

# 基于机械臂混凝土 3D 打印技术的空心曲面建筑设计

张明锋

(山东方诚建设开发有限公司 山东 聊城 252400)

**摘要:** 由于空心曲面建筑构件具有形体不规则等特征,传统 3D 打印技术设计的混凝土构件成型质量较差,无法满足施工需求,本文提出了基于机械臂混凝土 3D 打印技术的空心曲面建筑设计方法。该设计方法首先利用空心曲面建筑构件的二维图像创建三维数模,并对三维模型做分层切片处理,再根据每层构件的结构轮廓规划机械臂混凝土 3D 打印路径,然后通过数字积分插补法控制机械臂遍历规划路径上的打印点,逐层打印出构件的实体结构,实现空心曲面建筑的设计。实验结果表明,采用机械臂混凝土 3D 打印技术设计的空心曲面建筑构件抗压强度为 83.88MPa,验证了设计方法的有效性。

**关键词:** 机械臂混凝土 3D 打印技术; 空心曲面建筑; 建筑设计; 设计方法

## 0 引言

随着我国国民经济的不断增长,建筑行业逐渐成为国家重点关注对象,各类基础设施的修建对改善人民生活质量有着关键作用。然而,我国当代建筑行业主要依靠人工劳动力展开施工,自动化程度较低且需要耗费大量人力与物力,一定程度上限制了建筑行业的高速发展。现在的很多建筑不仅需要具有功能性作用,对于美学要求也更加严格,为了呈现建筑体更加优美的状态,这些建筑拥有较为复杂的结构,传统人工施工工艺无法满足设计者千变万化的设计方案。在此背景下,混凝土 3D 打印技术因其高效率、低功耗等优势,在建筑领域得到了广泛的应用。混凝土 3D 打印技术就是以三维模型为开端,通过逐层打印的方式形成建筑物整体结构,这种技术可以支撑建筑结构在美学上的追求。虽然混凝土 3D 打印技术在建筑领域中具有诸多优势,但是由于我国 3D 打印技术起步较晚,在实际施工中还面临着设备的制约。因为在打印空心曲面建筑混凝土材料过程中,离不开打印设备的支持,所以打印设备的性能直接决定了 3D 打印构件的质量。因此,研究混凝土 3D 打印技术在空心曲面建筑设计中的应用具有重要的价值。本文提出了一种基于机械臂混凝土 3D 打印技术的空心曲面建筑设计方法。

## 1 创建空心曲面建筑构件三维数模

机械臂混凝土 3D 打印技术<sup>[1]</sup>就是以混凝土为原

材料,控制机械臂打印建筑物的 3D 构件,从而实现建筑物的整体构造设计。本文在利用机械臂混凝土 3D 打印技术进行空心曲面建筑设计时,首先是创建空心曲面建筑构件的三维数模,从而为后续混凝土打印提供数据支撑<sup>[2]</sup>。在构建空心曲面建筑构件的三维数模时,需要利用双目摄像头采集可以表征空心曲面建筑构件实体的图像,由于图像采集过程中,存在一些外界噪声的干扰,影响图像质量,需要对原始图像进行一定的预处理。本文主要采用直方图均衡化方法来处理原始图像,假设原始空心曲面建筑构件图像的灰度为  $h$ ,经过直方图均衡化后的图像灰度为:

$$h' = \sum_0^{255} \frac{n}{N} \quad (1)$$

式中: $h'$ —直方图均衡化后的空心曲面建筑构件图像灰度值;

$n$ —图像上灰度值在  $[0,255]$  范围内的像素数量;

$N$ —图像上全部像素的数量。

在式(1)基础上,为提升空心曲面建筑构件图像的整体对比度,还需对图像进行 Gamma 灰度变换,从而扩大图像的灰度范围,表达式如下:

$$h'' = kh'^{\varepsilon} \quad (2)$$

式中: $h''$ —变换后的空心曲面建筑构件图像灰度值;

$k$ —常数,一般取  $k=1$ ;

$\varepsilon$ —Gamma 灰度变换,其值为 1 时表示线性

变换, 其值非 1 时表示非线性变换。

在通过以上步骤获得高质量的空心曲面建筑构件二维图像之后, 即可开始进行建模<sup>[3]</sup>。空心曲面建筑结构复杂, 采集图像具有台阶效应, 因此在创建构件的三维数模时, 本文通过梯度信息来检测图像的边缘细节, 并寻找待建模目标物的边界框<sup>[4]</sup>, 从而完成建模。本文主要采用 3D MAX 软件来创建空心曲面建筑构件的三维数模, 将二维图像输入软件中, 并设置待建模目标的边界框数据, 进而生成空间曲面建筑构件的三维虚拟模型。

## 2 规划机械臂混凝土 3D 打印路径

一般来说, 因为本文构建的空心曲面建筑构件三维数模以 STL 文件格式存储, 所以在建筑构件的三维模型中包含了各个面的法向量与各个顶点的空间坐标, 那么机械臂混凝土 3D 打印路径的规划本质上就是读取空心曲面建筑物各个平面上的点坐标, 按照设定的顺序进行打印<sup>[5]</sup>。因此, 本文在进行机械臂混凝土 3D 打印路径规划时, 首先需要对文中上述内容所构建的空心曲面建筑三维模型做分层切片处理, 这样可以得到每一层的结构轮廓, 然后再根据每层构件的结构轮廓规划机械臂混凝土 3D 打印路径。

在混凝土 3D 打印工程中使用的路径规划算法包括平行扫描、Zigzag 扫描、轮廓偏置等<sup>[6]</sup>, 本文综合考虑空心曲面建筑的特点, 选择轮廓偏置法来规划机械臂混凝土 3D 打印路径, 简单来说就是按照待打印物的轮廓曲线, 以等间距逐圈偏置的规划方法。这种规划方法可以减少打印路径上的折弯, 从而确保打印成型后的混凝土 3D 构件内部结构密实, 有利于提升构件抗压强度。轮廓偏置方法主要包括顶点偏置与线段偏置, 本文采用以空心曲面建筑构件轮廓图形顶点信息为基础的顶点偏置方法, 以设定的向量与角度等参数对各个顶点进行偏置, 使偏置后的点可以连接形成一系列偏置轮廓, 该方法不仅具有较高的 3D 打印路径规划效率<sup>[7]</sup>, 而且易操作。在进行空心曲面建筑构件轮廓图形的顶点偏置时, 本文通过在 XY 平面坐标系内线段的平移来实现, 也就是通过向量来计算轮廓顶点的偏移方向与距离, 假设空心曲面建筑构件轮廓上某点在平面坐标系中的位置为  $P_1$ , 将其进行偏置后, 点  $P_1$  的位置变为  $P_2$ , 此时可以根据式 (3) 计算出两点间向量  $P_1P_2$ :

$$P_1P_2 = \frac{D}{\sin \alpha (L_1 + L_2)} \quad (3)$$

式中:  $D$  — 轮廓顶点  $P_1$  偏置的距离;

$\alpha$  — 轮廓顶点  $P_1$  偏置的角度;

$L_1, L_2$  — 轮廓顶点  $P_1$  与相邻两点之间的单位向量。

根据式 (3) 即可求出点  $P_1$  偏置后的点  $P_2$  平面坐标数据<sup>[8]</sup>, 计算公式如下:

$$P_2 = P_1 + P_1P_2 \quad (4)$$

基于以上步骤即可在已知空心曲面建筑构件轮廓图形各顶点位置信息的情况下, 获得偏置后构件轮廓的位置信息。通常来说, 按照顶点偏置规划的机械臂混凝土 3D 打印路径中, 同一条轮廓线可能会出现自相交的现象, 也就是存在一些无效的打印路径。因此需要对偏置后的各个顶点做标记, 并将其和前一个顶点连接成线段, 从而提取到新生成的轮廓环, 然后利用新多边形的旋向来判定轮廓环中是否存在无效轮廓, 如果存在无效轮廓需要将点集去除, 再重新进行逐点偏置, 直至获取到无相角的轮廓环, 以此作为机械臂混凝土 3D 打印路径。

## 3 基于机械臂的空心曲面建筑混凝土 3D 打印构件设计

在规划出机械臂混凝土 3D 打印路径后, 就可以开始进行空心曲面建筑的打印设计<sup>[9]</sup>。在进行机械臂混凝土 3D 打印时, 除了需要机械臂与混凝土 3D 打印机等硬件设备的支持, 更重要的是对机械臂运动的控制, 为满足机械臂混凝土 3D 打印的控制, 本文引入了插补算法<sup>[10]</sup>。插补算法主要包括脉冲增量插补与数字增量插补, 本文综合考虑机械臂混凝土 3D 打印流程的实际情况, 选择数字积分插补法进行机械臂的控制, 该方法不仅具有较快的插补速度, 而且其插补精度较高。其工作原理是: 首先设置一个寄存器, 控制该寄存器在一段时间内向平面坐标系的坐标轴发送脉冲信号, 当脉冲信号在累加器中溢出时, 溢出的信号就会控制机械臂进行插补运动, 直至打印结束<sup>[11]</sup>。假设机械臂插补运动轨迹是一条直线段, 该直线段的起点为坐标原点  $(x_0, y_0)$ , 终点为  $(x_i, y_i)$ , 那么该直线的方程式为:

$$y_0 = \zeta x_0 = \frac{y_i}{x_i} x_0 \quad (5)$$

式中:  $\zeta$  — 比例系数。

其中, 比例系数  $\zeta$  计算公式如下:

$$\zeta = \frac{1}{2^j} \quad (6)$$

式中： $j$  - 累加器的位数。

在机械臂插补过程中，寄存器发出的脉冲信号主要以增量的形式在累加器中进行累加，因此假设坐标原点经过  $\varphi$  次累加后达到了终点，其表达式如下：

$$\begin{cases} x_0 = \sum_{i=1}^{\varphi} \zeta x_i = \zeta \varphi x_i = x_i \\ y_0 = \sum_{i=1}^{\varphi} \zeta y_i = \zeta \varphi y_i = y_i \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知，对机械臂进行插补运算，本质上就是控制机械臂从出发点移动到目标终点的一个过程，因此本文利用数字积分插补法进行机械臂混凝土3D打印的控制，通过该方法即可控制机械臂遍历混凝土3D打印规划路径上的打印点，逐层打印出混凝土构件的实体结构<sup>[12]</sup>，从而生成完整的空心曲面建筑，以此实现空心曲面建筑的设计。

## 4 实验验证

### 4.1 实验过程

为确保机械臂3D混凝土打印技术的实践效果，本文建造数字平台展开实验，并根据实验结果来判断设计方法是否有效。在本次实验中，本文主要采用机械臂系统与混凝土3D打印机搭建硬件环境，通过卡钳将设备固定在工作台上，避免实验中因设备偏移造成实验结果出现误差；同时，在实验软件环境中，通过CAM软件构建空心曲面建筑模型，采用Mastercam编写机械臂混凝土3D打印的控制程序。由于空心曲面建筑混凝土3D构件的打印难度较大，花费时间较长，本文以某罗马建筑的关键构件柱子(图1)为本次实验的打印对象。

首先，需要选取混凝土3D打印的材料，综合考虑打印材料的流动性与分层度，本文采用普通硅酸盐水泥、水、细骨料、矿物掺合料及外加剂等原材料制备本次实验的打印材料，具体配比如表1所示。其次，利用文中所设计的方法进行圆柱建筑构件的3D打印，示意图如图2所示。

最后，在3D混凝土试块打印完成后，需要在自然条件下进行为期一周的养护工作，养护结束后对3D构件的成型质量进行检测，从而判断设计方法的性能。



图1 实验建筑构件

表1 混凝土3D打印材料配合比

原料	水泥	水	硅灰	河砂	膨胀剂
用量 / (kg/m <sup>3</sup> )	628.9	314.5	92.6	803.4	61.2

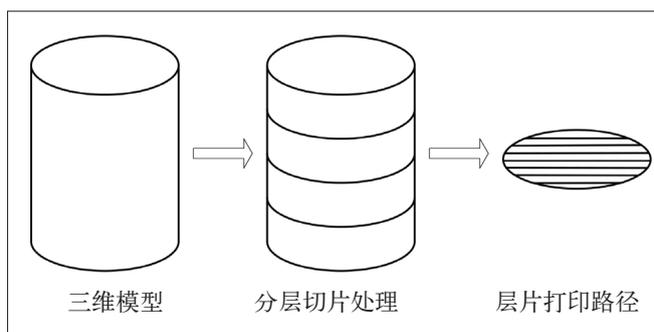


图2 混凝土3D打印流程展示

### 4.2 实验结果

本次实验中，为更好地验证设计方法的有效性，本文选择传统3D打印技术1与传统3D打印技术2作为实验对照组，对同一建筑构件进行3D打印，并控制3种方法的打印材料以及后续养护环境等实验条件保持一致，防止其他因素干扰打印结果。在各组混凝土试件养护结束后，本文通过抗压试验来检测各打印方法下混凝土3D构件的成型质量，简单来说就是将各试块放置在抗压试验机上，向试块逐渐施加压力，直至试件被破坏，根据式(8)计算出各试块的抗压强度：

$$\delta = \frac{F_0}{S} \quad (8)$$

式中： $\delta$  — 3D混凝土试块的抗压强度；

$F_0$  — 试块被破坏时最大载荷力；

$S$  — 试块的受力面积。

基于以上内容，本文针对三种不同打印技术打印的3D混凝土试块，进行了三个方向上的抗压试验，所得实验结果如表2所示。

表2 混凝土3D打印实验结果

抗压方向	抗压强度 /MPa		
	机械臂混凝土3D打印技术	传统3D打印技术1	传统3D打印技术2
X轴	83.25	65.23	41.98
Y轴	84.57	64.74	41.73
Z轴	83.81	64.96	42.06

从表2数据可以看出，对于相同打印技术所打印的3D混凝土试块而言，其在三个方向上的抗压强度值相差不大。对于不同打印技术所打印的3D混凝土试块而言，本文设计的机械臂打印技术下混凝土试块的抗压强度明显高于对照组试块，其平均抗压强度为83.88MPa，较对照组高出18.90MPa、41.96MPa。由此可以说明，采用机械臂混凝土3D打印技术进行空心曲面建筑设计是可行且可靠的。机械臂混凝土3D打印技术不仅可以确保不规则建筑构件的成功制作，而且有助于提升建筑构件的抗压强度，从而延长建筑使用寿命。

## 5 结语

建筑物从设计阶段开始直到施工结束时，正在纷纷向数字化、智能化的方向发展，当下建筑行业中，混凝土3D打印技术得到了广泛应用，该技术可以精准且高效地完成规则与不规则建筑形体的构造，真正实现了传统施工工艺向数字化施工工艺的转化。本文以空心曲面建筑为研究对象，参考国内外相关成功经验，提出一种基于机械臂混凝土3D打印技术的设计方法，并在研究完成后对该方法的性能进行了实验验证。本文仅针对机械臂混凝土3D打印技术的机械性能进行了研究，在实际空心曲面建筑设计过程中，还需综合考虑打印材料、打印设备等条件的影响，仍需进一步探讨机械臂混凝土3D打印技术

的整体性能，为推动我国建筑行业的智能化发展提供理论支持。

## 参考文献：

- [1] 贺宇豪, 吴正旺. 应用机械臂混凝土3D打印技术的空心曲面建筑的设计和建造[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2023, 44(02):187-195.
- [2] 马宗方, 杨兴伟, 宋琳, 等. 基于层间信息熵的混凝土3D打印构件精细分割[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(04):101-108.
- [3] 段珍华, 刘一村, 肖建庄, 等. 混凝土建筑3D打印技术工程应用分析[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(18):15-20.
- [4] 崔坤腾, 谭跃刚, 闵双飞, 等. 基于ROS的六轴机械臂3D打印运动规划方法[J]. 机床与液压, 2022, 50(15):1-7.
- [5] 张海燕, 唐国铭, 过民龙, 等. 回字形3D打印混凝土受压性能试验及数值模拟[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(06):1980-1986+1995.
- [6] 贺宇豪, 贾东, 杨绪波, 等. 基于机械臂混凝土加工系统的非线性建筑建造工程应用研究——以上海智慧弯步行桥为例[J]. 建筑学报, 2022(S1):261-265.
- [7] 沈璐, 张清芳, 严金龙. 基于水泥基3D打印技术的消浪块体预制工程施工方案研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(S2):1795-1799.
- [8] 张国锋, 徐雷, 李大双, 等. 基于变密度法的机械臂3D打印轻量化设计方法研究[J]. 机械设计与制造, 2022(11):80-84.
- [9] 张帆, 肖述文, 涂一文, 等. 多轴机械臂3D打印的运动-挤料协同控制方法[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(06):141-147+154.
- [10] 岳健广, 张怀奎, 全飞. 3D打印混凝土硬化后断裂机理试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(09):232-241.
- [11] 刘超, 王有强, 刘化威, 等. 基于打印参数影响的3D打印混凝土力学性能试验研究[J]. 材料导报, 2023, 37(01):84-90.
- [12] 孙晓燕, 叶柏兴, 王海龙, 等. 基于月壤成分和月球环境的3D打印混凝土结构可行性分析[J]. 混凝土, 2021(03):23-26.

作者简介: 张明锋(1989.05-), 男, 汉族, 山东聊城人, 本科, 工程师, 研究方向: 建设工程。