

# 基于 AIGC 的竹椅结构性能化设计与制造全流程方法研究

王世同<sup>1</sup>, 张雨露<sup>2</sup>, 刘一歌<sup>3\*</sup>, 袁烽<sup>4\*</sup>

**摘要:** 近年来随着人工智能的飞速发展, 如何通过生成式设计辅助进行设计决策成为重要议题。竹材作为一种低碳、坚韧的材料, 在建筑以及家具制造上应用广泛。本研究以竹的受弯特性作为基础进行迭代生成式设计; 同时结合性能化分析软件完善结构并规划制造流程; 最后完成设计到制造全流程。研究表明人工智能技术结合性能化分析, 可以实现计算性创新设计与实际建造的有机结合, 实现了人工智能从设计到制造的全流程参与, 为竹材生成式设计的创新提供了新思路。

**关键词:** 竹椅; 人工智能; 生成式设计; 性能化设计; 设计制造全流程

**Keywords:** Bamboo chair; Artificial intelligence; Generative design; Structural performance-based design; The entire design and manufacturing process

**资助项目情况:** 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”项目: “图解静力学设计与机器人建造耦合的绿色木构建筑体系研究”, 项目编号: 2022YFE0141400

## 引言

作为一种重要的森林资源, 竹子的生物量巨大并广泛应用于人类的日常生活, 其生长周期短、高受拉、重量轻、绿色可持续等特点使其成为结构材料的重要组成部分<sup>[1]</sup>。在全球变暖的大背景下, 逐渐从不可再生和高度工业化的材料过渡到自然、可持续、可再生的材料是实现平衡可持续发展的必要条件, 竹材因此成为了未来可持续材料的重要选择<sup>[2]</sup>。

近年来, 随着人工智能技术的飞速发展, 基于数据驱动的生成式设计在设计决策中扮演着越来越重要的角色<sup>[3]</sup>。通过生成式设计软件, 设计师可以迅速创作出一系列的作品。然而在具体到产品的生产的过程中, 人工智能所生产出来的作品可能存在结构缺失、拓扑关系混乱等问题, 需要设计师参与到生成式设计流程中进行遴选和改造<sup>[4]</sup>。在此背景下, 袁烽等在 2022 年提出了“意图—生形—模拟—迭代—优化—制造”的新流程<sup>[5]</sup>。该流程结合了生成式设计和性能化分析, 使得人工智能能够全面参与设计和制造过程, 为设计创新提供了新的思路和方法, 数字工具为设计赋能, 成为设计师灵感的重要来源。

本研究以竹材受弯特性为基础, 采用生成式设计与性能优化相结合的方法, 探索了竹椅设计制造的全新路径。在生成式设计方面, 本研究依托 FUGenerator 平台展开; 在性能分析与优化方面, 本研究重点分析优化了竹弯曲支撑和竹椅底座结构, 使用主动弯曲结构实现曲线形态, 减少复杂连接件需求, 优化整体形态; 在制作安装方面, 通过机械臂协作的方式完成整把椅子的装配。综上所述, 本研

<sup>1</sup> 王世同, 同济大学建筑与城市规划学院, 研究生

<sup>2</sup> 张雨露, 同济大建筑与城市规划学院, 研究生

<sup>3</sup> 刘一歌, 同济大建筑与城市规划学院, 助理教授

<sup>4</sup> 袁烽, 同济大建筑与城市规划学院, 教授

究使用人工智能技术结合性能化分析，不仅实现了从设计到制造的全流程创新，还为竹材设计提供了新的视角和方法。这一研究成果展示了人工智能在设计领域的巨大潜力，为未来的设计创新提供了坚实的理论基础和实践经验。

## 1 方法

本研究利用生成式设计和性能优化相结合的设计方法，人机协作的制作方法，探索了竹椅设计制作的新路径。生成式设计部分依托 FUGenerator 平台展开，该平台基于 Diffusion Model、CLIP、GAN 等多种算法，支持小模型训练和多种生成应用。其优势在于主流大模型辅助设计师训练小模型，并通过设计师与平台的交互控制生成结果，使生成过程可控并具有辨识度。在性能分析与优化方面，本研究重点分析优化了竹弯曲支撑结构，使用主动弯曲结构实现曲线形态，减少复杂连接件需求，优化整体形态。

### 1.1 生成式设计

本研究生成式设计部分依托 FUGenerator 平台展开，FUGenerator 平台基于 Diffusion Model、CLIP、GAN 等多种算法模型，支持小模型训练、文生图、图生图、图生模型、控制生成等多种应用场景。该平台以设计师工作流程为基础，支持对一张图进行连续不断优化。与其他主流图像生成平台相比，FUGenerator 具有以下优势。1) 采用大模型辅助设计师自己训练的小模型的生成方式，生成结果具有辨识度。2) 设计师与平台交互主导 AI 设计迭代过程，生成结果可控。在此过程中，AI 与建筑师相互启发，对生成目标进行迭代渐进优化，适配不同任务需求。

#### 1.1.1 训练集标注

为实现生成结果符合弯曲意向。FUGenerator 小模型需要进行指向性标注，使得竹的弯曲形态和竹椅形态相结合。具体而言需要训练多个小训练集，从竹材弯曲状态到一般竹椅形态分步的具有指向性的修改优化同一张意向图片。通过这些标注数据，可以提高生成后图像的精度和稳定性。

#### 1.1.2 分步迭代

FUGenerator 在交互方式上整体采用了“训练—模型推理—生成—结果优化—训练”的循环策略。用户在用 AI 进行图像生成后，根据对结果的判断指导语义的调整优化，将上一步的生成结果重新输入 AI，进行模型推导，从而完成一次迭代，在迭代每一步的过程中，设计师均可以根据个人倾向性进行修改。此外 FUGenerator 将图像输出的过程细分为多个节点，每一个节点都可以回溯，设计师可以追溯每一个节点使得最终生成的图像控制更为精确<sup>[6]</sup>。

### 1.2 结构性能分析与优化

竹材因为其天然的强度和韧性是一种理想的用于制作曲线形态家具的材料。这种曲线形态可以通过主动弯曲结构(Bending active structure)来实现。主动弯曲结构被定义为一类利用直线或平面元件的弹性形变来实现弯曲几何形状的轻量结构原件<sup>[7]</sup>。在竹椅设计中，利用主动弯曲结构可以减少对复杂连接件和固定装置的要求从而简化制造过程。这种结构设计需要考虑竹材的弹性模量和屈服强度，以确保在受力的过程中不会发生断裂。

竹材作为一种复合材料，需要通过数值模拟和实验验证，确定竹材在不同的弯曲半径和支撑点位下的变形行为。传统的找形方法不能够直接得到形状的平衡状态，为了实现形态的精确控制，必须进行冗长而低效的迭代尝试<sup>[8]</sup>。本研究采用形式驱动的方法进行性能分析优化，以生成式设计的最终形式作为输入参数，以弯矩绝对值大小作为输出值，以特定弯曲半径的竹条进行模拟，得到其应力分布

和弯矩高点位置。通过调整支撑点位的位置和数量，可以优化竹椅的整体形态和结构性能。

在形式驱动方法中，对初始目标弯曲曲线进行离散化处理。在平衡状态下将所有机械力作用到节点上，弯曲产生的弯矩转化为作用在此节点上的一对剪力，剪力分别为<sup>[9]</sup>：

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

变量说明（图 1）：

$S_{i,i-1}$ 和 $S_{i,i+1}$ 表示节点  $i$  处施加的两对剪力大小。

$\alpha_i$ 表示与节点  $i$  相邻的两条直线所形成的互补角大小。

$l_{i-1}$ 表示节点  $i-1$  与节点  $i$  之间的连线长度。

$l_{i-1,i+1}$ 表示节点  $i-1$  与节点  $i+1$  的直线长度。

$(EI)_i$ 表示节点  $i$  处的抗弯刚度。

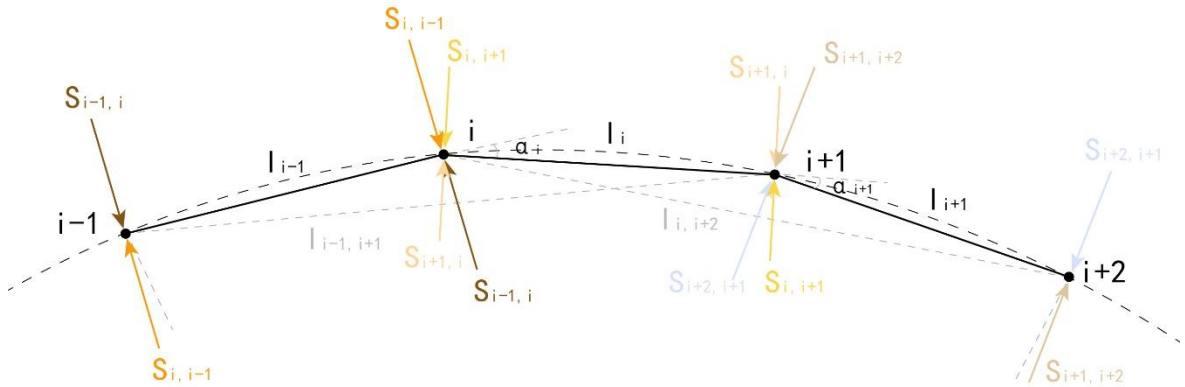


图 1 弯曲构件内力图（来源：作者自绘）

在力图平衡后，可依据算出在给定荷载下的各点的弯矩绝对值大小。

### 1.3 人机协作

在制造过程中，如何精确地把握竹材弯曲的精准形态是一个重要挑战，传统的手工操作难以达到高精度和高一致性的要求，因此本研究采用了人机协作的模式，即设计师与机械臂共同工作。这种协作不仅能够确保竹材在制作过程中的每一步弯曲曲率都能符合预期设计，提高制造效率和产品质量<sup>[10]</sup>。

在本研究中，机械臂被用于竹材弯曲的关键步骤。首先，设计师通过生成式设计软件创建初步设计，并利用性能优化软件进行分析和调整，以确定最佳的弯曲路径和形态；接下来，这些设计参数被输入到机械臂的控制系统中。机械臂根据这些参数，精确地对竹材进行弯曲操作，确保每一个弯曲点的曲率和位置都与设计一致；机械臂弯曲竹条的过程中，人工辅助机械臂进行固定、安装等精细化的操作，同时依据机械臂完成的初步弯曲结果进行下一步的调整，实现从设计到制造的无缝衔接。

## 2 实验展开

### 2.1 生成设计与性能分析并行的策略

生成设计与性能分析并行是精准的控制设计以达到设计需求与结构性能吻合的关键。本文提出了生成式设计与结构性能优化同时生效的双流程（图 2）。

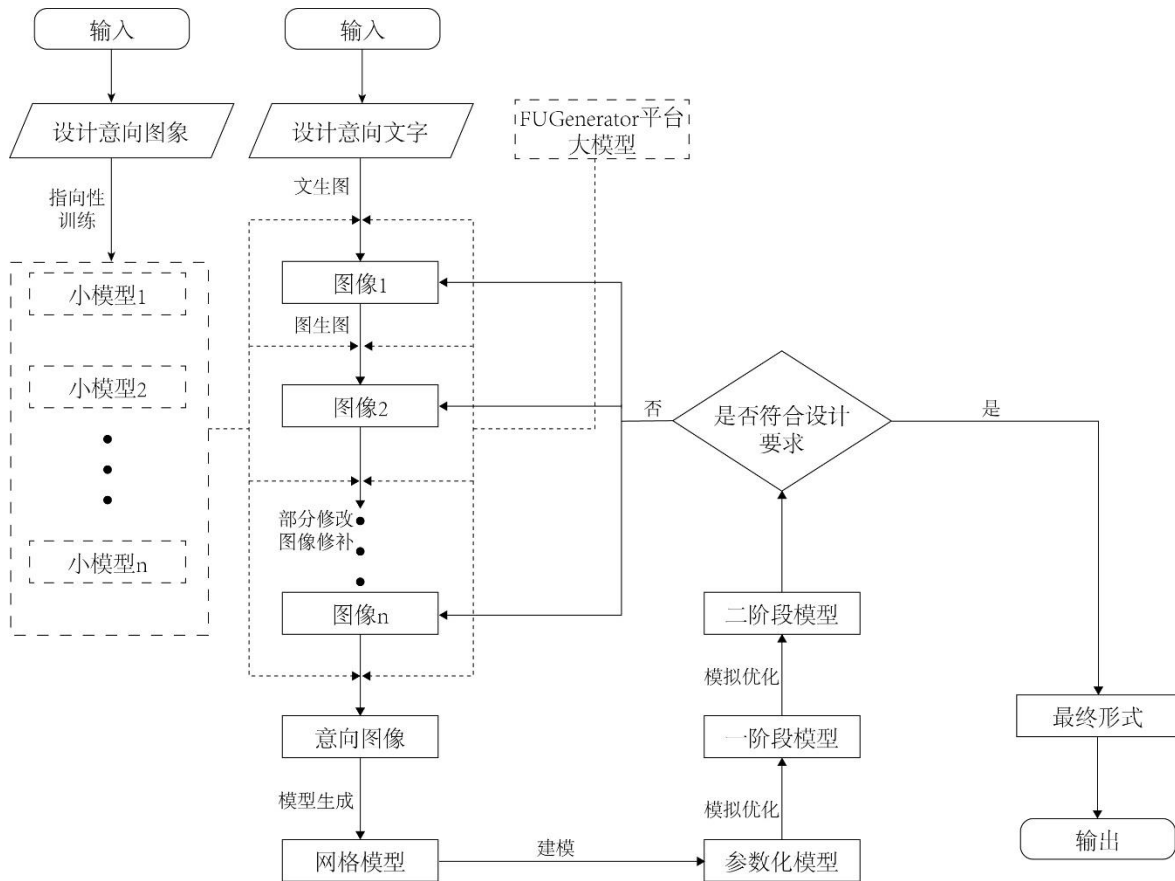


图2 双流程图（来源：作者自绘）

### 2.1.1 生成式设计方案

生成式设计的关键在于小训练集的指向性标注和分步迭代的设计流程。本研究提出了一种分步骤的生成式设计方案，将图片生成分为四个主要步骤，每个步骤对应一个小模型，从而逐步生成最终的设计图像并生成网格模型。具体而言：

- 1) 从竹的弯曲形态出发，选择“竹”在风中的弯曲形态作为语义生成的附加模型，确保了初始形态具有自然和谐的美感，得到基础的曲线形态作为后续图生图基础。
- 2) 结合第一步生成的基础曲线形态，使用“竹椅”小模型，通过图生图的方法生成具有竹制品风格的椅子形态图像。该步骤的重点在于将曲线形态与椅子的结构设计相结合，使生成的图像既具有竹的自然美感，又符合椅子的功能性需求。
- 3) 结合第二步生成的图像，附加“材质纹理”小模型，通过局部修改的方式生成意向图像。这一过程主要是在椅子形态图像的基础上，增加具有竹条风格的纹理，使设计更具细节和真实感。
- 4) 最后一步修补意向图像，附加“竹椅结构”小模型，完善椅子的结构设计细节，确保其结构合理且具有实际建造可能性，生成最终的图像。

得到最终的图像后，使用 FUGenerator 模型生成功能生成网格模型，依照网格模型参数，对设计成果进行进一步的建模。生成方案的流程如图（图3）所示。

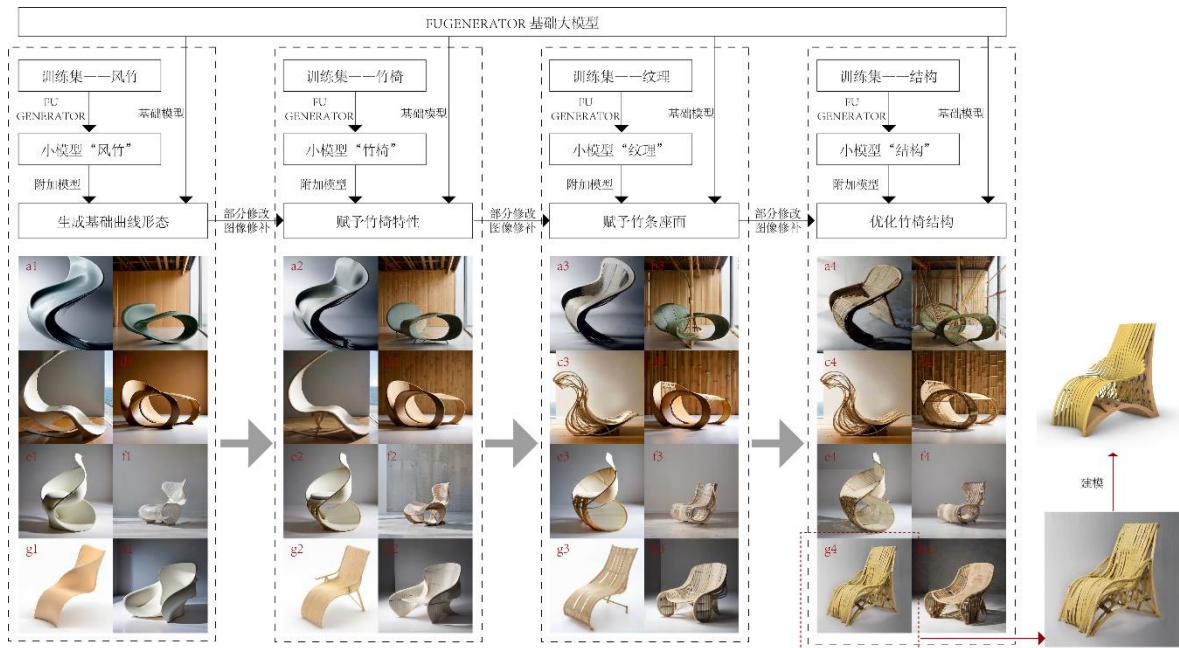


图 3 生成式设计流程图（来源：作者自绘）

### 2.1.2 性能分析优化

本文对生成式设计方案进行了筛选，选择了 g4 图像作为进一步深化的基础。在建模过程中，我们将其分为椅面和座椅支撑结构两部分。椅面部分由十三根弯曲竹片组成，而支撑部分则以圆形竹棒作为主要构件。竹片作为一种均质材料，其弯曲效果取决于支撑位置。然而，现有模型中的支撑结构过于复杂，不利于安装，因此需要对其进行优化。首先，在理想条件下对竹条弯曲行为进行了研究。以 7 号竹条为例，模拟结果显示如图所示。以曲线展开左端点作为零点，可以观察到弯曲竹条存在两个弯矩大小的高点，分别位于距零点 387.5mm 和 1138.7mm 处。采用相同的方法，我们得到了所有竹条的弯矩高点数据（图 4）。

在优化过程中依据模拟数据，主要支撑集中在弯矩高点位置。这样，不仅能够有效支撑竹片，同时还可以简化支撑结构，从而提高安装便捷性和整体结构稳定性。优化的剖面结果如图所示。

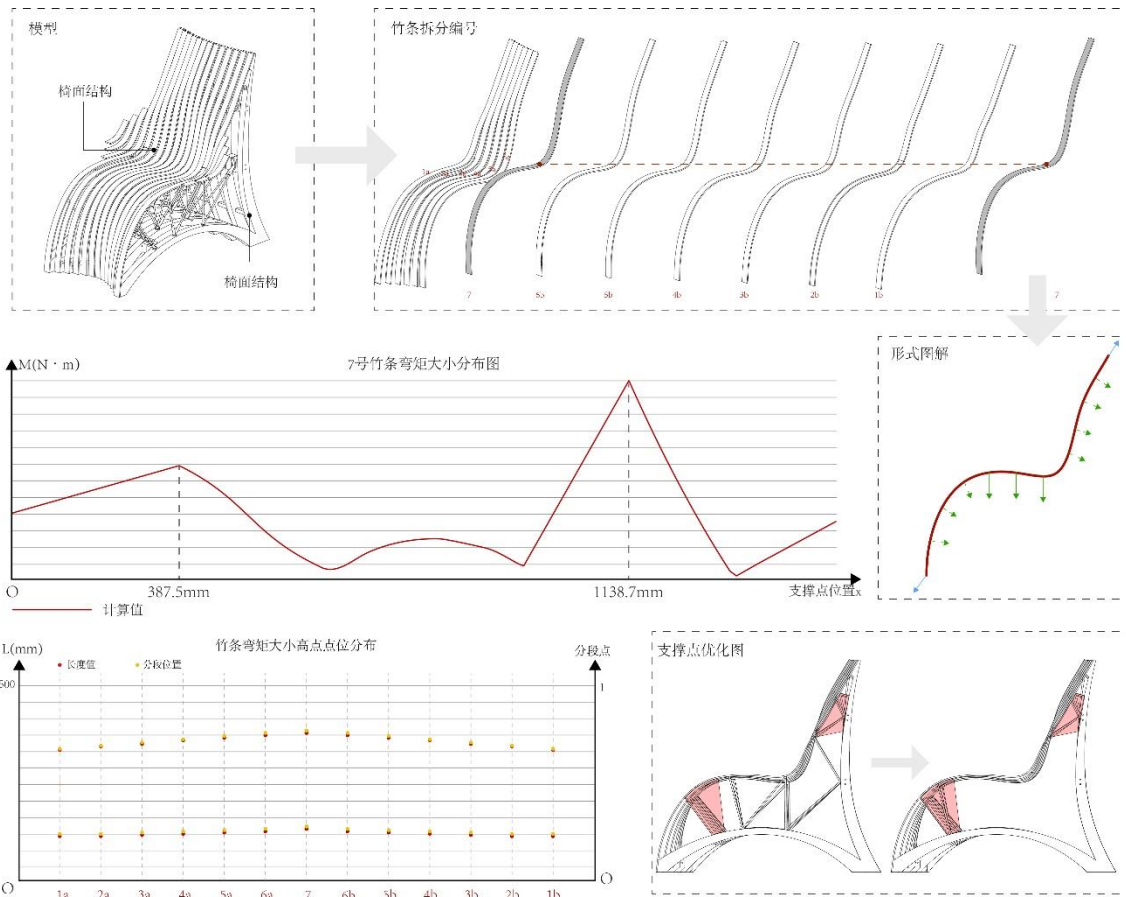


图4 性能优化流程图（来源：作者自绘）

### 2.1.3 建模、修改、评价

在性能化设计优化剖面结果基础上，将优化的剖面结果重新引入生成设计流程，以便进行新一轮的优化修改，重复建模—修改—评价流程，最终得到如图所示支撑优化方案（图5）。

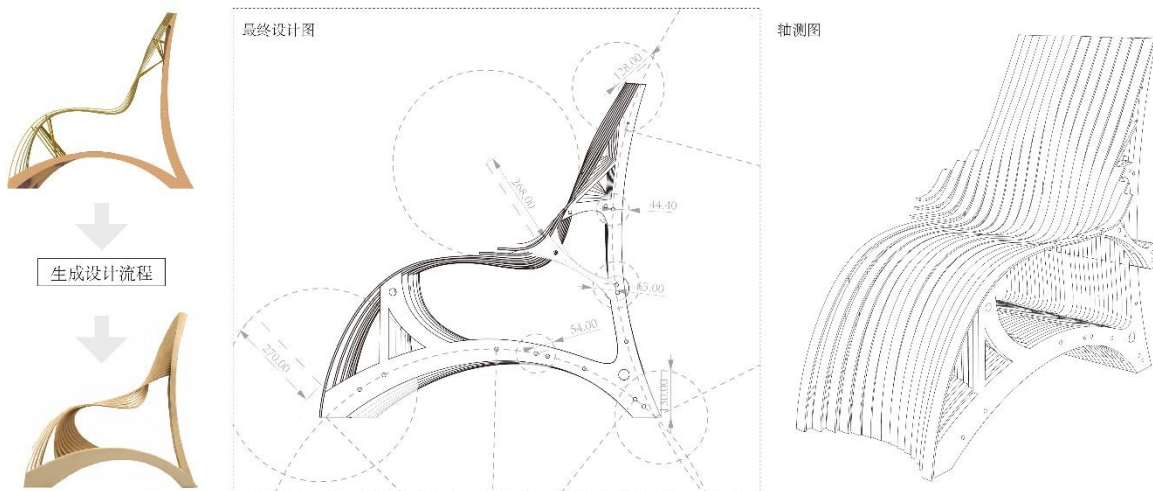


图5 最终设计图（来源：作者自绘）

整个过程完成了以下三点优化。第一，优化了支撑结构，将圆柱形的杆状支撑优化成为和底座一体的结构，加强整体流线型的美感。第二，将椅面竹条进行圆弧化，使用了更符合材料性质的弯曲方法。第三，优化了底座结构，强化了底座两段的主要受力点，保证座椅的稳定。



## 2.2 人机协作的装配过程

### 2.2.1 安装顺序

本研究采用人机协作的安装方式，采用 ABB IRB400 机械臂进行组装。装配顺序如图所示（），第一步对底座结构进行安装，第二步将竹条 1,2 号两点固定在底座底部，机械臂夹紧。第三步，使用机械臂将竹条向下弯曲，同时固定 3 号点位，机械臂继续下压至设计位置固定 4 号点位，打开机械臂夹爪运行竹条弯曲路径程序，使用机械臂调整竹条曲线形态固定点位 5。第四步，撤出机械臂，将夹爪移动到竹条末端，向椅背靠拢，直到竹条完全贴合于底座。固定 6,7 号点位，将竹条多余部分分割，完成一条竹条的安装。使用同样机械臂操作方法，将剩余竹条安装完毕，完成竹椅的整体安装（图 6）。

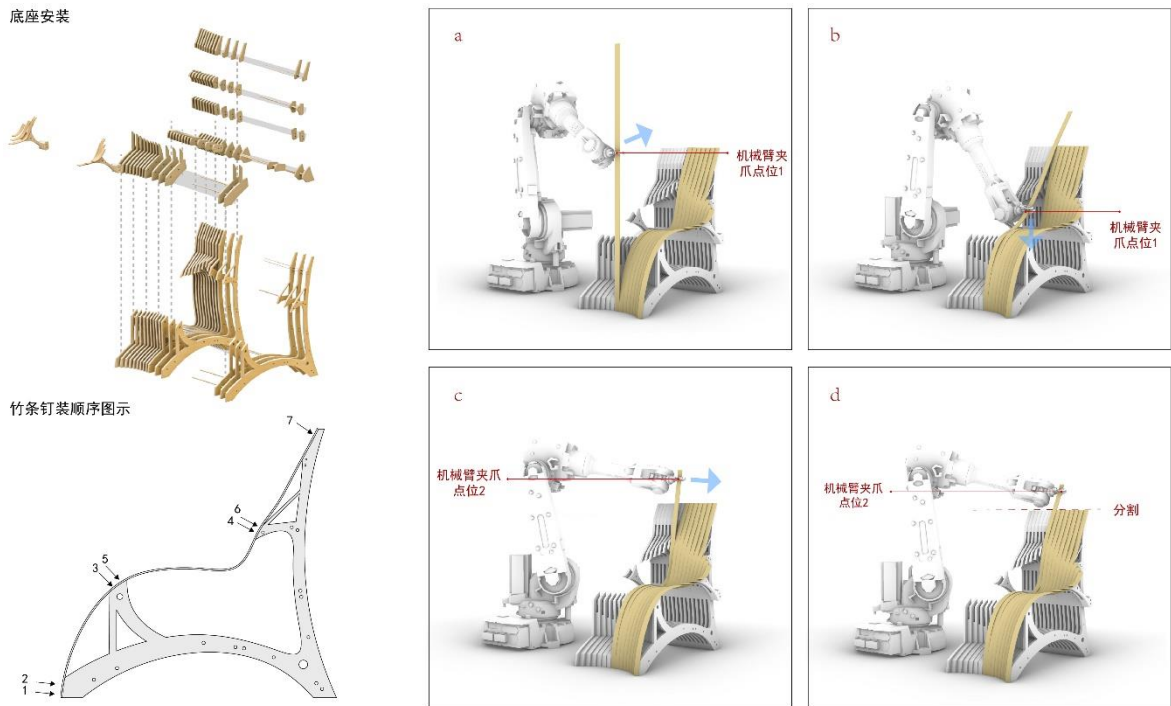


图 6 人机协作安装图（来源：作者自绘）

### 2.2.2 完成效果

在本研究中，通过生成式设计和性能优化相结合的方法，成功实现了从设计到制造的完整竹椅生产流程，最终设计和制造的竹椅在外观和功能上都达到了预期目标。最终装配完成的竹椅，底座与竹条连接紧密，弯曲形态保持完整，实物结果与预期一致。



图7 成果照片（来源：作者自绘）

## 结语

本研究通过生成式设计 with 性能优化相结合的方法，创新的实现了竹椅设计与制造的全流程，展示了人工智能技术在设计领域的巨大潜力。通过本研究我们发现，在生成式设计方面，生成式设计平台和性能分析工具的应用，不仅大幅缩短了设计周期，还显著提高了设计的精确性和可控性，使设计师能够快速生成一系列具有辨识度的设计方案，并通过交互控制优化生成结果。这一过程的创新在于结合了设计师的创意和人工智能的计算能力，实现了设计的高效迭代和优化。在性能优化方面，数值模拟和实验验证确保了竹材在不同弯曲半径和支撑点位下的变形行为符合预期，保证了设计的实际可行性；调整了竹椅底座的几何形状和支撑布局，平衡了结构强度与材料使用量，不仅提高了整体稳定性，还增强了设计的美观性。制造过程中，采用人机协作的模式，即设计师与机械臂共同工作。机械臂通过精确的控制系统，确保竹材在弯曲过程中每一个弯曲点的曲率和位置都与设计一致，达到了高精度和高一致性的要求。人机协作不仅提高了制造效率，还提升了产品质量，实现了从设计到制造的无缝衔接。

综上所述，本研究不仅展示了竹材在家具设计中的广泛应用前景，也为生成式设计和性能优化的结合提供了有效的实践案例。未来的研究可以进一步探索更多材料和结构的优化设计，不断推动设计创新的发展，为实现更可持续的设计和制造提供新的解决方案。

## 参考文献

- [1] 于文吉 江, 叶克林. 竹材特性研究及其进展 [J]. 世界林业研究, 2002, (02): 50-5.
- [2] CHAOWANA K, WISADSATORN S, CHAOWANA P. Bamboo as a sustainable building material—culm characteristics and properties [J]. Sustainability, 2021, 13(13): 7376.
- [3] KRISH S. A practical generative design method [J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(1): 88-100.
- [4] SAADI J I, YANG M C. Generative design: reframing the role of the designer in early-stage design process [J]. Journal of Mechanical Design, 2023, 145(4): 041411.
- [5] 袁烽, 许心慧, 李可可. 思辨人类世中的建筑数字未来 [J]. 建筑学报, 2022, (09): 12-8.
- [6] 顾思佳, 王日新, 武雨菲, et al. 基于 FUGenerator 平台的 AI 启发式建筑生成设计流程探索; proceedings of the 2023 年全国建筑院系建筑数字技术教学与研究学术研讨会暨 DADA2023 数字建筑学术研讨会, 中国湖南湘潭, F, 2023 [C].
- [7] LIENHARD J, KNIPPERS J. Bending-active structures [J]. Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen der Universität Stuttgart, Forschungsbericht, 2014, 36.
- [8] BOULIC L, SCHWARTZ J. Design strategies of hybrid bending-active systems based on graphic statics and a constrained force density method; proceedings of the Proceedings of IASS Annual Symposia, F, 2018 [C]. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).
- [9] 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).
- [10] PETERSEN K H, NAPP N, STUART-SMITH R, et al. A review of collective robotic construction [J]. Science Robotics, 2019, 4(28): eaau8479.