

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202108021



# 应用机械臂混凝土 3D 打印技术的 空心曲面建筑物的设计和建造

贺宇豪, 吴正旺

(华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 以机械臂混凝土 3D 打印系统为硬件平台,以 Rhino 和 Grasshopper 为软件平台,研制出一套集设计、模拟、建造一体化的制造平台,并为此制定了设计模式、原则和程序.研究表明:机械臂混凝土 3D 打印技术可以提高空心曲面建筑物加工的精度和效率,能够完成空心曲面建筑物从生形、模拟、优化到建造的一体化制造过程.

**关键词:** 机械臂建造; 混凝土 3D 打印; 营造技术; 设计建造一体化; 建筑物

**中图分类号:** TU 113.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2023)-0187-09

## Design and Construction of Hollow Curved Surface Building Using Concrete 3D Printing Technology of Manipulator

HE Yuhao, WU Zhengwang

(School of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Taking the concrete 3D printing system of manipulator as the hardware platform and taking Rhino and Grasshopper as the software platform, a set of manufacturing platform integrating design, simulation and construction was developed, the the design patterns, principles and procedures were formulated. The reseach resluts show that, the concrete 3D printing technology of manipulator can improve the accuracy and efficiency of building processing of complex hollow curved surface building, and can complete the integrated manufactur-ing process of hollow curved surface building from generation, simulation, optimization to construction.

**Keywords:** manipulator construction; concrete 3D printing; construction technology; design and construction integration; building

机械臂与混凝土 3D 打印技术的结合重新定义设计与建造的概念<sup>[1]</sup>,建造建筑物不再需要模板支护就可以自动制造出形体不规则的建筑物及其构件(下文统称为建筑物)<sup>[2]</sup>,尤其在大尺度空心曲面建筑物的设计和建造过程中展现出高效率和经济优势<sup>[3]</sup>.

混凝土 3D 打印技术的鼻祖贝洛克教授对建筑体系进行了一定的设计,但只制作了小尺度产品<sup>[4]</sup>.中国盈创公司曾借用贝洛克教授的技术打印了房屋主体结构,但其类型和形态有限<sup>[5]</sup>.2016 年,ETH 的 Gramazio Kohler 研究机构使用机械臂混凝土 3D 打印技术(下文统称为 3D 打印技术)完成了一个高达 4 m 的柱形混凝土打印项目<sup>[6]</sup>,展示了复杂形体模块化安装的可能性.

当前 3D 打印的研究更多偏重于设备的进步和未来建造的展望中<sup>[7]</sup>,在空心曲面建筑物设计、建造

**收稿日期:** 2021-08-21

**通信作者:** 吴正旺(1972-),男,教授,博士,主要从事生态规划与设计的研究. E-mail: wuzhengwang@126.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51378018); 华侨大学科研基金资助项目(605-50X19022)

一体化具体实现方法等方面仍为空白,不利于该技术的推广.本文应用 3D 打印技术设计和建造空心曲面建筑物.

# 1 建筑物设计建造过程的优化

近 20 年来,在建筑物的建造过程中,设计信息通常是从电脑模型转化为施工图纸,再通过施工人员读取图纸信息变成实际建筑物,其中每一部分都无法避免设计信息的损失,导致实际工程与设计信息之间存在偏差,尤其是建设空心多曲面建筑物时需要大量的节点图纸,且需要耗费大量的劳动力<sup>[12]</sup>.在当今人工成本居高不下的形势下,这些问题尤其突出.因此,通过 Rhino+Grasshopper+KUKAprc 建立参数化设计平台<sup>[13]</sup>,进行复杂曲面的有理化分析,以实现快速构建高精度复杂曲面建筑物.

参数化设计平台可以通过数字驱动与机械臂对接数据,实现设计、分割、生形和建造的一体化,大幅减少信息传递的成本.平台的具体应用流程如下:首先,在 Rhino 中建立电脑模型,通过可视化界面实现全程监控;其次,在 Grasshopper 中编辑与模型对应的加工路径,并借助参数化逻辑实现路径的自动生成与分割,最后,在 KUKAprc 中将参数化的路径与机械臂具体零部件运动对接,并输出机械臂可读的 SRC 文件.参数化设计平台,如图 1 所示.

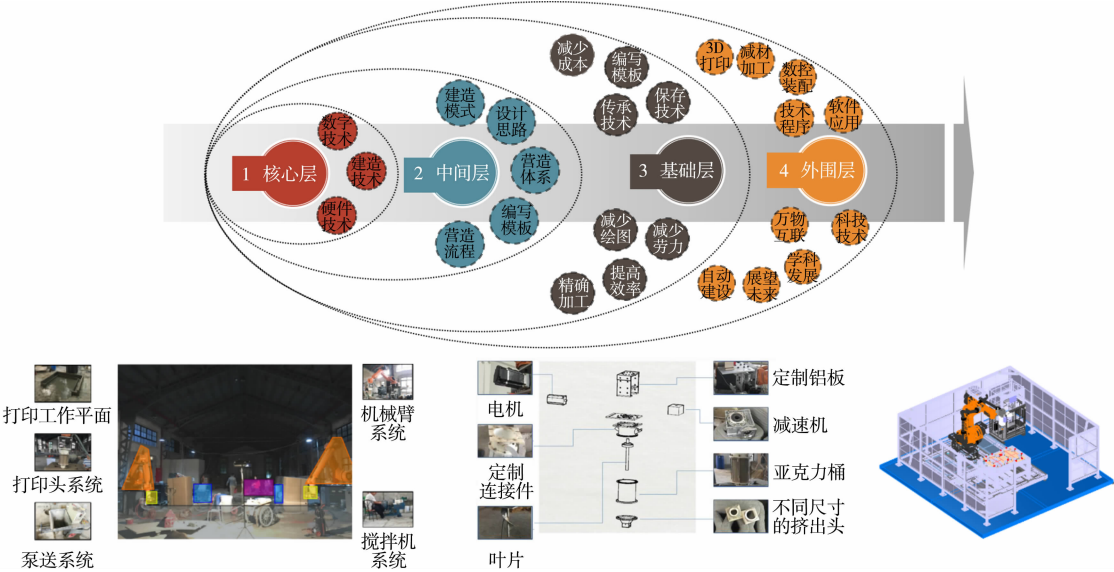


图 1 参数化设计平台

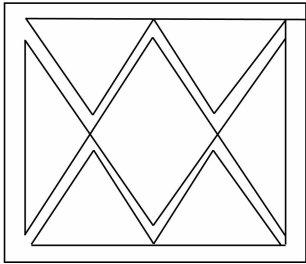
Fig. 1 Parametric design platform

在清华大学 2018CAAD 工作营中,团队通过参数化设计平台迅速将异形构件的电脑模型转化为加工路径并进行实体打印,将此过程编制为操作规范.整个过程不需要额外操作,外行人和新入团队的学生可在短时间内掌握,体现了参数化设计平台良好的应用效果<sup>[14]</sup>.

# 2 形体内部纹理的解析

建筑设计的空间形态较少考虑内部支撑方式,3D 打印技术在设计建造的一体化施工时,无法将结构设计排在建筑设计之后,需要调整建筑设计与结构设计的顺序.在完成形体设计之后,将结构设计穿插于建造一体化之中,求得形体的内部构造.依据结构与形体表现之间的关系,绘制路径并输入平台.由于 3D 打印技术的优势,可以实现空心曲面的打印.

在智慧弯步行桥的设计建造中,完成形体设计后,得出空心曲面双 X 型内部结构,如图 2 所示.通过参数化设计平台,在空心曲面双 X 型内部结构中绘制建造路径,完成外部形态柔顺、内部结构合理的复杂空心曲面设计与建造.



(a) X 结构

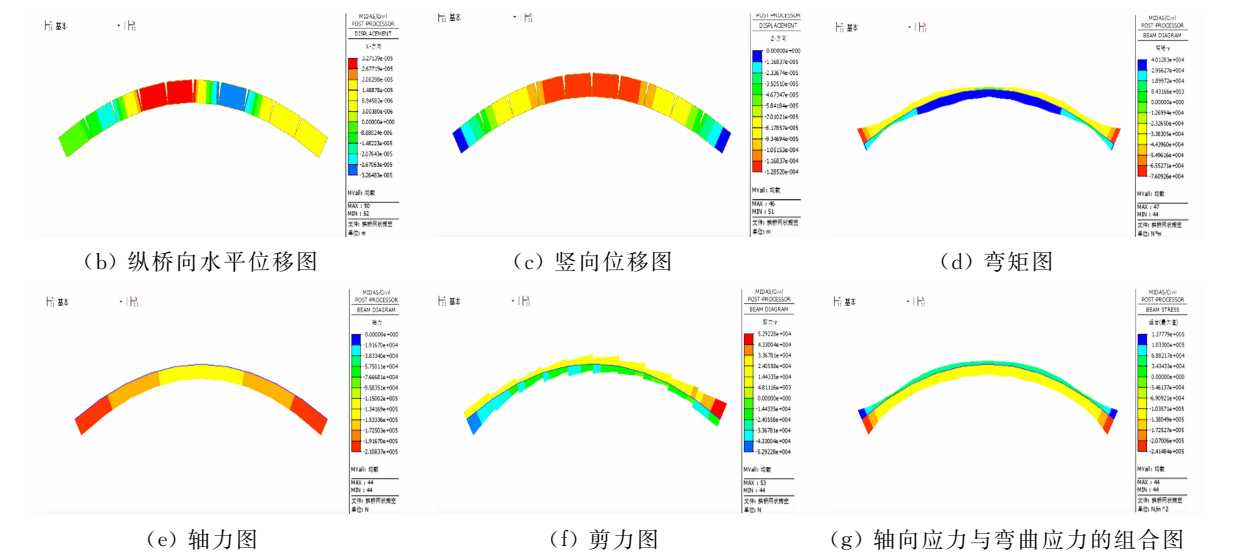


图 2 空心曲面双 X 型内部结构

Fig. 2 Double X-shaped internal structure of hollow surface

3 路径生成模式

受混凝土本身材料特性的限制,3D 打印通常需要分层进行,即把构件模型放在计算机中处理,将模型的形体切片转化为机械臂可以识别的路径信息,要求路径边缘刚好沿着建筑物本身轮廓自下而上生成,而单一的路径生成模式难以满足不同形态建筑物的打印.因此,在程序编写工作中,为了更好地实现设计建造一体化,依据曲面和截面不同的形式,将路径生成模式分为路径组成模型模式、模型分割路径模式.路径生成模式,如表 1 所示.

表 1 路径生成模式			
Tab. 1 Path generation modes			
模式	适用范围	设计方法	应用项目
路径组成模型	直曲面和固定截面运动而成的复杂曲面建筑物	在程序中编制截面与运动轨迹	智慧弯步行桥拱块、清华大学 2018CAAD 工作营作业
模型分割路径	自由曲面建筑物	在程序中将模型切片转化为轨迹	智慧弯步行桥栏板、智慧弯步行桥踏板、清华混凝土大脑

3.1 路径组成模型模式

路径组成模型模式适用于单线运动而成的直曲面和固定截面按一定规律运动而成的复杂曲面建筑物.绘制好的路径按照编辑好的规律逐步运动,最终组成与设计方案一致的模型,再使用机械臂读取全部的路径并打印.这种方法的优点是可以减少模型制作的时间,缺点是适用范围略小.固定截面沿 Z 轴生成曲面打印程序,如图 3 所示.

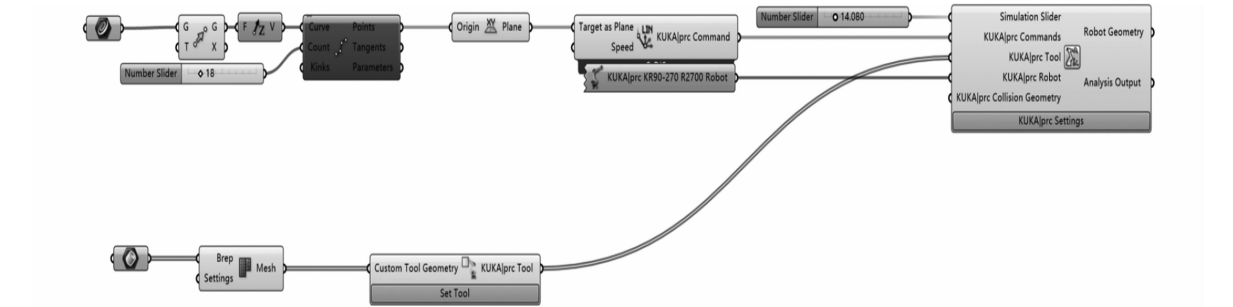


图 3 固定截面沿 Z 轴生成曲面打印程序

Fig. 3 Printing program for generating curved surface along Z axis with fixed section

在清华大学 2018CAAD 工作营作业中,作业大量采用了路径组成模型模式,如图 4 所示.通过自行绘制底层图形,并使用 Grasshopper 控制路径有规律的运动,将底层图形运动生成的形体输入参数化设

计平台, 然后进行打印. 打印出的物体可以即刻成型、拥有强度, 并作为花坛、座椅等城市家具使用.



图 4 清华大学 2018CAAD 工作营作业

Fig. 4 Homework of Tsinghua University 2018CAAD camp operation

3.2 模型分割路径模式

模型分割路径模式适用于任意自由曲面建筑物. 将导入的模型按照单层材料厚度进行切片, 随后, 将切好的截面线转化为一定数量的点, 再将点转化为  $XY$  平面. 这种方法可以将整个程序全部打包, 只留下 Brep 按钮作为模型输入端. 构件对角线与机械臂尺寸关系公式为  $r \leq R - x$ , 其中,  $r$  为分割后构件对角线,  $R$  为机械臂臂展,  $x$  为机械臂底座半径.

对角线尺寸与机械臂参数关系, 如图 5 所示. 由图 5 可知:  $r$  较大的构件会窄一些, 而  $r$  较小的构件会宽一些. 制作完模型后, 只需要将程序调出就可以生成打印所需的路径程序, 缺点是对截面复杂或截面本身非水平面的形体存在建造难度.

步行桥栏板是由垂直  $Z$  轴的变化截面组成的自由曲面. 桥栏板部分的设计建造使用模型分割路径的模式, 分层实体打印方法. 在设计阶段, 计算机依照整体环境建立桥栏板模型 (栏板形似风吹过的飘带), 随后使用切割命令将桥栏板模型分割为若干份 (图 6).

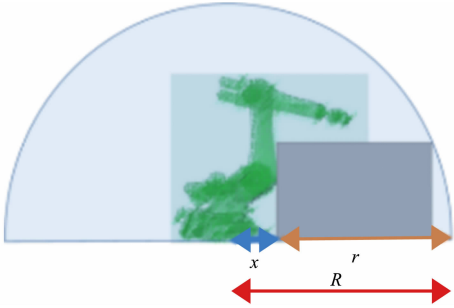
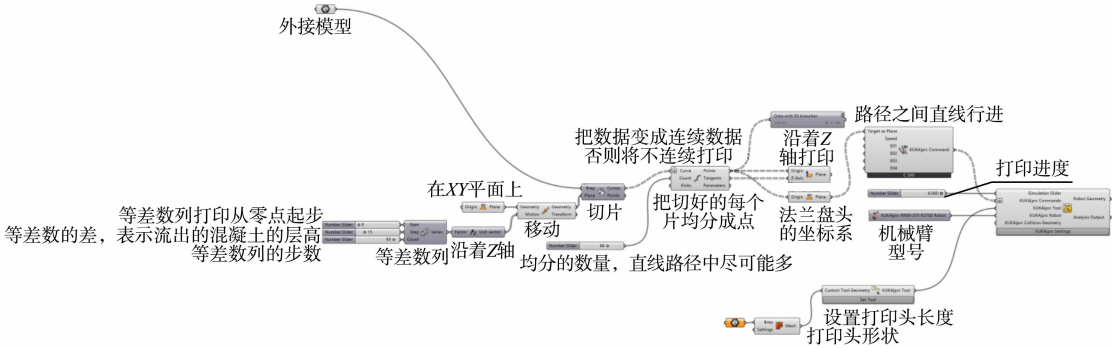
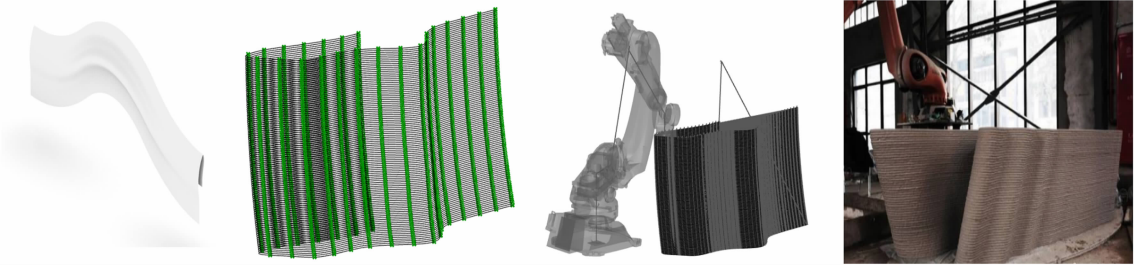


图 5 对角线尺寸与机械臂参数关系  
Fig. 5 Relationship between diagona dimension and manipulator parameters



(a) 打印程序



(b) 设计建造

图 6 垂直  $Z$  轴变化截面组成的自由曲面

Fig. 6 Free-form surface composed of varying sections perpendicular to  $Z$  axis



4 打印原则的规范

依据混凝土的材料特性制定了连续打印原则,以避免混凝土材料中断带来的建筑物质量不稳定的问题. 针对复杂截面的建筑物制定了双线打印原则,以适应更多的建筑物的建造. 针对有强度要求的建筑物制定了分层错缝原则,避免薄弱点集中的问题. 打印原则,如表 2 所示.

表 2 打印原则  
Tab. 2 Printing principles

原则	适用范围	设计方法	应用项目
连续打印原则	全部建筑	将截面图形转化为连续的 PLINE 线,将隔层的数据抽出并翻转	智慧弯步行桥栏板、智慧弯步行桥踏板、清华混凝土大脑、上海智慧弯曲面座椅
双线打印原则	复杂截面的建筑	将绘制的图形变为双线后,首尾相接,使其奇点变为偶数	智慧弯步行桥踏板、智慧弯步行桥拱块、清华混凝土大脑
分层错缝原则	有强度要求的建筑物	使图形首尾不相接,线方向与旧图形相反,起始点与终点交错放置	智慧弯步行桥栏板、智慧弯步行桥踏板、智慧弯步行桥拱块、清华混凝土大脑

4.1 连续打印原则

连续打印原则适用于全部建筑物. 由于挤出后的混凝土无法像光敏树脂一样实现更加精准的位置控制,且混凝土的黏性可能会在打印头移动过程中拉坏已成型的产品,所以在单层截面绘制过程中,对于路径重叠点的回避不能只依赖打印头本身的开关,需要在设计阶段依照一定原则进行截面路径绘制. 经过多次实验,认为机械臂的连续运动有利于混凝土的均匀打印,即将截面图形转化为连续的 PLINE 线. 为了保证不同截面层之间的连续,可以将隔层的数据抽出并翻转,使得机械臂可以在不同打印层之间连续运动.

4.2 双线打印原则

双线打印原则适用于复杂截面的建筑物,由于复杂截面大多难以转化为单一的 PLINE 线,为了保证打印路径本身连续,需要依照欧拉几何中的一笔画定理(图形所含奇点的数目是 0 或偶数). 将绘制的图形变为双线后,首尾相接,这样无论图形本身的奇点数目如何,变为双线后,其数目都乘以 2 变为偶数,满足了一笔画的模式,实现连续打印. 双线打印原理示意图,如图 7 所示.

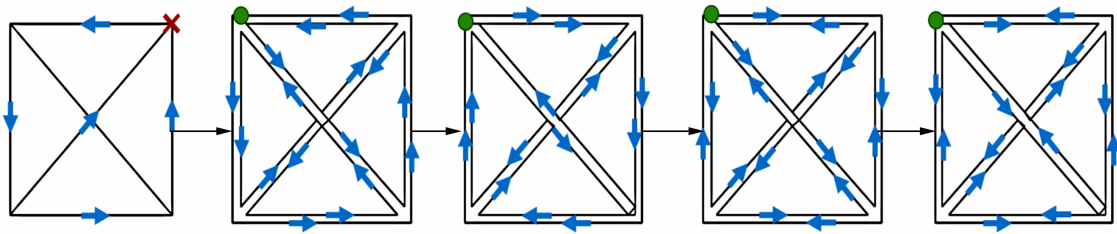


图 7 双线打印原理示意图  
Fig. 7 Schematic diagram of double line printing principle

4.3 分层错缝打印原则

分层错缝打印原则适用于有强度要求的建筑物. 由于挤出后的混凝土有一定粘性,在单层截面的端点常出现漏料的问题. 如果忽略这一问题,会造成成型的混凝土块出现薄弱点,不利于建筑物的安全. 为了解决这个问题,首先,将需要打印的形状绘制为双线甚至多线图形,使图形本身首尾不相接. 随后,用不同的画法将该形状重新描绘,要求新图形的运动方向与旧图形相反,并且新旧图形的起始点与终点与前一图形的终点与起始点不在同一个点上,但新图形的端点需处在旧图形端点的相邻线段较近位置. 在程序设计时,将新旧图形组交错放置,这样机械臂打印的材料会从旧图形的终点上升并平移到新图形的起点,而新图形的路径本身又可以抹平旧图形的端点位置.

双线打印与分层错缝原理示意图,如图 8 所示. 图 8 中:1 为图形 1;2 为图形 2. 分层错缝打印原则通常与双线打印原则配合使用,可以解决建筑物打印层中每层薄弱点位置相近的缺点,有利于增加成品的质量.

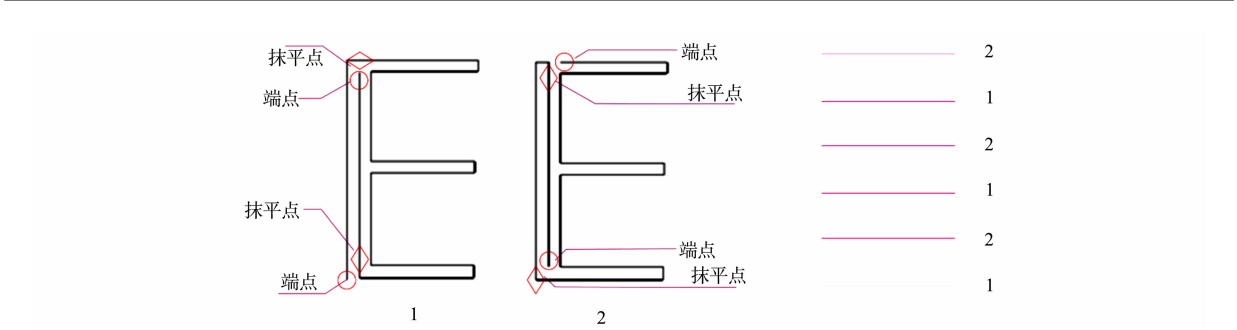


图 8 双线打印与分层错缝原理示意图

Fig. 8 Schematic diagram of double line printing and layered staggered sewing

5 特殊曲面

针对特殊曲面编写特定的程序和建造方法,特殊曲面编写方法,如表 3 所示. 表 3 中:UV 表示独立的坐标系.

表 3 特殊曲面编写方法  
Tab. 3 Compilation method of special surface

方法	适用范围	设计方法	应用项目
空心拱形构件建造	空心拱形构件	使第 1 个截面在 XY 平面上,截面沿弧线阵列,提取截面的 UV,转换截面垂直方向	智慧弯步行桥拱块
空心自由曲面建造	自由曲面构件	使用自由曲面打印方法,路径生成模型方法,提取相近点 UV 值转换截面垂直方向	智慧弯步行桥踏板、清华混凝土大脑

5.1 空心拱形构件建造方法

3D 打印技术可以制作空心拱形构件,并依据受力自由的特点制作构件的内部结构,既节省材料,又能够满足受力要求. 空心拱形构件建造的难点在于模型无法直接沿单一平面切割生成每一层的打印路径,所以选择路径组成模型模式更适合.

首先,计算所需要绘制拱的弧度,使第 1 个截面在 XY 平面上,随后截面沿弧线阵列,最薄和最厚的部分尽可能不要相差过大. 如果机械臂的法兰盘始终垂直于固定的 XY 平面运动,会使打印头刮坏打印好的构件. 最终的解决办法是通过提取截面的 UV 值,找到每一个截面的垂直方向,垂直每一截面进行打印. 实验室打印空心拱形构件过程图,如图 9 所示.

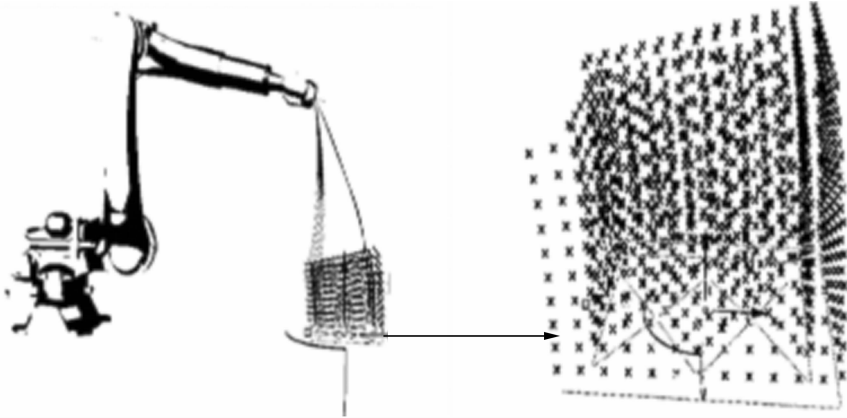


图 9 实验室打印空心拱形构件过程图

Fig. 9 Laboratory printing process diagram of hollow arch member

在混凝土步行桥建造中的逻辑生成策略应用中,使用了路径生成模式和拱形打印程序,单体拱块为空心拱块,中空部分的花纹有利于拱的承重. 第 1 个截面落在 XY 平面上,以后的截面按照拱本身的弧度依次计算阵列. 拱块的弧度与拱桥整体的弧度一致,阵列的距离依照打印头打印的单层材料厚度而定. 打印中使用双线打印原则和分层错缝原则,使两种图形交错打印,并将第 3 种图形插入其中以预留

螺栓管的位置. 打印出的拱形物体是为了拼合成拱桥中的主拱. 空心的主拱结构轻盈、尺寸精确, 没有出现传统减材制造中因为切割石材而造成的浪费. 空心拱形构件设计建造图, 如图 10 所示.

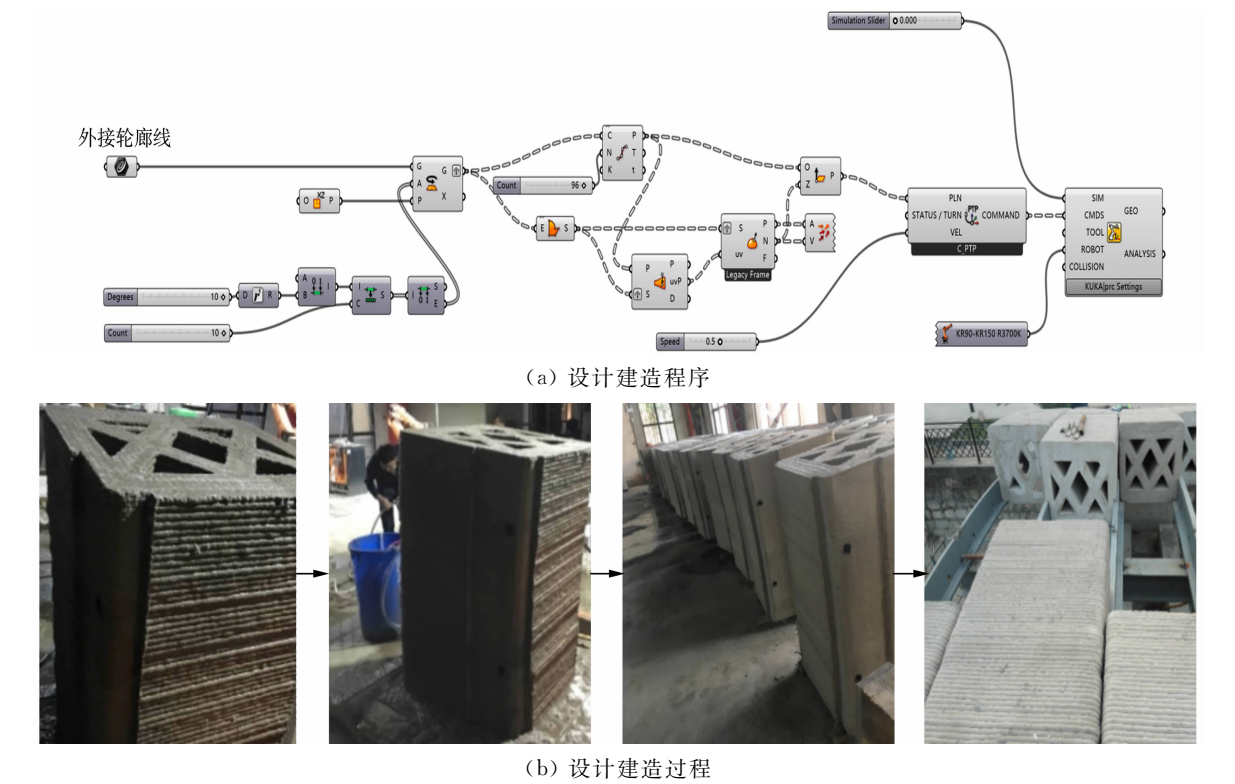


图 10 空心拱形构件设计建造图

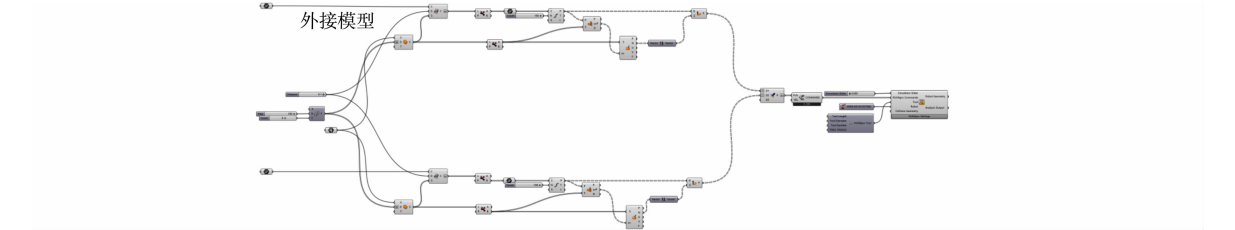
Fig. 10 Design and construction drawing of hollow arch member

5.2 空心自由曲面构件建造方法

空心自由曲面建造方法适用于变化幅度大的自由曲面构件或空心纹理自由曲面构件. 在 3D 打印工作中, 有时会遇到自由曲面的构件. 自由曲面构件如果弯曲程度过大, 则很难使用水平分层实体打印方法完成, 这时就需要采用垂直自由曲面打印方法进行打印.

由于混凝土无法在空中凝结, 所以垂直自由曲面打印之前需要预先制作相应的底板, 随即控制机械臂垂直底板打印, 打印结束后, 撤掉底板, 留下空心自由曲面构件. 底板的制作可以使用机械臂装载铣切系统, 将板材加工成需要的空心自由曲面形状, 对于质量适中的构件, 也可以将沙堆加工为空间曲面的形状, 以便于可持续利用. 垂直自由曲面打印的程序需要把构件的轮廓投影到曲面的模型上, 由于有底板辅助, 使用垂直自由曲面打印方法制作的构件可以拥有丰富的细分纹理. 空心自由曲面建造构件示意图, 如图 11 所示.

空心细分花纹自由曲面混凝土面板的制作使用空心自由曲面建造方法. 由于从设计文件中导出的面板并非水平面, 而是有一定弧度的弧形曲面, 因此, 使用自由曲面打印方法, 将桥面板提取出来进行细分, 使得每块面板的投影面积一致, 随后使用减材制造的方法将支撑体制造出来, 并在其上方进行打印. 由于拱形曲面无法用水平面切片, 设计建造工作使用路径生成模式, 依照分层错缝的原则, 每种面板都制作两种纹路, 将纹理的缝隙错开以增加面板的强度.



(a) 设计建造程序



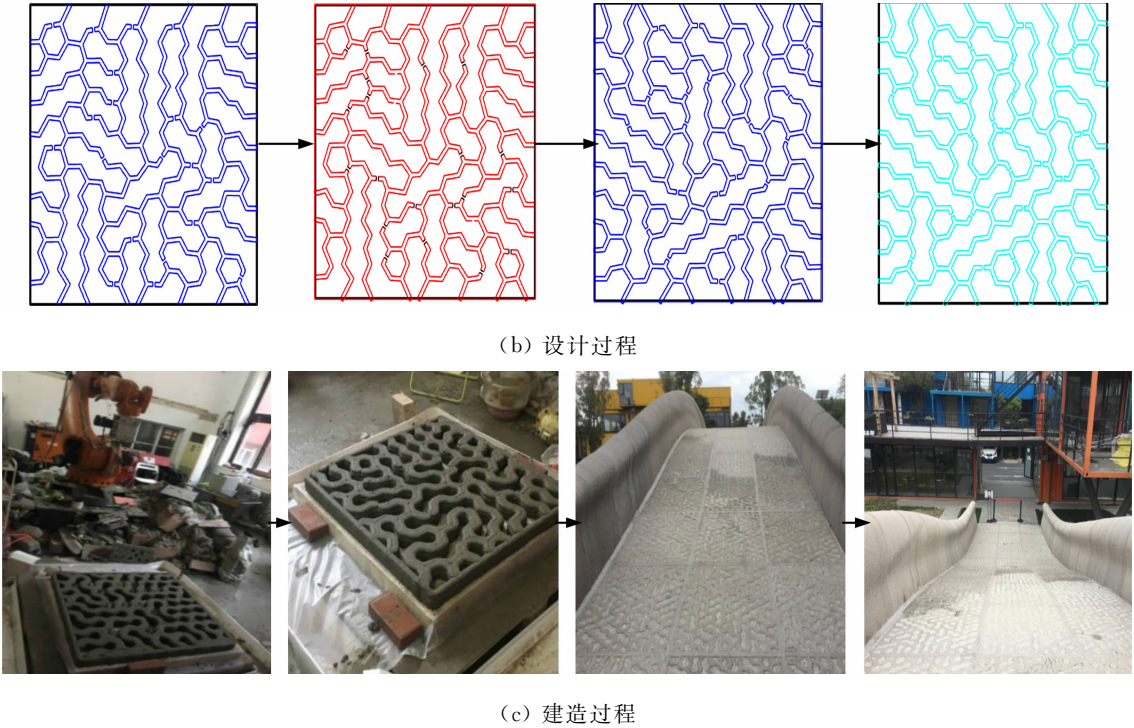


图 11 空心自由曲面建造构件示意图

Fig. 11 Schematic diagram of hollow free form surface construction components

6 结论

构建了一套空心曲面建筑物设计建造平台,通过实践研究成果展示、证明 3D 打印技术在实现建筑物设计建造一体化中的可行性,体现了其明显的节约人力成本和避免浪费的优势. 该研究有助于理解数字建筑的营造体系,对核心程序的汇总也具有重要的现实意义. 在 3D 打印技术打印建筑物的工作中,可以根据建筑物形态的不同进行分类并选用最合适的建造方法以实现高效精准的营造目标. 在原则及注意事项方面有以下 3 个结论.

- 1) 为最大程度地发挥 3D 打印技术优势,需要在模型编写过程中做到数据清晰.
  - 2) 复杂模型需要使用路径生成模式的逻辑,面对简单模型可以使用直观便利的由模型生成打印路径的逻辑.
  - 3) 在打印过程中,需要注意配合使用机械臂的信号输出功能,控制打印头的部分活动.
- 在不同的建造情形方面有如下 4 个结论.

- 1) 当 3D 打印技术应用到实际建造中时,可以使用分层实体打印方法进行墙体、外表皮、柱子、屋顶的打印. 在墙体的打印中,可以制造空心的墙体并在缝隙中填充保温材料,以满足使用要求. 在外表皮的打印中,可以借助机械臂的特性进行多曲面设计和精准制造. 对于过大的外表皮可以进行一定程度的网格分割,分割的具体尺寸需要依照构件对角线与机械臂尺寸关系公式计算而定. 所以每块分割后的表皮会在高度上有一定的差别,为了连接,可以在表皮中预留一部分金属构件以便于后期的处理. 在柱子的打印中,3D 打印系统可以制造出造型丰富的柱体,如果造型在制造期间本身无法站立,也可以通过改变造型增加支架,后期使用机械臂铣切技术将支架去掉<sup>[15]</sup>.
- 2) 对于拱形结构,可以使用拱形打印方法. 拱形打印方法既可以完成实心拱的打印,也可以完成空心拱的打印. 可以根据需要进行截面设计,用最少的材料制作出强度满足要求的拱形结构.
- 3) 如果建筑物本身为自由曲面,而且弯曲过大,无法使用分层实体建造,则可以选择垂直自由曲面建造方法. 使用机械臂将沙堆或板材加工成所需要的形状,随后在其上进行自由曲面打印.
- 4) 对于纹理和强度都有一定要求的建筑物构件,可以使用双线原则和分层错缝法组合应用. 制造时,根据需要打印的形状,将其绘制为双线,随后,制作两种不同但形状相似的图形交错使用,该方法可以解决大部分建筑物的打印问题.



## 参考文献:

- [1] 徐卫国. 数字建筑设计与建造的发展前景[J]. 当代建筑, 2020(2):20-22.
- [2] 钟冠球, 宋刚. “重构”经典: 华南理工大学数字建造教学实践研究[J]. 新建筑, 2011(4):42-45. DOI:10.3969/j.issn.1000-3959.2011.04.011.
- [3] 钟冠球. 机械臂的野心: 数字控制工具视角下的建造思维转向[J]. 新建筑, 2016(2):17-22. DOI:10.3969/j.issn.1000-3959.2016.02.004.
- [4] SCHLEICHER S, RASTETTER A, LA MAGNA R, *et al.* Form-finding and design potentials of bending-active plate structures[C]// Modelling Behaviour. Switzerland: Springer, 2015:53-63. DOI:10.1007/978-3-319-24208-8\_5.
- [5] 李留宇. 盈创建筑: 智能化 3D 打印建筑领域的开拓者[J]. 国际融资, 2018(7):20-21.
- [6] 赵阳臣. 自主构建的实验[D]. 南京: 南京艺术学院, 2019.
- [7] 张国亮, 王展妮, 刘勇, 等. LMC 在机器人交互操作应用领域新进展[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 317-323. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201610052.
- [8] 袁烽, 杨智. 数控机器人的建造算法应用研究[J]. 城市建筑, 2012(10):53-56. DOI:10.19892/j.cnki.csjz.2012.10.006.
- [9] 胡磊, 杜宇. 基于工作营模式的数字建筑设计教学初探[J]. 新建筑, 2012(1):28-33. DOI:10.3969/j.issn.1000-3959.2012.01.007.
- [10] 徐卫国. 世界最大的混凝土 3D 打印步行桥[J]. 建筑技艺, 2019(2):6-9. DOI:10.3969/j.issn.1674-6635.2019.02.001.
- [11] 中国日报. 世界首座 3D 打印桥在西班牙马德里揭幕[J]. 建筑师, 2017(1):135.
- [12] 何原荣, 潘火平, 陈鉴知, 等. 宋代古船的三维激光扫描技术重建与模型 3D 打印[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2017, 38(2):245-250. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201702021.
- [13] 贾东, 贺宇豪, 罗钊雯. 基于可视化编程的机械臂木构件加工应用研究[J]. 北方工业大学学报, 2019, 31(2):118-126. DOI:10.3969/j.issn.1001-5477.2019.02.018.
- [14] 贺宇豪. 基于机械臂应用的数字建造研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2020.
- [15] 黄吉祥, 刘舒颖, 黄辉, 等. 机械臂加工花岗岩的力和工具磨损特性[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 159-165. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201712065.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)