

适应性结构性能设计

——基于材料智能主义的 3D 打印编程结构设计

王文轩¹, 周鑫杰², 吴昊³, 袁烽⁴

摘要: 在计算性设计与建造的数字革命推动下, 工业 4.0 显著促进了建筑的智能化发展, 特别是在增材建造领域, 但现有的 3D 打印技术大多基于均质材料, 结构性能各向同性, 缺乏对外部环境响应的智能性。基于材料智能主义, 本文提出一种编程结构 3D 打印策略, 可根据外部荷载智能地调整结构性能。以图解静力学为基础, 通过编程材料不同位置的物理性质以精确控制其结构性能, 再将参数输入变密度 3D 打印的机器人建造平台中, 制造具有适应性结构性能的结构体。本文以“Harmony Seat”椅子设计为例, 应用该策略设计并制造出能智能适应不同体型与坐姿的椅子。与传统建造技术相比, 编程材料的 3D 打印技术降低了建造成本, 对不规则建筑形式的结构效率的提高具有创新性的研究意义。

关键词: 材料智能主义; 编程结构; 编程材料; 图解静力学; 机器人 3D 打印

Keywords: Intelligent Materialism; Programmed Structures; Programmed Materials; Graphic Statics; Robotic 3D Printing

资助项目情况: 国家重点研发计划, 项目编号: 2023YFC3806900

引言

从切石法到水泥浇筑, 建造工艺经历了从传统到现代的演变, 建筑结构的质量与效率随着人类的不断探索与创新而提升发展。然而, 自工业革命以来, 建筑行业整体上亟需突破性的升级革新, 建筑技术和工艺进入了瓶颈期^[1], 使得现代模式的发展潜力逐渐被边缘化。此外, 对自然资源的大量消耗也成为制约其发展的一个重要因素。研究显示, 美国的建筑行业占行业能源消耗总量的 36%^[2], 这一比例反映了传统建筑正在逐渐成为能源消耗的巨擘。在技术创新与可持续发展理念的双重驱动下, 未来建筑亟需解决的难题是如何创造性地提高建造效率并降低资源依赖。

随着计算性设计的交叉融合, 数字革命推动了工业 4.0 时代的转型, 增材制造、机器人建造和智能材料等先进技术改变了传统建造范式^[3]。在数字自然主义 (Digital Naturalism) 的新理念下, 更加智能化建造过程的实现展现出新的可能性与生命力, 推动了建筑向更加智能高效的方向发展。其中 3D 打印技术通过逐层建造的方式^[4], 在精确制造复杂形状的同时显著减少了材料的浪费, 成为实现现代建筑非规则形态建造的一种重要方法。

¹ 王文轩, 同济大学建筑与城市规划学院, 硕士研究生

² 周鑫杰, 同济大学建筑与城市规划学院, 博士研究生

³ 吴昊, 同济大学建筑与城市规划学院, 博士研究生

⁴ 袁烽 (✉), 同济大学建筑与城市规划学院, 教授, philipyuan007@tongji.edu.cn

1 研究背景与意义

材料智能主义起源于 3D 打印技术拓展的新维度，被定义为“在最佳条件下对环境变化做出反应，并根据这些变化表现出自身功能的材料”^[5]。通常情况下，对 3D 打印的材料进行预先编程，就能使其具有感知外部环境刺激并响应的智能^[6]。智能材料的研究促使对工程业、制造业、医药业、航空业等领域的传统产业链发展的重新构想^[7]（图 1）。在建筑领域，受水在生物系统中作用的启发，Neri Oxman 与麻省理工学院合作研发了 Aguahoja 项目，由可编程水基生物复合材料与再生生物材料打印而成，能够对外界热量和湿度的变化作出智能反应^[8]。



图 1 智能材料的运用（图片来源：作者自绘）

智能材料与 3D 打印技术的兼容增强了复杂、多功能和定制化产品的性能^[9]，在未来市场中占据了主导地位。阿迪达斯利用 Carbons 专有的数字光合成技术，用热塑性聚氨酯弹性体材料制作了创新的 3D 打印鞋底，实现了更薄、更弹的运动性能。此外，为了满足人体工程学原理，OECHSLER 公司设计的 3D 打印背包和鞍座结合 3D 打印技术充分发挥材料的智能。这些产品虽然在一定程度上实现了材料特性的强化，但没有从本质上优化材料属性，因为它们大多是基于形状驱动的方法，而不是通过内部特性生成。

基于图解静力学的理论，Boulic 的研究揭示了在约束系统中，材料的弯曲刚度（EI）是由主动弯曲结构的形状控制参数所主导和影响的^[10]，这一研究启发了一种从结构形态中提取材料特性的设计方法^[11]。基于此研究思路，有学者结合了变密度材与 3D 打印技术，应用于控制材料主动弯曲的研究^[12]。然而，这些研究主要是平面或平直形态的应用，而未能扩展到更复杂的三维非平直非规则形态的结构。

为了进一步研究智能材料对非平面非规则结构性能的影响，本文提出一种编程结构 3D 打印策略，以“Harmony Seat”的设计为例，深入探讨了将人体工程学与 3D 打印编程材料相结合的设计与建造方法，旨在建造具有适应性结构性能的结构体。具体而言，通过改变材料的物理属性对 3D 打印材料进行编程，使其不同位置的抗弯性能能随预设载荷的变化而动态调整。这种基于材料编程的 3D 打印技术不仅在椅子设计中展现出显著优势，也为其他不规则建筑的形态与结构协同设计提供了新的思路与方法。通过智能材料的应用，结构的适应性和效率得到了显著提高，能够更加智能地应对复杂的载荷与环境。这项研究不仅具有理论上的创新性，也在实际应用中展示出了广阔的前景，为未来智能建筑材料和 3D 打印结合技术在建筑和工业设计领域的应用提供了重要且创新的研究意义。

2 研究方法与技术

2.1 结构力学模型

早期的形态找形方法依赖于建筑师的主观直觉，然后再考虑合适的结构选型。随着计算智能研究的不断深入，结构形态学理论的出现为探索建筑结构与形式之间相互依存的关系提供了新的视角^[13]，设计思维的重心开始向结构力学模型偏移。

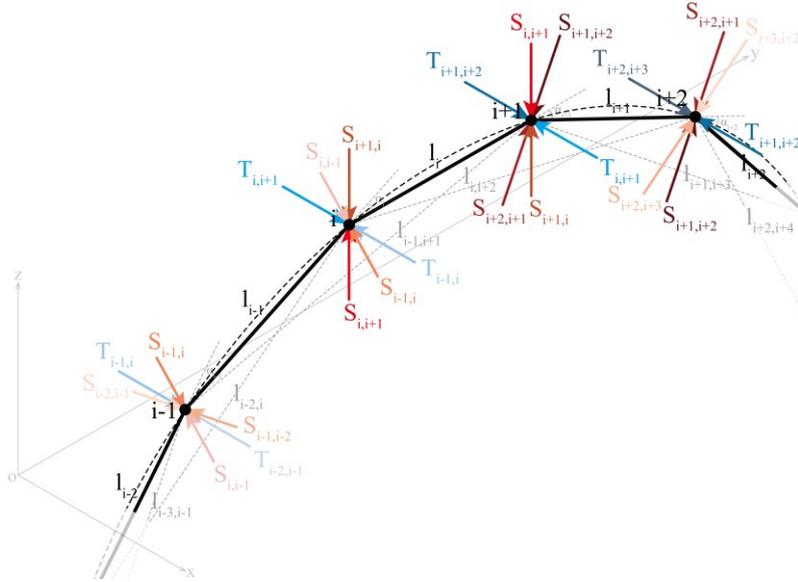


图2 弯曲结构的空体内力模型（图片来源：作者自绘）

基于图解静力学的原理，M.R. Barnes 构建了弯曲结构的节点力模型（图 2），将弯矩转换为作用在同一节点上的一对剪力^[14]，并遵循以下公式的计算。这种研究方法不仅使得弯曲结构的受力分析变得更加直观，还为建筑师对结构受力提供了一种更加便捷的计算方法，这为后续的结构分析和优化提供了可靠的理论基础。

$$S_{i,i-1} = (EI)_i \frac{2 \sin \alpha_i}{l_{i-1} \times l_{i-1,i+1}}; S_{i,i+1} = (EI)_i \frac{2 \sin \alpha_i}{l_i \times l_{i-1,i+1}}$$

其中：

$S_{i,i-1}$ 和 $S_{i,i+1}$ 指施加在节点 i 上的两对剪力的大小；

α_i 指节点 i 相邻两条线形成的角度大小；

l_{i-1} 指节点 $i-1$ 和节点 i 之间的线段长度；

$l_{i-1,i+1}$ 指节点 $i-1$ 和节点 $i+1$ 之间的连线长度；

$(EI)_i$ 指节点 i 处的抗弯刚度。

当载荷作用于结构表面时，通常会用有限元分析法建立力学模型，对表面进行离散化处理。建立力学模型的目的是定量描述结构在不同载荷作用下的变形和应力分布，从而计算材料的抗弯性能，即材料在承受弯曲应力时抵抗变形和破坏的能力，是力学模型中的一个重要参数。

2.2 材料抗弯性能

一般的均质结构表现出统一的各向异性，但可以通过改变材料的厚度来改变不同区域的材料弹性^[15]。研究表明，层厚、填充比例和热处理是 3D 打印结构中较关键的参数^[16, 17]。结构的弯曲性能由材料的杨氏模量 E 和横截面的惯性矩（统称为 EI ）决定。对于结构复杂的系统，通常采用加权平均法计算近似 EI ^[18]。

$$EI = \sum_{i=1}^n E_i \left(\frac{b_i h_i^3}{12} + (y_i - y_0)^2 \times b_i h_i \right)$$

其中

E_i 、 b_i 和 h_i 分别表示截面第 i 部分的弹性模量、宽度和高度；

y_0 指整个截面中性轴的位置。

在材料科学中，材料的弹性模量和密度之间通常呈正相关。一般来说，在密度较高的材料中，原子或分子之间的相互作用更为紧密，在外力作用下变形的阻力更大，因此弹性模量更高。因此，材料抗弯性能的变化可以引导材料密度的重新配置，从而重组材料的物理特性。

2.3 机器人 3D 打印

在建筑领域，3D 打印通常需要更大的规模与更高的精度，而机器人数字化技术可以高效地适配这些要求。工业机械臂装配 3D 打印技术能够提高操作范围，与市面上的桌面级 3D 打印机相比，表现出更大的灵活性^[19]，在智能建造领域得到了广泛和创新的应用。在更加流畅的有机形态和日益复杂的结构建造中，使用机械臂作为增材制造工具对于优化复杂部件的构造和增强结构强度至关重要^[3]。

机械臂 3D 打印的核心问题是路径优化，其中一个关键因素是最大限度地减少通过次数，这就需要每个打印对象进行一次性通过的连续路径规划^[20]。通过算法设计，其中一种打印路径是遵循任意方向和平行线之间分离的连续混合之字形或等高线模式（图 3），这为填充二维平面的多边形提供了一种可能的方法^[21]。

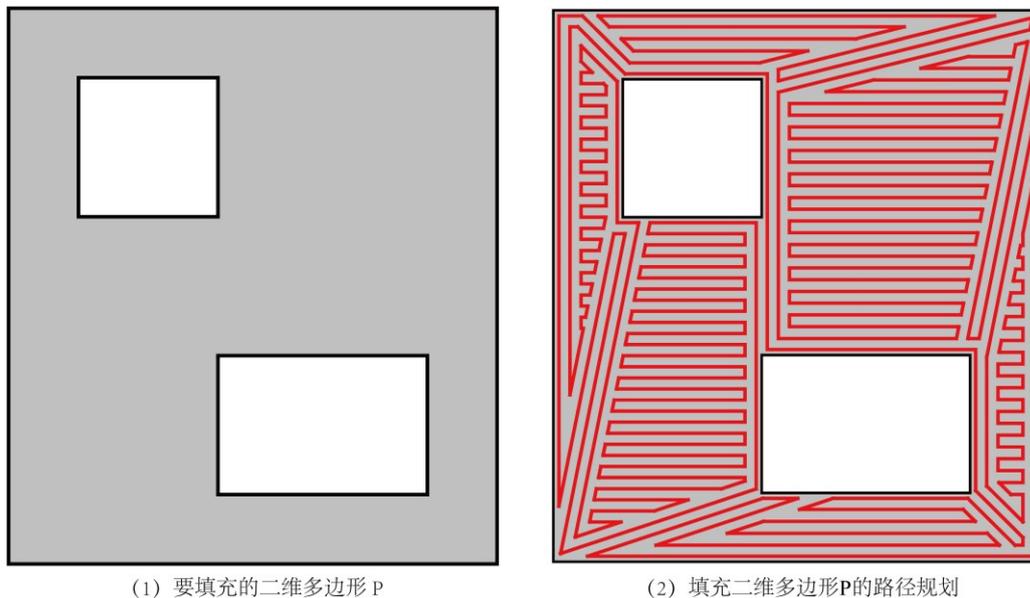


图 3 机器人 3D 打印的路径规划方法（图片来源：作者自绘）

机器人路径规划的目标是在给定的封闭有界二维多边形 $P \subset R^2$ 内找到一个封闭连续的点序列 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n \in R^2$ ，使路径既封闭又不相交。

$$P \subset R^2; P_1, P_2, P_3, \dots, P_n \in R^2$$

3 设计策略与方法

对椅子结构进行编程，以适应不同的人体坐姿，是实现智能的关键。这一过程的核心是将人体对椅子表面施加的负荷转换为可计算的材料弹性性能，并通过变密度 3D 打印来实现建造。具体步骤如下（图 4）：

- 1、提取椅面和椅背的表面结构线；
- 2、对人体施加在椅面和椅背上的载荷进行受力和计算，得出表面上每个位置的不同 EI 值，以量化材料的抗弯性能；
- 3、每个位置 EI 值转换成材料密度，密度变化通过 3D 打印的 Voronoi 图案疏密变化实现。

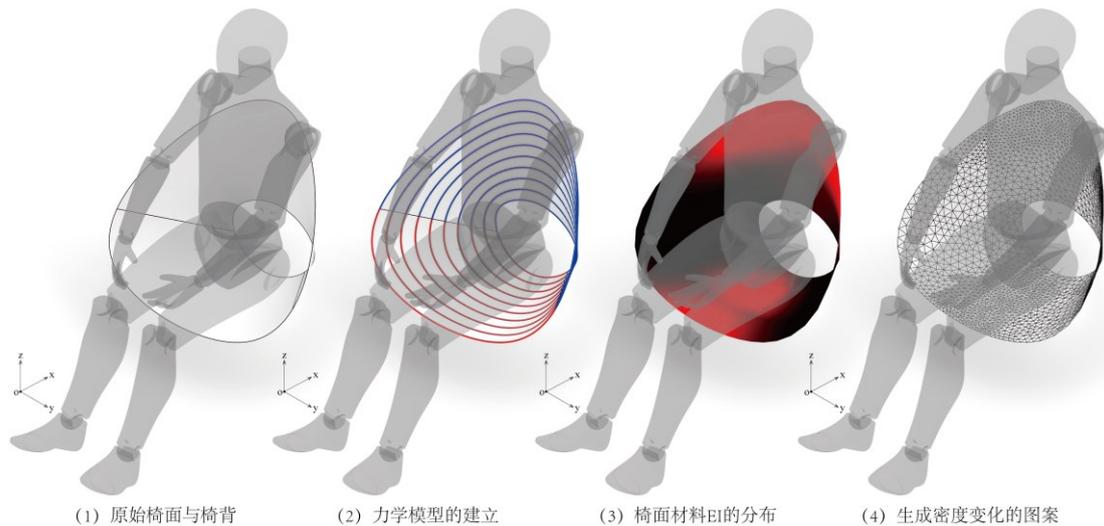


图 4 结构编程流程（图片来源：作者自绘）

3.1 可控结构性能设计

与传统的结构拓扑优化前瞻性方法不同，本文创新性地提出结构编程设计方法，根据不同位置不同荷载所需要的结构性能生成响应式的智能结构体。结构形态与物理属性密切相关，改变材料的密度可以控制每个位置截面的惯性矩，导致不同位置的抗弯性能发生变化，从而创造出更加高效的结构形态（图 5）。

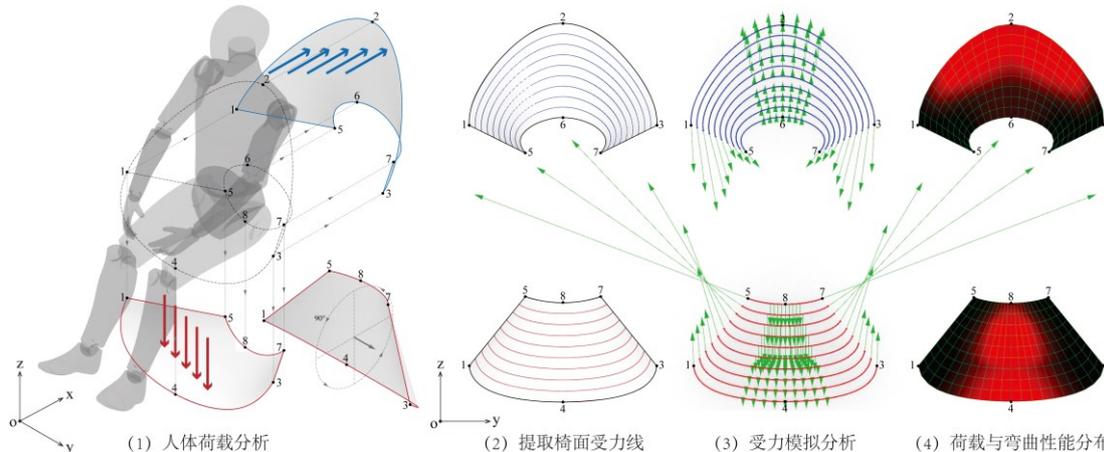


图 5 人体荷载下建立结构力学模型的过程（图片来源：作者自绘）

对结构受力有限元分析，受力表面被离散化为多个平行的受力杆模型，每个模型的受力情况相同，两端受支撑，中心区域承受人体荷载产生的拉力，受力区域对应于人体与椅子的接触面。通过图解静力学的计算分析，不同位置的不同荷载相应产生不同的抗弯性能，其大小和分布可通过定量的 EI 值直观地反映出来。

3.2 材料密度编程设计

通常情况下，改变材料的宽度或厚度可以改变密度^[22]，从而控制结构形状的曲率。在此基础上，一些学者尝试用参数化的图案对材料的内部图案化处理，再通过激光切割来改变结构的弯曲刚度^[23]。然而，这些研究都是在预设目标曲线范围内不断调整材料的密度，以达到预设的形状曲率，而不是通过材料内部密度的变化产生相应的具有结构美学的形状。

通过分析力在结构内部的传播，可以计算得出最佳的结构形态与配置，从而在最大限度地提高结构强度和稳定性的同时，减少材料的使用。本文提出了一种自上而下的材料弹性编程设计策

略，通过预设荷载生成材料的 EI 值，然后将其映射到材料的密度变化上，从而指导参数图案的设计（图 6）。建立力学模型可以更加直观地分析整体结构中各种荷载与力矩的分布情况，从而更准确地模拟结构对外加荷载的响应情况。在椅面的力学模型中，受力面均匀地被一系列计算点标记，在施加人体荷载后可以计算得到这些计算点的相应 EI 值。这些不同的 EI 值代表了这些计算点所在位置适应该处荷载所需要的挠曲刚度，其中弹性模量 E 是材料刚度的量度，表示材料在给定载荷下的变形程度，惯性矩 I 是一种几何属性，反映了横截面积分布情况，两个属性共同作用影响结构的抗弯能力。

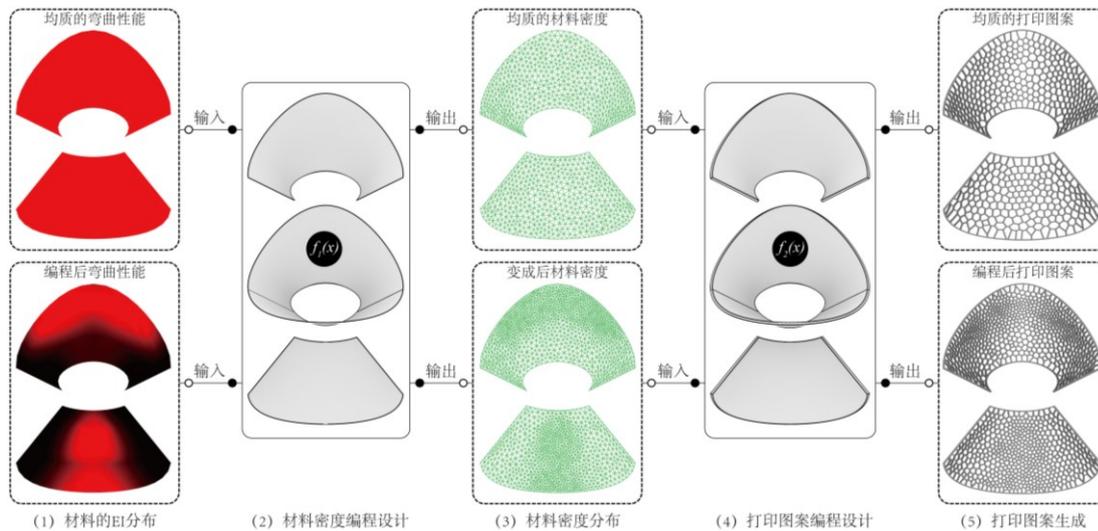


图 6 结构编程流程（图片来源：作者自绘）

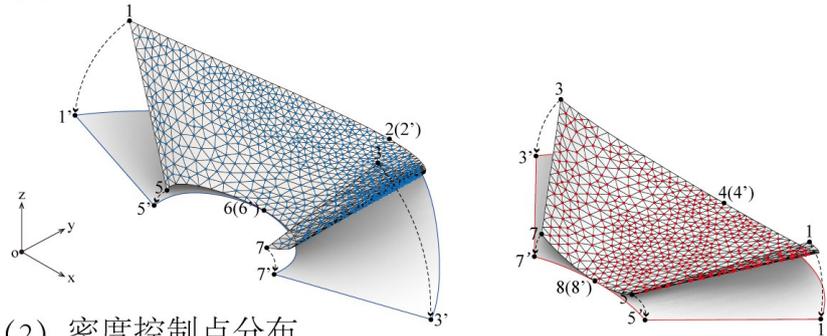
3.3 图案驱动的 3D 打印方法

基于数字自然主义（Digital Naturalism），大量学者不断拓展 3D 打印中材料智能的研究边界，出现了 4D 打印的概念，一种需要在打印前对材料进行编程的技术。可编程 4D 打印是一种创新的增材制造技术，一般通过对 3D 打印控制参数进行编程来改变三维结构的弯曲角度，从而控制定制化柔性结构的自弯曲行为^[24]，其中最常用的方法是图案驱动法。

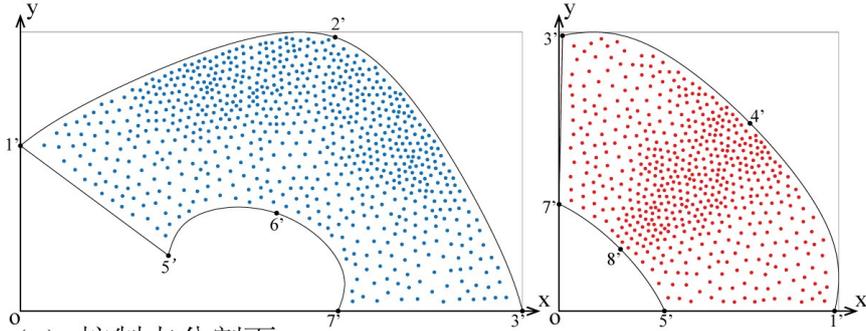
在 3D 打印的填充图案设计中，Voronoi 图案模式经常被用来增强物体的结构强度与美感。Voronoi 图案是一种基于密度的图案生成方法，它将平面分割成多边形区域，每个区域以一个密度点为中心，确保每个点到最近密度点的距离值最小。基于这种方法，用 Voronoi 图案填充 3D 打印物体可以最大限度地减少材料用量，同时也能保持足够的结构强度。

图案驱动的 3D 打印生成法可以确保材料抗弯性能的控制精度，并将参数输入给数字 3D 打印平台中建造出准确的实体。通过这种方法将结构编程后的椅子表面生成 3D 打印模型分为以下步骤（图 7）：首先，为提高 3D 打印效率，将椅面和靠背的三维表面展开成快速打印的二维平面；然后，根据材料的 EI 值分布提取密度点，并在每个点周围生成 Voronoi 图案；最后，根据打印材料的弹性模量计算出结构厚度，生成最终的 3D 打印模型。

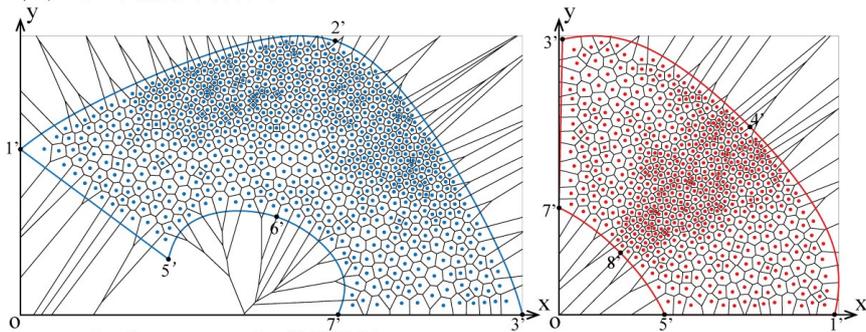
(1) 展开曲面



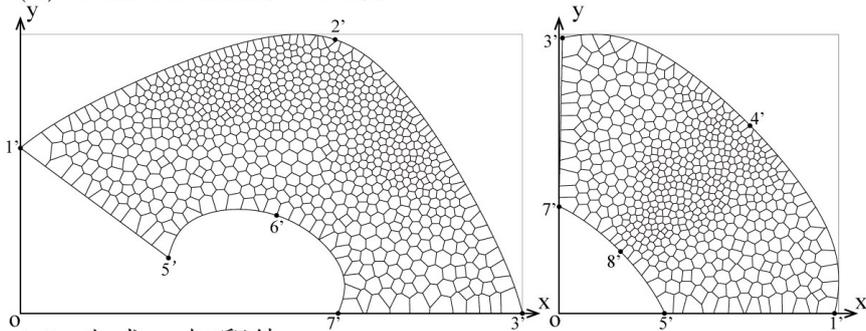
(2) 密度控制点分布



(3) 控制点分割面



(4) 生成Voronoi打印图案



(5) 生成3D打印体

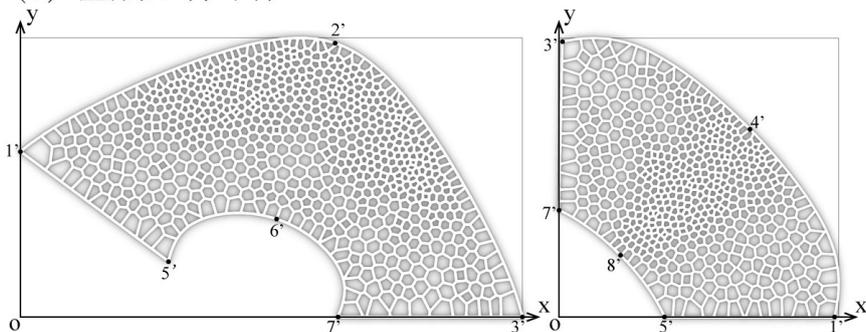


图7 图案驱动的3D打印体生成图解 (图片来源: 作者自绘)

4 案例设计与说明

本文以“Harmony Seat”椅子设计为例，将所提出的适应性编程结构与人体工程学相结合，设计一种智能化的轻质结构椅，用于数字化 3D 打印快速建造，满足适应不同个体的需求（图 8）。椅面与椅背的结构性能随着打印图案密度的变化而变化，达到最适合人体荷载的平衡。通过 3D 打印数字建造平台，设计参数与实际建造完美融合，消除虚拟与现实的误差，共同作用生成一种能够根据人体体型与坐姿差异自动调整结构性能的椅子设计。

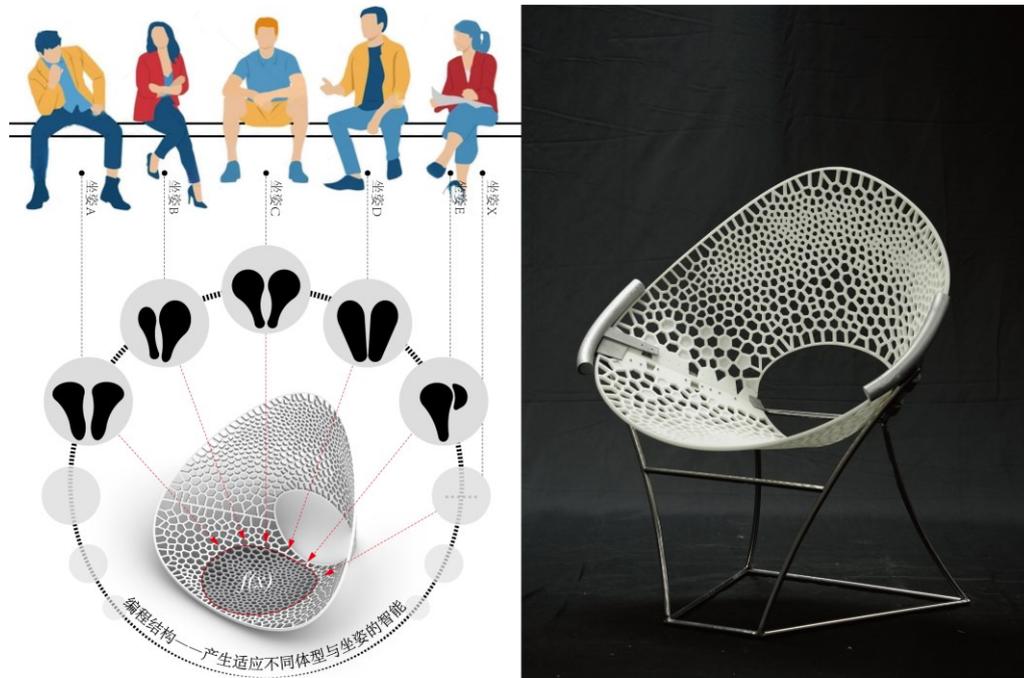


图 8 “Harmony Seat” 椅子设计概念与成果照片（图片来源：作者自绘）

基于数字自然主义，数字设计与建造的无缝整合打破了虚拟与现实之间的壁垒。计算设计、数字建造与实验测试形成了一个循环一体的过程，提高了建造的精度和效率（图 9）。在数字化设计阶段，人的荷载被转化为可计算的结构编程参数，指导生成用于 3D 打印的图案设计。计算设计的参数作为输入信息输入给机器人数字建造平台，打印出与设计完美契合的实体模型。最后，通过不断的实验测试和反馈调整，对初始计算设计参数进行优化，以增强设计模拟与实际建造之间的拟合度。

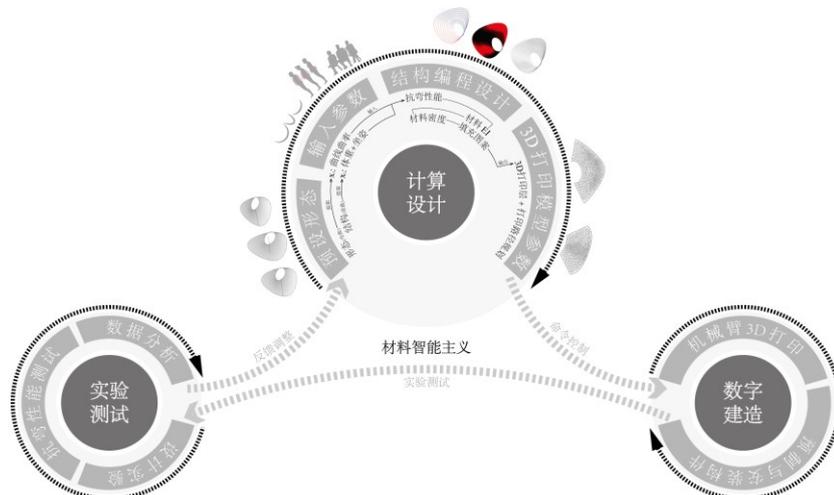


图 9 计算设计、数字建造与实验测试的过程（图片来源：作者自绘）

4.1 计算性设计阶段

首先，建立人体与椅子结构的力学模型，提取不同体重与坐姿作用在椅面与椅背上的预设载荷。通过图解静力学的分析，系统地计算出不同荷载条件下不同位置所需的材料 EI 值，根据这些 EI 值指导打印体表面的 Voronoi 图案设计。图案的疏密变化映射打印材料的密度变化，从而满足适应性结构性能设计的预设要求（图 10），形成一个完整、连贯的计算性设计流程。

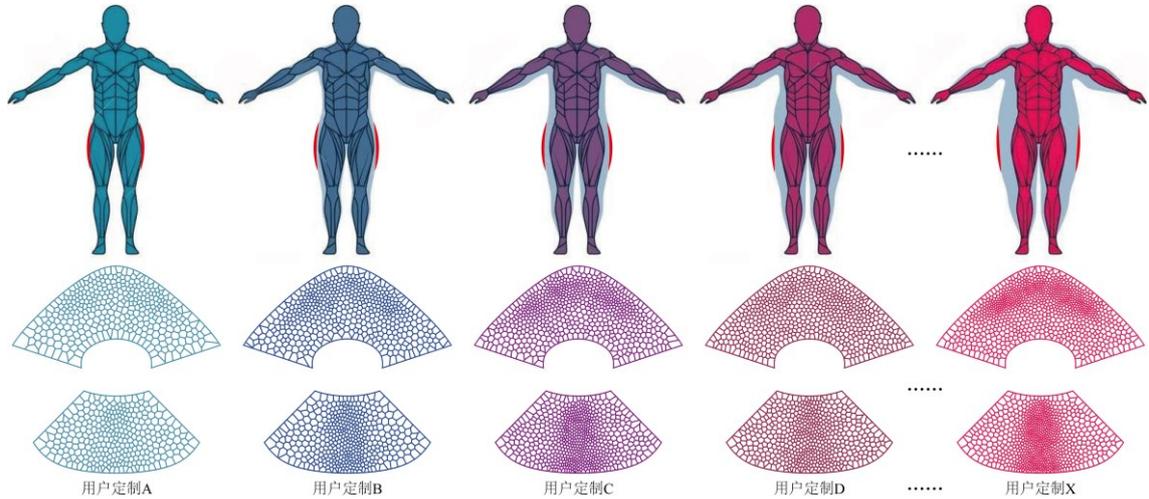


图 10 根据不同的人体与坐姿生成的定制化椅面和椅背（图片来源：作者自绘）

除了主要的控制参数预设载荷外，编程材料的图案疏密分布在一定程度上也受到三维曲面曲率的影响。这就确保了机械臂打印的精密设计的二维图案物体可以通过人工精确地弯曲成预设的三维形状。在二维平面上打印物体，然后通过外加刺激改变材料的物理特性，将其转化为预设三维形态的 3D 打印策略（图 11），大幅提升了智能建造的效率。基于不同材料的抗弯刚度不同，用户可以根据自己的偏好定制材料的组合（图 12），但不同杨氏模量会影响结构设计的厚度，本次设计采用的打印材料是 PET，杨氏模量和剪切模量分别为 2.9 Gpa 和 2.2 Gpa。

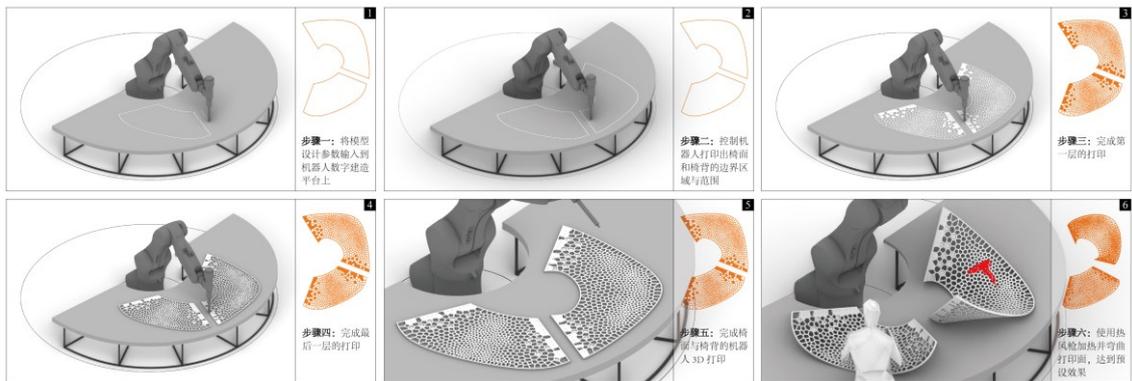


图 11 机器人 3D 打印的模拟过程（图片来源：作者自绘）

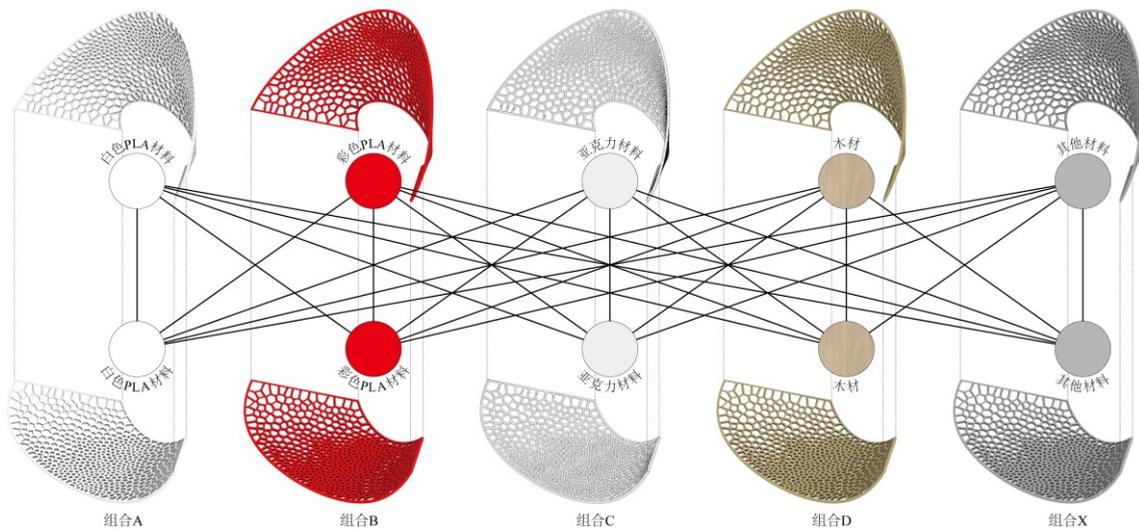


图 12 不同材料的组合（图片来源：作者自绘）

4.2 数字化建造阶段

为了实现工业化大规模生产的目标，计算性设计与建造的协同工作显著降低了传统建造的时间与成本。通过数字化建造的优化与整合，计算拟合出的最优椅面、椅背、椅腿和连接件几个简洁的构件组装成最终的椅子产品（图 13）。在这些组件中，椅腿基于 Karamba3D 受力模拟和 Octopus 多目标优化技术计算出最稳定、最轻便的结构选型——外径 12mm、壁厚 1.4mm 的预制钢管（图 14）。椅面、椅背和椅腿的连接件由金属 3D 打印技术制成，在稳固连接其他构件的同时确保二维平面弯曲而成的三维曲面曲率。

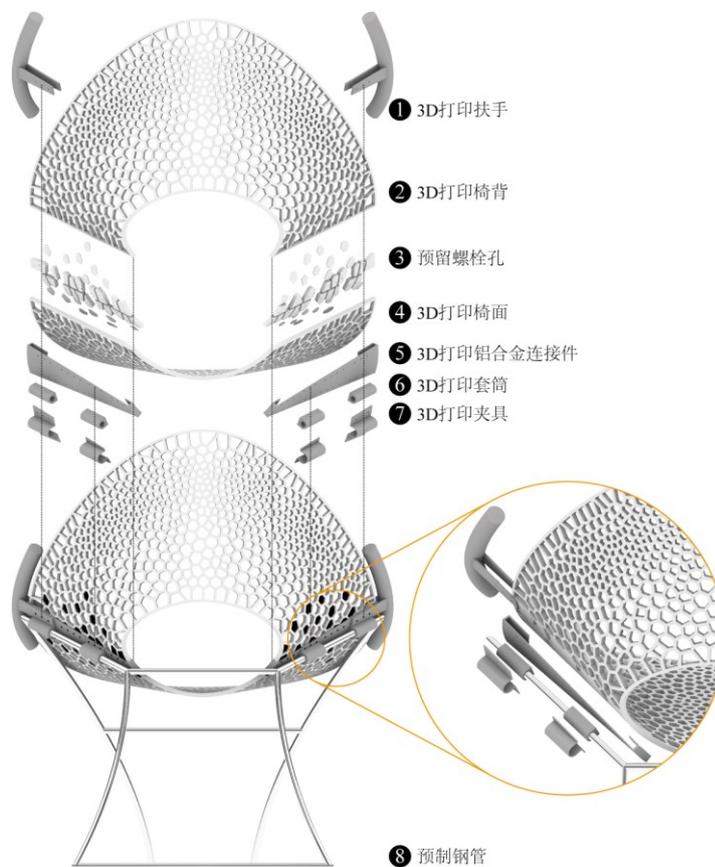


图 13 椅子构件装配示意图（图片来源：作者自绘）

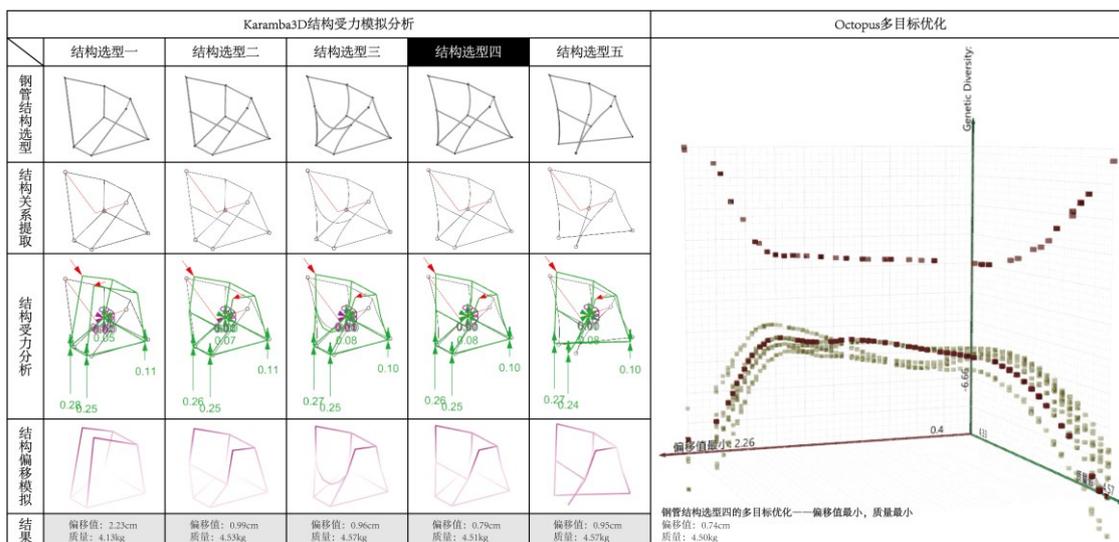


图 14 基于 Karamba3D 模拟和 Octopus 优化的椅腿结构选型 (图片来源: 作者自绘)

装配的过程分为三个简单的步骤 (图 15):

- 1、将铝合金连接件固定在钢管椅腿上。
- 2、用热风枪加热二维打印面，使其产生三维弯曲变形，达到预设的形状。
- 3、用螺钉将椅面、椅背和椅腿连接，将螺丝钉穿过打印面两端预留的螺栓孔和连接件。

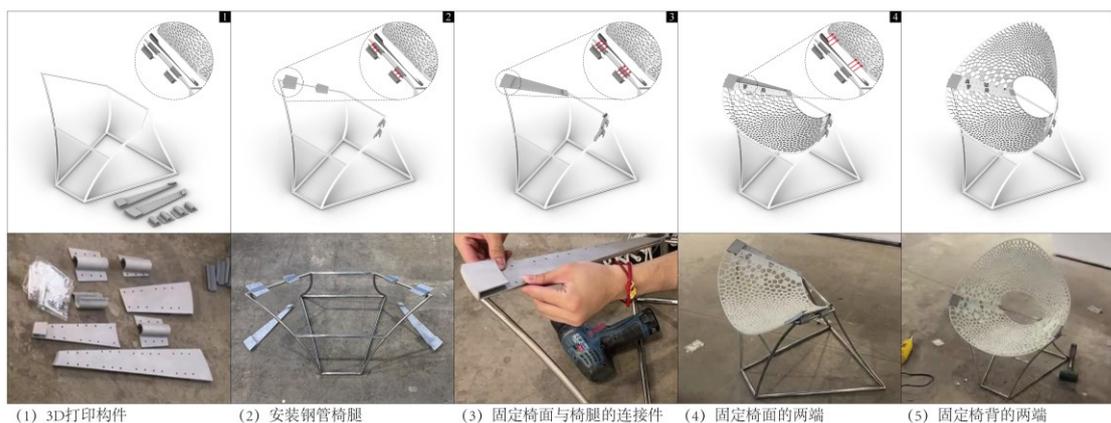


图 15 装配步骤与过程 (图片来源: 作者自绘)

5 研究结论与讨论

实验控制结构材料的密度，基于相同的椅面形状分别打印出全填充的椅面、均匀镂空的椅面和结构编程的椅面。实验结果显示，全填充的椅面承载力最强但重量较大，均匀镂空的椅面重量较轻但承载力稍有下降，结构编程的椅面在重量与承载力之间达到了最佳平衡，表现出优异的力学性能与材料效率。PLA、ABS 等传统材料打印的结构构件耗时耗力，造成建造成本的浪费，本文提出了一种创新的编程材料 3D 打印策略，所设计的结构在不同位置的不同荷载下均表现出最高效的结构性能。从设计到建造全过程结合了多种技术方法，首先基于图解静力学与材料弹性模量公式计算材料在预设荷载下衡量弯曲性能的 EI 值分布，然后将这些值作为输入参数，对 3D 打印材料的密度进行编程，生成参数化 Voronoi 图案，以匹配各种荷载下不同位置所需的结构性能输出结果。这种方法通过改变材料的弹性模量分布指导参数化图案路径，控制结构性能，显著提高了结构效率并降低了材料成本。

以“Harmony Seat”椅子的设计与建造为例验证了所提策略的可行性与实践性，展示了结构性能如何智能地、灵敏地适应人体荷载。编程后的材料弹性会根据预设的人体荷载发生变化，这种变化通过控制打印材料的单位截面宽度实现。最终，数字化机器人 3D 打印技术将数字设计与建造实体无缝衔接。不可避免的是，由于机械臂打印喷嘴的精度限制，结构体无法精确捕捉预期的力学特性，从而导致微小的误差。经实验测试，根据人体荷载编程的结构，其受力模拟和实际差异极小，结果基本一致，表明该方法能有效地将理论模拟转化为实际成果。模拟与现实之间的强相关性验证了本文提出的适应性结构性能设计策略的可行性与可靠性，探讨了精确控制的材料特性满足特定荷载的潜力。

本研究旨在对 3D 打印材料的结构性能进行编程，以适应性地对不规则空间表面上的非均匀荷载，作为数字化时代中材料智能与数字建筑结合的设计实践。在大型建筑构件中，这种非均匀、非常规荷载无处不在，包括时间维度下变化的活荷载。例如，在传统建造过程中，钢筋混凝土浇筑而成的楼板不仅施工复杂，自重很大，还增加了建筑物的总负荷，对基础和支撑结构的要求较高，但实际楼板的板中区、板边区和柱支区所承受的荷载完全不同，通过受力模拟与分析可以改变原本均质的密度属性，拟合出最高效的结构形式，还能通过 3D 打印技术大幅度降低施工难度。因此，本文所提出的可编程结构性能不仅能适应性地匹配各种荷载，在这些荷载的驱动下生成最高效的结构单元，还能将结构美学与经济效益相结合，具有丰富的研究与实践意义。

参考文献

- [1] MATHUR R. 3D printing in architecture [J]. *International journal of innovative science, engineering & technology*, 2016, 3(7): 583-91.
- [2] KLOTZ L E, HORMAN M, BODENSCHATZ M. A lean modeling protocol for evaluating green project delivery [J]. *Lean Construction Journal*, 2007, 3(1).
- [3] BARBOSA W S, GIOIA M M, NATIVIDADE V G, et al. Industry 4.0: examples of the use of the robotic arm for digital manufacturing processes [J]. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2020, 14: 1569-75.
- [4] BERMAN B. 3-D printing: The new industrial revolution [J]. *Business horizons*, 2012, 55(2): 155-62.
- [5] TAKAGI T. A concept of intelligent materials [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1990, 1(2): 149-56.
- [6] LI X, SHANG J, WANG Z. Intelligent materials: a review of applications in 4D printing [J]. *Assembly Automation*, 2017, 37(2): 170-85.
- [7] HALEEM A, JAVAID M, SINGH R P, et al. Significant roles of 4D printing using smart materials in the field of manufacturing [J]. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2021, 4(4): 301-11.
- [8] MOGAS-SOLDEVILA L, OXMAN N. Water-based Engineering & Fabrication: Large-Scale Additive Manufacturing of Biomaterials [J]. *MRS Proceedings*, 2015, 1800: mrss15-2135989.
- [9] ISLAM A, HASAN J, HOSSAIN K R. Intelligent materials in 3D printing: A journey from additive manufacturing to 4D printing [J]. *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*, 2024, 4(4): 2024016-.
- [10] BOULIC L, SCHWARTZ J. Graphic statics principles for the design of actively bent elements shaped with restraining systems; proceedings of the Proceedings of IASS Annual Symposia, F, 2017 [C]. *International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*.
- [11] BOULIC L, D' ACUNTO P, BERTAGNA F, et al. Form-driven design of a bending-active tensile façade system [J]. *International Journal of Space Structures*, 2020, 35(4): 174-90.
- [12] GONG L, ZHOU X, CHAI H, et al. Tailoring Bending Behavior [J].
- [13] LI Q. Form Follows Force: A theoretical framework for Structural Morphology, and Form-Finding research on shell structures [J]. *A+BE | Architecture and the Built Environment*, 2018, 8(2): 1-278.
- [14] BARNES M R. Form finding and analysis of tension structures by dynamic relaxation [J]. *International journal of space structures*, 1999, 14(2): 89-104.
- [15] ZHANG X, LE X, WU Z, et al. Data-Driven Bending Elasticity Design by Shell Thickness [J]. *Computer Graphics Forum*, 2016, 35(5): 157-66.

- [16] TORRES J, COTELO J, KARL J, et al. Mechanical property optimization of FDM PLA in shear with multiple objectives [J]. *Jom*, 2015, 67: 1183-93.
- [17] HANON M M, MARCZIS R, ZSIDAI L. Anisotropy evaluation of different raster directions, spatial orientations, and fill percentage of 3D printed PETG tensile test specimens [J]. *Key engineering materials*, 2019, 821: 167-73.
- [18] JUNQING Z, YUBAO Z, PENG Z, et al. METHODS FOR DETERMINING THE NEUTRAL AXIS POSITION AND STRESS ANALYSIS OF COMPOSITE BEAM 1 [J]. *Mechanics in Engineering*, 2022, 44(1): 184-7.
- [19] RAGHAVAN A, NEETHU P, JOY A. 3D Printing Robotic Arm [J]. *International Journal of Engineering and Management Research (IJEMR)*, 2017, 7(3): 631-4.
- [20] DING D, PAN Z, CUIURI D, et al. A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing [J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2014, 73: 173-83.
- [21] GOMEZ G, CORTÉS C, CREUS C, et al. Generation of continuous hybrid zig-zag and contour paths for 3D printing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119(11): 7025-40.
- [22] HAFNER C, BICKEL B. The design space of plane elastic curves [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2021, 40(4): 1-20.
- [23] RODRIGUEZ E, BONNEAU G-P, HAHMANN S, et al. Computational Design of Laser-Cut Bending-Active Structures [J]. *Computer-Aided Design*, 2022, 151: 103335.
- [24] ZOLFAGHARIAN A, KAYNAK A, KHOO S Y, et al. Pattern-driven 4D printing [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 274: 231-43.