑运算, Ameba 和 BESO 3D 完全可以胜任大尺度建筑项目的落地工作,真正做到从结构设计出发,创造自己的建筑形式语言。



图 8 Ameba 家具设计
Fig.8 Furniture design by Ameba

4 结语

从多面体约束的图解静力学性能分析法到自由形态的有限元分析法,结构对计算的精准要求和设计师对自由形态的向往,借助日益强大的计算能力与众多学者的研究开发,使两者日渐完美地结合起来,让当代设计师突破结构的束缚,开拓更具挑战的、更具创造力的设计范式。

在结构性能化设计的发展中,家具与建筑在结构上的同理性使得家具作为小尺度实验探索尤为重要。文中关于多种数字化设计工具的研究中,家具常常作为结构创新的实验起点。无论是实验模型还是家具产业,作为建筑空间的组成和对建筑空间的理解,家具设计如同建筑一般,必然在传统与创新中与时代共进,成为这些创新技术的终点,共同创造新时代的新设计。

参考文献:

- [1] 周明生, 张一兵. 数字技术发展促进制造业与服务业融合了吗[J]. 科技进步与对策, 2022, 39(13): 74-82.
ZHOU Ming-sheng, ZHANG Yi-bing. Does Digital Technology Promote the Integration of Manufacturing and Services?[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2022, 39(13): 74-82.
- [2] 陈雨, 李亮之, 吴志军. 三种功能主义的成因及表现形式分析[J]. 包装工程, 2010, 31(22): 63-65.
CHEN Yu, LI Liang-zhi, WU Zhi-jun. Analysis of Formation and Representation of Three Functionalisms[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(22): 63-65.
- [3] 付小利. 范斯沃斯住宅中建筑与家具的关联性研究[J]. 包装工程, 2019, 40(14): 174-180.
FU Xiao-li. Correlation between Architecture and Furniture in Farnsworth House[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(14): 174-180.
- [4] 李洁, 袁萍, 张琰. 从工业美学到智能美学[J]. 包装工程, 2022, 43(2): 29-34.
LI Jie, YUAN Ping, ZHANG Rong. From Industrial Aesthetics to Intelligent Aesthetics[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(2): 29-34.
- [5] 舒马赫 P, 徐丰. 作为建筑风格的参数化主义——参数化主义者的宣言[J]. 世界建筑, 2009(8): 18-19.
SCHUMACHER P, XU Feng. Parametricism As Style-parametricist Manifesto[J]. World Architecture, 2009(8): 18-19.
- [6] 徐卫国. 参数化设计与算法生形[J]. 世界建筑, 2011(6): 110-111.
XU Wei-guo. Parametric Design and Algorithm Generating[J]. World Architecture, 2011(6): 110-111.
- [7] 卡尔波 M, 闫超. 数字粗野主义的时代[J]. 时代建筑, 2019(6): 20-23.
CARPO M, YAN Chao. The Age of Computational

- Brutalism[J]. Time Architecture, 2019(6): 20-23.
- [8] 林楠. 张周捷: 十年一梦, 解秘无尽之形[J]. 设计, 2019, 32(8): 80-83.
LIN Nan. ZHANG Zhou-jie: A Dream in Ten Years, Unraveling the Endless Form of Mystery[J]. Design, 2019, 32(8): 80-83.
- [9] 徐卫国, 李宁. 算法与图解生物形态的数字图解[J]. 时代建筑, 2016(5): 34-39.
XU Wei-guo, LI Ning. Algorithm and Diagram the Digital Diagram from Bio Forms[J]. Time Architecture, 2016(5): 34-39.
- [10] 王振东. 大众力学丛书《诗韵力学》前言[J]. 力学与实践, 2021, 43(2): 322-323.
WANG Zhen-dong. Popular Mechanics Series *Poetic Rhyme Mechanics* Foreword[J]. Mechanics in Engineering, 2021, 43(2): 322-323.
- [11] 科特尼克 T, 王帅中. 图解静力学: 一种实现强结构的操作方法[J]. 建筑师, 2021(3): 21-25.
KOTNIK T, WANG Shuai-zhong. Graphic Statics: An Operative Approach Towards Strong Structures[J]. The Architect, 2021(3): 21-25.
- [12] 阿克巴扎德 M, 戈米 A T, 博拉萨尼 M, 等. 拉丁舞者[C]. 建筑计算机辅助设计协会 (ACADIA) 第40届年会论文集: ACADIA2020 分布式接近/第二卷: 108-113.
AKBARZADEH M, GHOMI A T, BOLHASSANI M, et al. Saltatur[C]. Proceedings of 40th Annual Conference of the Association of Computer Aided Design in Architecture Collected papers: ACADIA 2020: Distributed Proximities/Volume II:108-113.
- [13] 阿米尔侯赛因 A, 维斯库索 S, 本纳什 H, 等. 通过3D 图形静态的物化, 用于紧急避难所的废物基础结构[C]. 2022 年国际壳体与空间结构协会年度研讨会论文集, 国际壳体与空间结构协会, 英国吉尔福德, 2020(14): 1-10.
AHMADNIA A, VISCUSO S, BEHMANESH H, et al. A Waste- based Structure for an Emergency Shelter Through Materialization of 3D Graphic Statics[C]. Proceedings of IASS Annual Symposia. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), Guildford UK, 2020(14): 1-10.
- [14] 袁烽, 柴华, 谢亿民. 走向数字时代的建筑结构性能化设计[J]. 建筑学报, 2017(11): 1-8.
YUAN Feng, CHAI Hua, XIE Yi-min. Towards a Structural Performance-based Architectural Design in Digital Age[J]. Architectural Journal, 2017(11): 1-8.
- [15] 梅伦布林克 N, 米查拉多斯 P, 卡萨班 P, 等. 基于局部力测量的分布式攀爬机器人施工方法研究[C]. 2017 年智能机器人与系统国际会议论文集, 温哥华: 电器和电子工程师学会, 2017: 4333-4340.
MELENBRINK N, MICHALATOS P, KASSABIAN P, et al. Using Local Force Measurements to Guide Construction by Distributed Climbing Robots[C]. Proceedings of 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vancouver: IEEE, 2017: 4333-4340.
- [16] 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.

责任编辑: 蓝英侨