

数字建造的线性建筑实践：以伞亭为例

Digital Fabrication for Linear Architecture: Take Umbrella Pavilion as a Case Study

曾忠忠 | ZENG Zhongzhong 张波 | ZHANG Bo

中图分类号: TU201 文献标志码: A 文章编号: 1001-6740 (2023) 05-0031-07 DOI: 10.12285/jzs.20230413001

摘要:“非线性建筑”充分体现了数字建造的先进性。本文以“伞亭”的设计建造过程为例,讨论了数字建造在更大量性的“线性建筑”中的实践潜力,在基地信息数字化、多方案比较、发展方案确定性、结构深化、细部设计、工厂预制、现场装配七个阶段中,讨论了数字建造平台、设计师、设计成果之间的互动关系,验证了数字建造广度、深度、精度、效率四方面的优势,也发掘并记录了设计师的能动工作和有效身份。在数字建造中,数字技术工具重塑了设计媒介、工具与人的关系,对设计师提出了新的互适应性要求。

关键词: 数字建造、线性建筑、广度、深度、精度、效率

Abstract: While the advancement of digital fabrication has been explored and discussed in nonlinear architecture, this paper addresses the application of digital fabrication in linear architecture by taking the *umbrella pavilion* project as an example. In examining the seven phases of the design process, such as in digitalization of the site information, multiple scenario comparison, proposal determination, structure design, detail design, on-site installation, the author discusses the interactive relationships among digital fabrication platform, architect, and design result. The project attests to the variety, depth, accuracy, and efficiency of digital fabrication, and records the proactive tasks and roles of designers in the process. The article suggests digital fabrication reshapes relationships among digital media, tools, and designers, which architects should adjust to.

Keywords: Digital fabrication, Linear Architecture, Variety, Depth, Accuracy, Efficiency

一、数字建造旋风中的迷思

数字建造所掀起的旋风既是视觉的,也是理论的。当我们并不陌生的数字模型附加建造、经济等信息,加上形体生成技术和建筑打印技术的加持,一直延伸到建筑物生成,形成连通设计至建成的全过程范式^[1](图1)。数字模型不再只为设计师分担烦琐计算、信息存储、图像和模型制作等任务,甚至也不仅是一种设计推敲工具,而成为设计的运算结果和建造依据——数字建造影响下的作品视觉上的夸张性和自生形性几乎使这

种范式的先锋性不证而自明^[2]。从1977年至今的出版物中,一批有先锋意识的设计师已经藉由数字建造流程完成了成熟的作品^{[3][4]}(图2、图3)。建筑师欣喜之余,也因其变革的颠覆性感到无所适从,体现在三种迷思中。

第一,“自生形性”带来设计师角色迷思。通过简单的参数设定和调整,数字模型的形态生成比起设计师的构思要迅速得多、丰富得多、复杂得多^[5](图4)。这带来的问题是:数字建造是否意味着未来可以由机器“自动”生成建筑?建筑师会不会变成“多余人”?大多数建筑师在数字

作者:

曾忠忠, 北京交通大学建筑系系副主任, 北京交大-津发科技人因实验室执行主任, 本质工作室主持建筑师;

张波, 美国俄克拉荷马州立大学(Oklahoma State University)终身教授, 华中农业大学讲座教授。

国家重点研发基金项目资助, 项目编号: 2020YFF0304106

录用日期: 2023-06



图 1: 由机械臂辅助建造建筑构件



图 2: 布加纤维馆 (ICD/ITKE 斯图加特大学)



图 3: 乌镇“互联网之光”博览中心红亭

建造的范式中，应该处于何种地位？^[6]

第二，“非线性”带来类型适用性迷思。由于“非线性建筑”充分发掘和展示了数字建造的潜力^[7]，这使得人们不自觉地数字建造和非线性设计相等同；掩盖了数字建造范式从性能模拟、数控建造^[8]等方面冲击既有设计过程的广泛潜力。鉴于在可以预见的未来，大多数的建筑仍然会以“线性”的逻辑和面貌出现，数字建造对于“线性设计”的触动性问题就显得更具有紧迫性。

第三，数字“可能性”带来广泛建造性迷思。作为一种新的设计范式，必然应该具备普遍的适用性。^[9]而作为一种连通建造过程的范式，数字建造概念和建造有关的种种特性是相对模糊的。当数字模型成为一种贯通设计、制造、装配的媒介，建造的精度、效率、深度等概念应该成为聚焦讨论的内容。以此为基础，数字建造对于整个建筑业（而不仅仅是创造过程）的撬动值得关注。

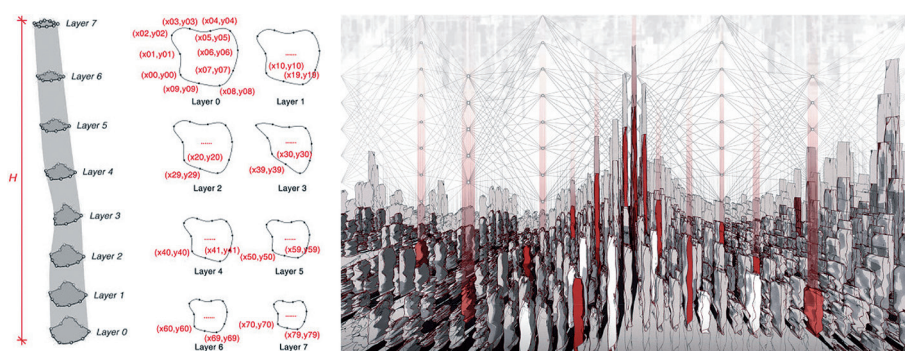


图 4: 基于参数调整生成的多种建筑

二、伞亭案例

本案以一座小型建筑“伞亭”为例，考察“线性设计”的数字建造过程。该项目是北京交通大学建筑与艺术学院空间扩展工程的一部分。在北京市内严格的建设控制条件下，只能选择教学楼南侧的一块宽 7m、长 64m 狭小地块，根据前期的师生公众参与，建造一处以展览、交流性质为主的开放构筑物（图 5）。该项目依循数字建造的原则于 2018 年 5 月完成了设计

建造。此后多次被邀请参加全国专业的木构展览（如中国建筑科技馆展出的“木构新景：从材料、建构到双碳背景下的新未来”“数字建造 + 设计逻辑”广州、深圳、武汉等城市等专业展览），获得了国内国际多个专业奖项（如中国优秀木结构工程奖、美国景观协会建成荣誉奖、优秀建筑奖等），也受到了国际主流设计刊物的关注（如 *Landscape Architecture Magazine* 杂志主编专门在该刊 2020 年第 1 期撰文介绍），显示出一定的类型代表性。

本文从以下七个阶段中，考察下数字建造过程中设计媒介、工具、人三者之间的关系（图6）。

1. 基地数字化

对基地环境进行三维扫描、清理后建立场地信息 Rhino 模型，充分反映了场地的复杂性。精确还原教学楼边仅7m宽的地块上11棵高度约14m的阔叶杨树及基地南缘8棵高度达10m的银杏树，准确定位8个需要随时打开检修的污水井（图7）。



图5：伞亭区位

2. 多方案比较

团队前期设计了22个方案，包括：集装箱建筑7个，混凝土建筑3个，装配式木制建筑8个，非装配式木制建筑4个。比起单纯模拟空间感受的3D建模，数字建造平台在方案阶段实现了多专业决策，将形态和空间评估置于造价、建造、时间等评估因素下（图8）。排除造价昂贵的集装箱方案（单方5000元，近200万元的总价）、建造时间相对长的混凝土方案（施工作业需2个月周期，干扰正常的教学秩序）、场地氛围薄弱的折板方案，最

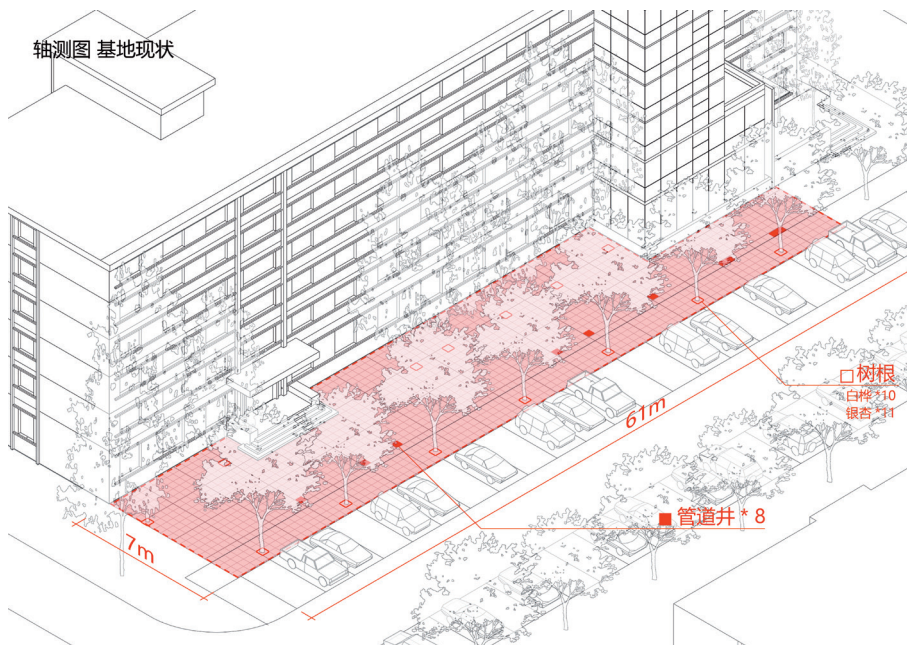


图7：基地信息

终选定单方造价2000元、生产运输及建造可控制在一个月内完成的胶合木装配式“线性”方案。

3. 方案确定性

本案趣味在于，在约400m²的狭小场地中，将19棵树木全部保留，于树木和8个污水井（及其管道）的复杂条件中发展出合宜形式。以与树林共生为造型出发点，本案的确定性既包括网格形和网格尺寸的设计，也包括设计建造合理性的结构层次设计。经过不同网络形的对位、核

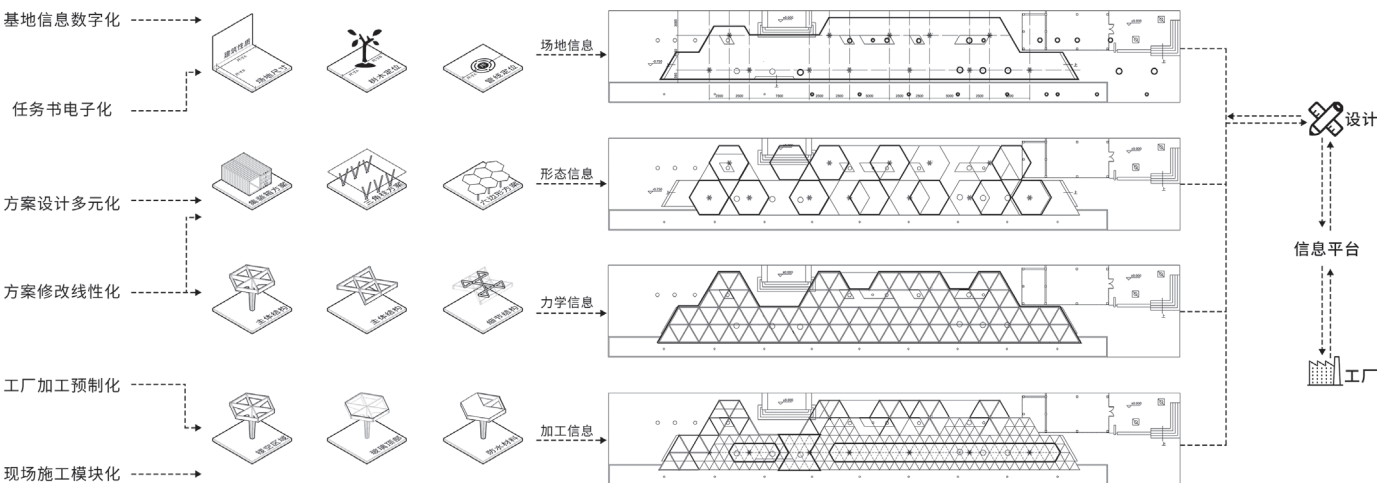


图6：伞亭数字建造平台

对、调整，确定了垂直柱支起等边三角形组成的六边形伞的方案。以三角形为基本模块划分场地，2.5m的等边三角形网络能保证结构柱基础避开树干及管井。伞亭的二级主梁将六边形伞连接成一个整体；最后确定屋顶的材质，增加副梁（图9）。

4. 结构的演化

结构深化采用 Grasshopper 作为 Rhino 的可视化编程插件，包含有建筑的参数信

息，通过参数修改完成建筑形态的更进。采用 3D3S 进行结构受力模拟分析（图10），将柱跨由8m 变更为 6m，并调整主次梁关系，形成新的建造框架（图11）。

5. “装配的演习”

数字建造平台提供“装配的演习”，不仅从空间创造和构筑物本身的比例对单元伞跨度大小、主次梁厚度、伞柄木柱的高度、拼装木柱胶合木单元片厚度进行调整

（图12）；也对这些构建的装配关系给予检验。本案金属链接件片状部分需插入木梁中，同时要满足水平面上六个轴线向度；“装配的演习”能够有效避免细部可能发生的装配打架，最终发展出新型的六边形飞翼五金连接件（图13），将“隐藏五金件翼、半现联结逻辑”的建构意味展现（图14）。

排水问题，模拟了六个向度的 L 形木单元 1% 的坡度，雨水通过中间“伞柄”流到下层架空的地基，成为地下水补充。照明电路则遵循隐藏的思路，在不改变每片木梁完整性的前提下，将电路完全隐藏在中间的“伞柄”核内（图15）。

6. 机器臂打印

工厂用无纸数字模型直接导入胶合木切割系统，计算操作顺序切割。传统的人工切割 L 形片状柱难以做到每片柱子完全一致，钻孔螺栓孔洞也存在误差；几层误差叠合起来，不得不在组装现场进行切割调整，耗时且细节设计也无法实现。机械臂切割精度达到 0.1mm，同类构件保持高度一致，细部实现具有保障。本案的 L 形片状柱，一名工人一天生产 2 根；一个机械臂则全天可生产 10 根，加工效率提高 5 倍。构件尽可能工厂预制，一周内生产 72 片 L 形片状柱，130 根梁，243 根龙骨，12 根立柱；焊接完成五金件 99 个，配套螺杆 2380 套。

7. 现场装配

伞亭施工流程包括：构件编号、运输、装配。组装内容包括：柱点定位、翼

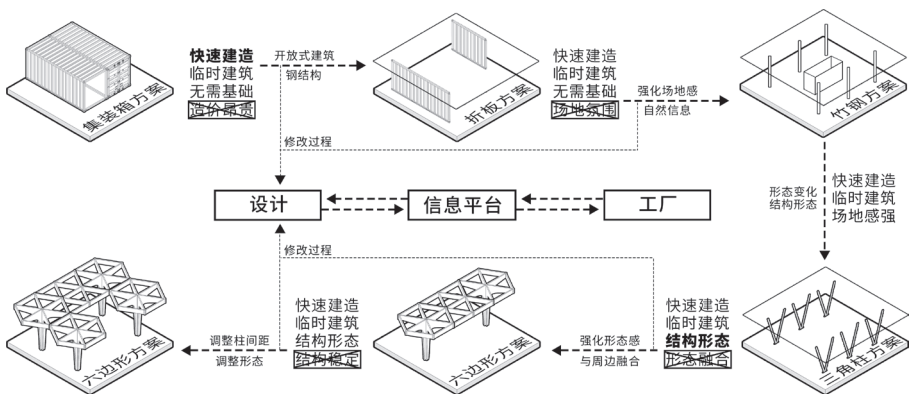


图 8: 多元方案比较

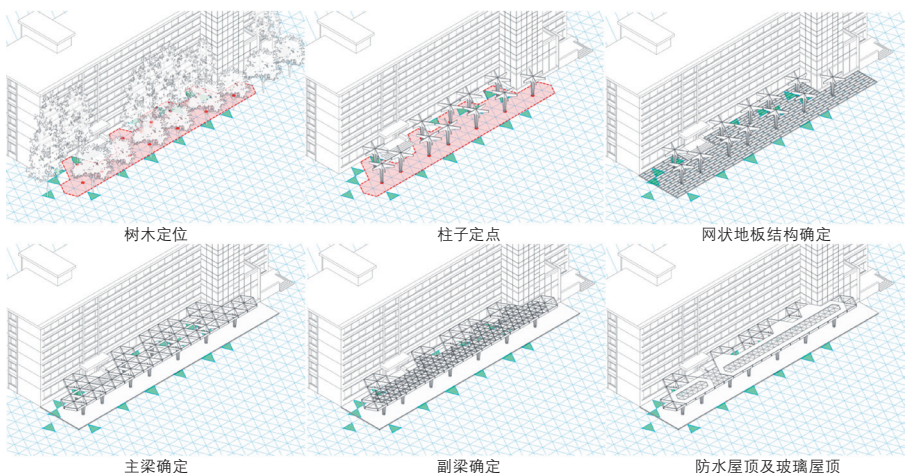


图 9: 伞亭设计方案的推敲步骤

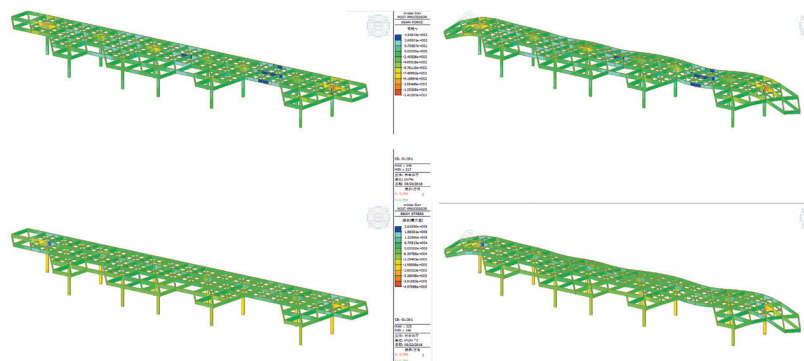


图 10: 伞亭受力分析

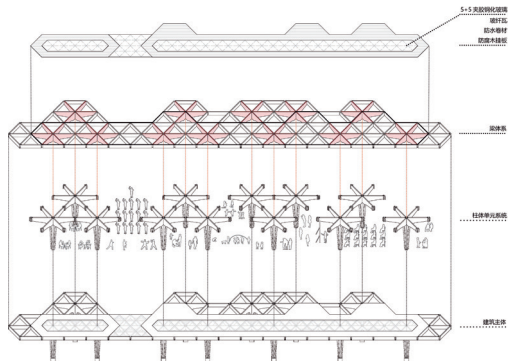


图 11: 最终伞亭方案结构各部分的对应关系

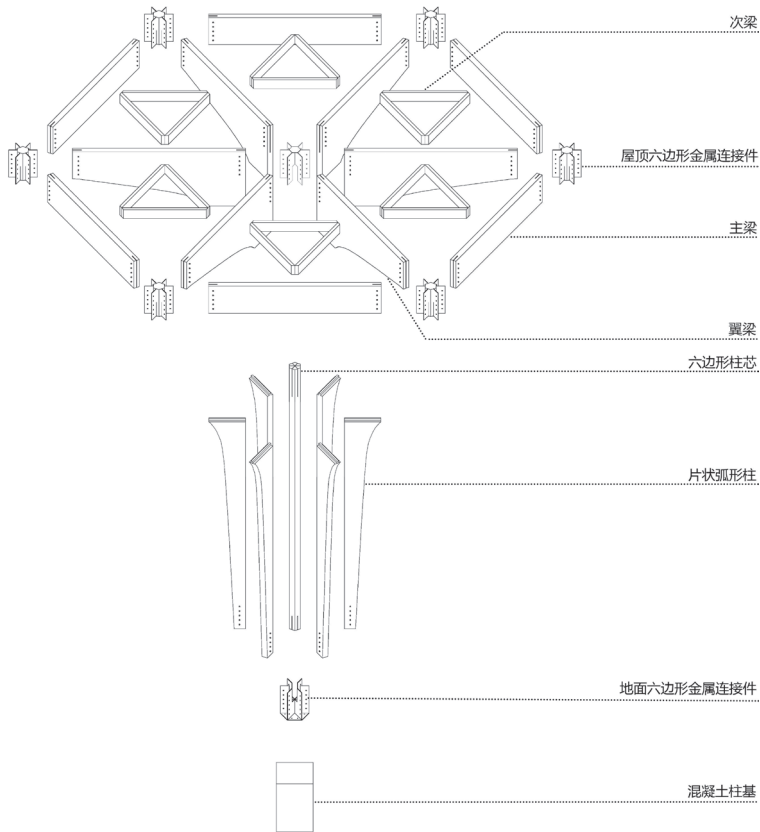


图 12: 单元伞亭细部设计

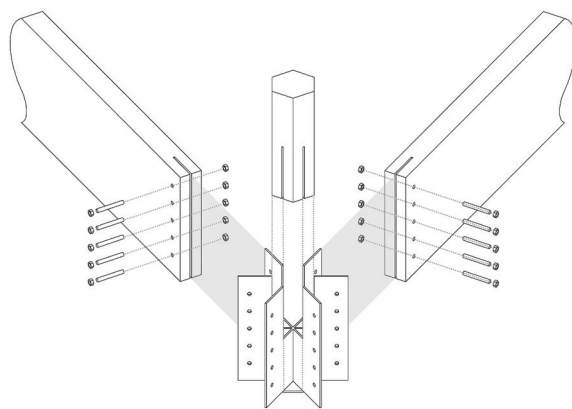


图 13: 梁柱细部分解示意图

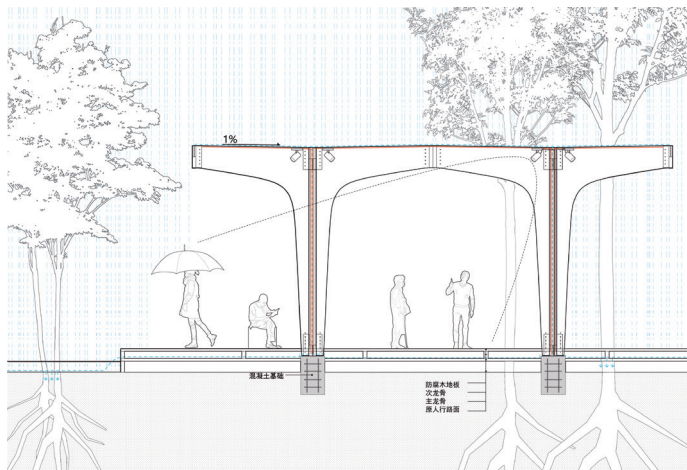


图 14: 剖面示意图

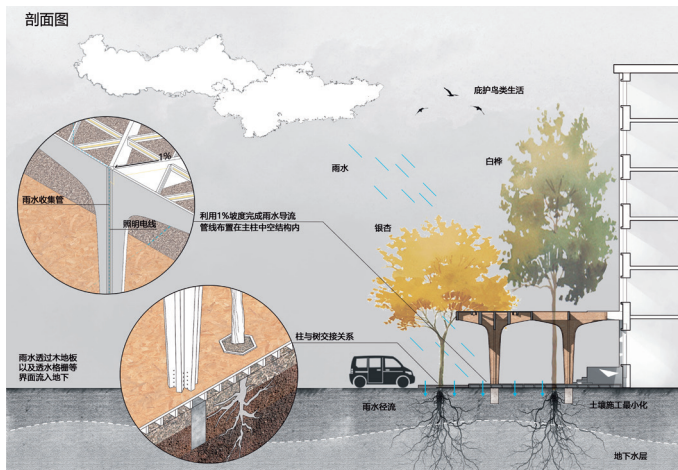


图 15: 电与水系统示意图

梁安装、主梁安装、次梁安装、屋顶防腐挂板安装、屋顶三角玻璃板安装、防水卷材安装和玻纤板安装。细部设计考虑了木材在气候、运输条件下的形变，在加工阶段预留了误差范围，装配实现了一次成功。数字模型方便施工人员查询模型信息，执行施工程序，成为与客户和工厂沟通的介质，从屋顶坡度到材料选择，数字模型的设计选择范围详细入微，便利了设

计团队的设计把控与工厂对构件的高精度制造，极大程度地提高了现场施工效率。最终，在预先埋好的 12 个混凝土桩上，仅花费 10 天就完成了现场装配。

三、数字成为场所

经历了 Rhino、3D3S、BIM、切割模型文件等多重数字模型演化，一个线性的数

字建造最终变成现实。伞亭的建成为校园保留了自然元素，创造了富于仪式感的空间，成为全天候向公众开放的日常生活场所。林间隐树、亭亭于此，“伞亭”之名由此而生并在校内流传。白天，树林中柔和的光线从伞间倾泻而下，师生在展厅中坐而论道，讨论交流（图 16）。夜晚降临，开放的展厅释放柔和的光线，就像灯火引虫一般吸引路人驻足（图 17~ 图 20）。

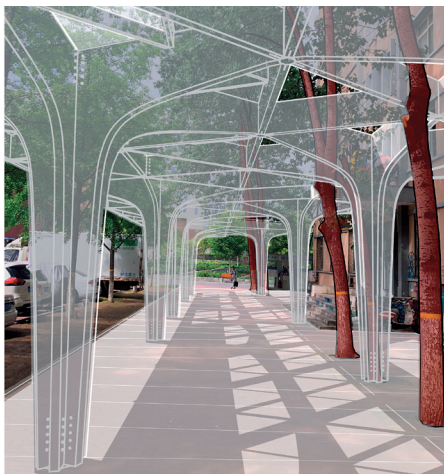


图 16: 伞亭模型与现场对比



图 17: 伞亭夜景



图 18: 树木穿过伞亭



图 19: 设计课评图



图 20: 秋日伞亭

四、结语：线性建筑的数字建造前景

从本案来看数字增强的意义不仅是形推导的先进性，还包括数字模型迭代信息的丰富性、建造内容对于设计前端的回馈——后者对于“线性建筑”尤为重要。借用安托万·皮孔提出的人与机器混合的“赛博格”（cyborg）概念^[10]，设计师所面临的创作环境和创作媒介逐渐合一。本案数字模型所迭代的材料、结构、造价、建造精度等信息扩展了建筑形态元素的深度，从后端到达前端，成为设计构思的新来源。袁烽认为，建筑师将使用数字增强的“手”来塑造世界^[11]。这种塑造力在本案中不仅体现在“非线性建筑”的强烈视觉冲击力上，也体现在“线性建筑”的设计和建造品质提升中（图 21）。数字建模信息随设计过程迭代增生：从材料选择、结构深化、细部设计

等方面获得了决策确定性。^[12]木材机械臂的加工特性反馈到设计构思前端，使得细部亦较好贯彻。这是对于第一个迷思的回馈。

人机关系的核心在于人和机器之间对于设计决定权“起意”的争夺^[13]。本案的

“起意”如保留树林的决定、有层次的主次梁设计、六边形金属连接件的新细部均来自于设计师的决断，而不是程序的“自动”生成。没有这些“起意”，而全部交付于模型自生成，其“线性造型”恐怕基本等同于生产厂家的产品选择^[14]。这个意义

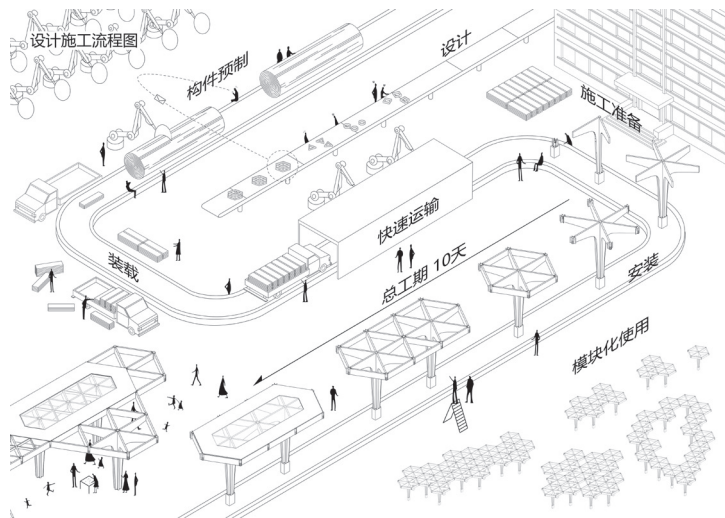


图 21: 建造流程图

上,设计师的作用类似造型软件设定方向和条件的程序架构师。如果说“非线性”的“起意”来源于生形程序带来的形体和空间冲击;“线性”建造避免重复沉闷,仍然需要设计师不断探索微妙的“起意”。本案中,轴线方位、轴向尺寸、主次梁形式、结构设计尺寸等内容的反复比较,是人机合一紧密工作中设计师“起意”决策的体现。在人机协同的“赛博格”中,只有设计师不断“起意”,设计才能不惧于已有模式下的机器强大生成能力,指引出新的生成逻辑范式。虽然在理论上“合意”机制可以被通过编程完成的新程序所不断取代;实际设计过程中,由于方案生成的丰富性和发散性,无论多么强大的机器生成机制,“起意”的决策并不能被替代。在享受数字生形的强大功能时,对于“起意”身份的保护和探索是设计师身份的荣耀所在^[15]。

“数字孪生”可以改变从文艺复兴开始设计与建造的长久分离,所谓“头脑与双手的分离”“思考者不建造,而建造者不思考”的状态^{[16][17]}。在伞亭的实践中,数字模型的贯穿性将建造内容向前推到设计阶段,带来了设计精度提高的保证,通过迭代丰富建造信息的模型,设计组能够通过“建造演习”反复推敲,从而带来构件尺寸和细部设计提升的可能。数字技术是为建筑师“重新赋能”的重要工具,它让从“工匠”这一身份中剥离出来的建筑师重新夺回建构内容的话语权^[17]。这也是对于第二个迷思的解答。

在伞亭项目中,“线性建筑”在建造性上显示出并不亚于“非线性建筑”的潜力。本案数字模型所迭代的材料、结构、造价、建造精度等信息不仅促使了设计的变革,也在建筑实现的各环节在多样性、深度、精度、效率上展示出先进性。伞亭项目倒逼制造企业升级了生产线,从半手工半机器走向了全智能数字生产线,贯穿了设计——机械臂生产加工——施工的全过程。基于伞亭项目开发的数字平台获得了国家发明专利(专利号 ZL2019 10635037.4)。制造企业从顺应设计的角

度完成数字平台的迭代改造,展示了关于当代木构的建造提升和技术生产能力。这都显示出数字建造的“线性建筑”对于整个建设市场的撬动作用。这是对于第三个迷思的展望。

我们有信心,数字建造的范式以其深刻性和先进性在“线性建筑”之中发生更大的作用。数字工具将设计模块更加集成,构建出更加清晰、多样、高效的“必然世界”;设计师在新的人机关系中仍具有不可取代的“起意”领域^[18]。数字赋能下的“起意”责任不断定义数字工具的适配方向,不断地与“必然世界”建立张力,创造出更多的“自由世界”^[19]。数字工具作为一种富含信息、人主导的智能体能够不断发展,建筑师职业并不会消亡,而是找到能够协调数字工具的职业身份角色,促使施工与制造产业的升级,使这一古老职业不断呈现出新的媒介、方法、面貌。

参考文献

- [1] PALLASMAA J. Review on Studies in Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture by Kenneth Frampton[J]. Architectural Research Quarterly, 1996 (1): 90-92.
- [2] 袁烽, 胡雨辰. 数字工厂——数字建造的建筑产业化未来[J]. 城市建筑, 2015 (28): 47-52.
- [3] 袁烽, 周渐佳, 闫超. 数字工匠: 人机协作下的建筑未来[J]. 建筑学报, 2019, 2022 (04): 1-8.
- [4] 邵韦平, 王风涛, 郝亚兰. 自由与秩序——奥体南区 05-10B 大厦数字建构实践[J]. 建筑学报, 2019(04): 25-29.
- [5] 胡淼. “凡益开题”第五期: 数字时代的建筑设计[J]. 中外建筑, 2017, 2022 (07): 12-17.
- [6] Kevin L., Burr Ed.D., Chad B., et al, The Role of the Architect: Changes of the Past, Practices of the Present, and Indications of the Future[J].
- [7] LEACH N, TURNBULL D, WILLIAMS C. Introduction[M]//Neil Leach, David Turnbull, Chris Williams. Digital Tectonics. New Jersey: Wiley Academy Press, 2004: 4-13.
- [8] 李翔宁, 常青, 孙澄, 等. 后人文建构——乌镇“互联网之光”博览中心研讨[J]. 建筑学报, 2020, 2022(08): 26-31.
- [9] BEESLEY P, SEEBOHM T. Digital Tectonic Design[C]. The 18th CAADe Conference Proceedings. Weimar: University Weimar, 2000: 287-290.

[10] Picon A. Architecture and the virtual: towards a new materiality?[J]. 2003.

[11] 同[7]

[12] 徐卫国. 数字建筑设计与建造的发展前景[J]. 当代建筑, 2020 (02): 20-22.

[13] 陈中高, 吉国华. 建造驱动的建筑数字化设计特征转变及其趋势[J]. 建筑师, 2020 (03): 107-112.

[14] 樊则森. 装配式建筑智慧建造的新边界. 新模式、新技术与新产业[J]. 建筑技艺, 2019 (09): 54-57.

[15] 同[6]

[16] 同[8]

[17] 同[8]

[18] Carpo M.. The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence[M]. Cambridge: The MIT Press, 2017.

[19] 闫超, 袁烽. 后人文建构 论数字建造中的技术与文化映射[J]. 时代建筑, 2020 (03): 6-11.

图片来源

图 1: <https://arpajournal.net/zero-tolerance/>
https://www.archdaily.com/959283/a-robot-3d-printed-concrete-book-cabin-professor-xu-weiguos-team?ad_source=myarchdaily&ad_medium=bookmark-show&ad_content=current-user

https://www.archdaily.com/916650/buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart?ad_source=myarchdaily&ad_medium=bookmark-show&ad_content=current-user

图 2: https://www.archdaily.com/916650/buga-fibre-pavilion-icd-itke-university-of-stuttgart?ad_source=myarchdaily&ad_medium=bookmark-show&ad_content=current-user

图 3: <https://www.archdaily.cn/cn/926849/wu-zhen-hu-lian-wang-zhi-guang-bo-lan-zhong-xin-chuang-meng-guo-ji-plus-zao-ke-ji>

图 4: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132321005795>

项目基本资料

业主: 北京交通大学

设计方: 本质设计工作室

设计团队: 曾忠忠、陈泳全、郑新然、张波、蔡悦倩、张锦、刘鼎岩、朱清尘、王梅竹

木结构: 武汉林榔木建筑工程科技有限公司 黄晶

地点: 北京交通大学 17 号楼南侧

设计时间: 2018.4

竣工时间: 2018.5

摄影: 郝潇漫、任儒轩、魏昉赟、曾忠忠