

基于 BIM 技术的自由曲面清水混凝土模板、背楞的深化设计研究

张伟进*, 鲁万卿, 黄诗东, 田为
中建七局西南建设有限责任公司, 重庆市, 中国
*通讯作者

【摘要】目前重庆设计公园创新基地项目基本完工, 本研究以 BIM 技术为核心, 针对自由曲面清水混凝土模板及背楞体系的参数化设计展开系统性研究。首先基于 Rhino+Grassopper 平台对原始模型进行二次优化, 利用参数化设计实现曲面模板的智能分割与造型背楞自适应生成; 其次提出"曲面分块编码-背楞拓扑优化"的一体化设计流程将三维模型拓扑为二维图纸; 最后, 通过设计公园项目实践验证, 应用 BIM 协同平台整合设计、加工与施工数据链, 实现模板系统误差控制在 2mm 内。壳体施工完成后利用 3D 扫描技术对其进行了复测, 偏差超过 9cm 的面积占比 7.8%, 偏差超过 14cm 的面积占比 0.06%。实践表明, 利用 BIM 技术通过三维可视化深化设计与数字化加工指导, 显著提升了自由曲面异形清水混凝土构件的施工完成度, 为同类复杂曲面结构的工业化建造提供了可复用的技术路径。

【关键词】BIM 技术; 参数化设计; 自由曲面; 清水混凝土; 模板深化; 背楞深化

1.引言

随着建筑技术及设计软件的发展, 使得复杂形态的建筑成为可能。以 Zaha Hadid、马岩松等为代表的建筑师打破传统建筑的直线和平面, 追求流线、曲面的不规则几何造型, 使得现代建筑作品具有很强的视觉冲击力。混凝土作为现代建筑的基本材料, 在此基础上涌现出越来越多异形清水混凝土建筑作品^[1]。但从相关文献^[2,3]来看, 目前国内关于超高、大跨异形自由曲面清水混凝土薄壳的建造技艺需进一步提升。

自由曲面清水混凝土为非线性结构^[4], 曲率变化大、曲面半径小, 传统的二维图纸无法有效表达建筑的空间结构及形态, 现场技术交底工作难以开展且无法准确指导施工过程中模板、背楞的加工及定位。本文将针对自由曲面清水混凝土壳体的结构、模板、背楞的参数化深化设计与实施进行详细研究, 探索 BIM 参数化设计在自由曲面清水混凝土施工阶段深化设计上的应用。

2.项目难点

重庆设计公园创新基地(如图 1 所示)位于两江新区悦来新城悦港大道, 是一个集工业设计产业链延伸、服务延伸、生活延伸为一体的全景化智慧生态园区, 项目整体占地面积约 43 亩, 总建筑面积约 6.2 万平方米。整个项目由 1#~7#楼及地下车库组成。本文以 7#清水混凝土壳体工程(如图 2 所示)进行研究, 项目分为南北两个壳体, 位于 7#主体结构上部。

壳体形态复杂, 为不规则自由曲面, 曲率变化大, 南北壳体外立面为扭转曲面, 门洞顶部向外延伸 5m~6m, 墙体为变截面内凹墙体。形体庞大, 其中最大跨度约 61m, 最大高度约 31m。整体设计、施工均较复杂, 质量、安全要求极高, 其异形模板与背楞体系的深化设计面临效率低、精度差、协同难等问题。该项目仅靠传统二维制图方法无法全面表达, 现场工程人员也难以理解设计意图及空间造型。



图 1.效果图



图 2.实景图

3.模型优化

3.1 方案优化

本项目虽为施工总承包项目, 但是在项目

进场之初并无图纸可供施工。业主仅是提供了一版草模，且草模存在诸多问题（如图3），首要解决的便是施工图纸从哪里来的问题。经过分析，对于此类异形建筑，BIM模型^[5]是项目破局的关键点，利用BIM模型实现从三维正向设计转化为二维施工图纸。我们利用Rhino软件，提取原模型中的关键点位及结构线，如：壳体柱脚点、顶部最高点、门洞轮廓线及曲面转折的关键结构线。对提取到的几何元素，进行二次深化设计，保障关键点位三维坐标准确，门洞轮廓线及结构转折线平滑顺畅。使得优化后的模型（如图4）拥有更加完美的弧度，建筑作品更具艺术效果、结构受力更趋合理。

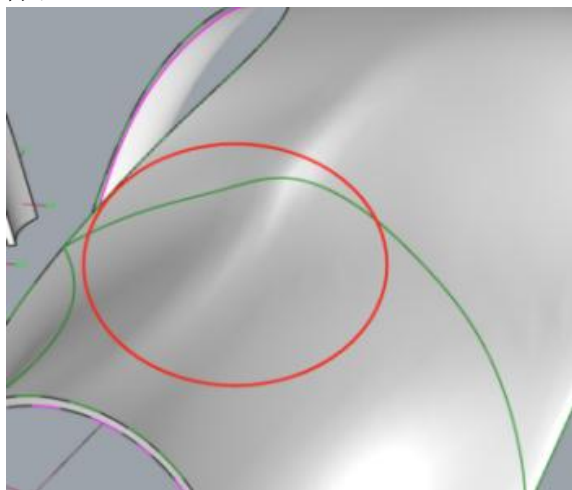


图 3.过渡不平滑

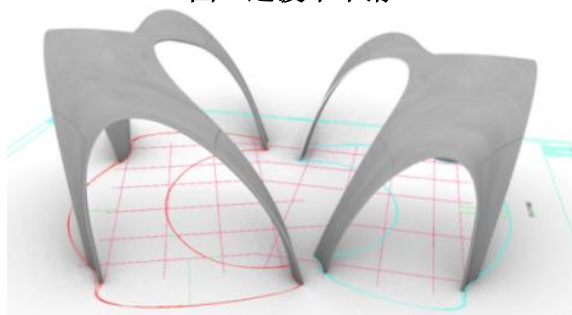


图 4.优化后模型

3.2 模型复核

项目部将优化后的模型交与设计院，建筑、结构工程师分别进行壳体与主体的结构碰撞检测（如图5）和结构稳定性复核。建筑师对碰撞部分的主体进行优化，确保壳体与建筑主体不发生碰撞；结构师通过结构计算软件对壳体结构进行暗梁设计并对其整体稳定性进行分析，保障结构安全可靠（如图6）。在通过设计院复核之后再模型交与甲方确认复核，项目部在甲方、设计院复核后的模型基础上进行背楞、模板、螺栓孔排版等深化设计。

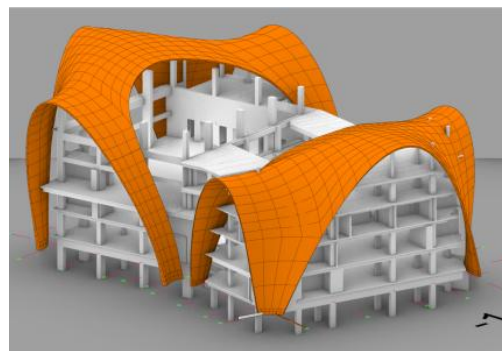


图 5.碰撞检测

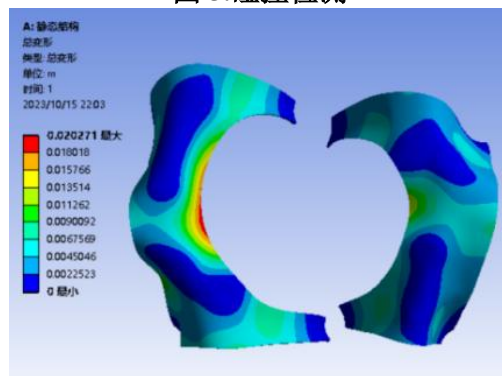


图 6.结构计算

4.参数化设计

4.1 项目模板、背楞深化难点

难点一：项目造型复杂，模板、背楞需精细化排列设计，既满足施工要求，又能体现清水混凝土的肌理；

难点二：项目形体庞大、曲率多变、且截面厚度不一，模板、背楞尺寸无法统一且无法周转使用；

难点三：甲方未提供二维图纸，且传统二维制图方法无法满足深化设计要求。

4.2 参数化设计方法

4.2.1 模板、蝉缝的深化设计

清水混凝土对表面质量要求很高，蝉缝处理不好会直接影响清水混凝土的表面肌理。经过分析，壳体柱脚为竖向发展，屋面为横向发展，所以利用两个壳体下方覆盖的建筑主体屋面所在的水平面对壳体进行切分，使其分为柱脚部分和屋顶部分，再依据“工字缝”原则，分别进行深化（如图7）。

柱脚深化原则：横向蝉缝水平交圈，竖向蝉缝竖向错缝排布；外立面柱脚模板按照2400*1000模数由上至下进行相交形成竖向蝉缝，柱脚部位螺栓孔间距：500mm*600mm；内立面柱脚模板按照2000*1000模数由上至下进行相交形成竖向蝉缝，柱脚部位螺栓孔间距：500mm*500mm；

屋顶深化原则：纵向蝉缝交圈，横向蝉缝

错缝排布；模板按照 2000*1000 模数进行深化，局部超模数采用定制大板或者小板拼接进行加工；屋顶部分螺栓孔间距：500mm*500mm；

由于该项目曲率不一，没有重复的面，所以深化后的模板均是唯一的，我们利用 GH 对每一块模板进行编号（如图 8），便于后期数字化加工及现场有序拼装。

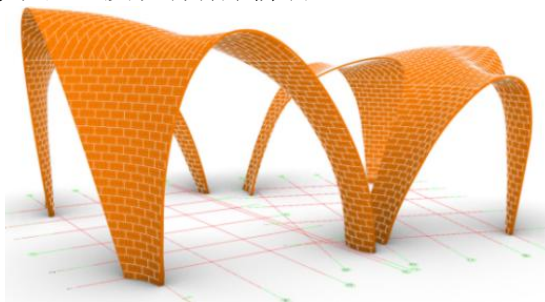


图 7.模板深化图

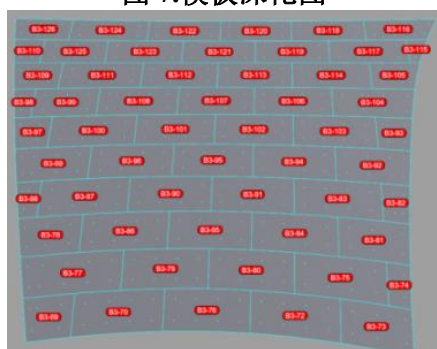


图 8.模板编号图

4.2.2 背楞深化设计

背楞的深化设计关系到模板的稳定性和混凝土成型的准确性，背楞的形态设计需使其内侧与混凝土接触面线条保持流畅顺滑。我们利用 GH，按照 150mm 的间距从壳体模型中提取出背楞线，放样生成 100mm 宽的弧形背楞^[6](如图 9)。由于项目体量庞大，所以在模型中背楞厚度可以忽略不计，同时实际施工过程中因为背楞厚度所导致背楞的与壳体模板接触处的细小缝隙也可忽略不计。最后对每一片背楞进行编号（如图 10），保证后期生产加工及有序拼装的准确性。

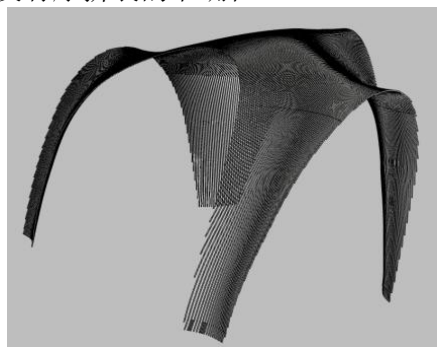


图 9.背楞深化图

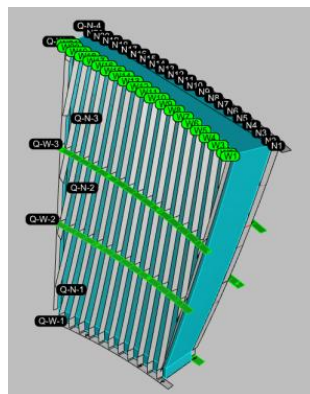


图 10.背楞编号图

5.参数化施工

模板加工流程：构件模型深化完成→构件编号排序→三维构件转二维图纸→二维构件二次切割编号→分割嵌套图框→出具任务加工单→模板车间加工→半成品堆放。

5.1 参数化下料

将深化排版及编号完成后的模板利用软件将曲面模型摊平为平面模型，然后生成二维图纸，利用 CAD 软件对构件的二维图纸进行二次深化分割、标注、编号并出具模板拼接图；

模板二次分割完成后将其嵌套进模板原材图框中^[6](如图 11)，进行加工排版。排版完成后出具模板加工任务单，加工任务单中标记所有模板加工信息（模板原材、模板厚度、模板加工切割方式、模板编号）。同理对深化后的背楞进行分割编号，最后嵌套进模板原材图框中（如图 12），进行加工排版，然后生成背楞加工任务单。

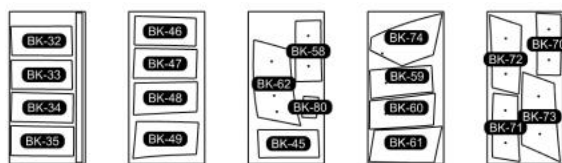


图 11.模板排版加工图



图 12.背楞排版加工图

5.2 数字化加工

模板加工：加工车间人员接收加工任务单后将图纸转换为 CNC 全数控自动加工机床加工代码进行相关的加工，加工误差不超过 1.5mm。壳体底模面板模板螺栓孔随模板一起加工，壳体外侧模板螺栓孔现场钻眼，外侧 12mm 面板侧边涂刷清漆；

背楞制作：采用多层板尺寸

1200mm×2400mm，厚度为 15mm，通过数控加工成宽 100mm 弧形造型背楞（如图 13），三层 15mm 组成一块，厚度为 45mm，间距 150mm 布置，用以模板效果成型。为满足异形自由曲面施工精度，背楞结合脚手架体系，曲率比较大的部位做阶梯型或者锯齿状与脚手架水平杆连接固定。同时在下料完成后，需在加工厂根据相应排版图进行预拼装^[7]（如图 14），防止现场拼装时尺寸不合适影响施工进度及质量。

加工过程中出现模板加工失误导致报废应及时记录，将记录文件每日整理存档。

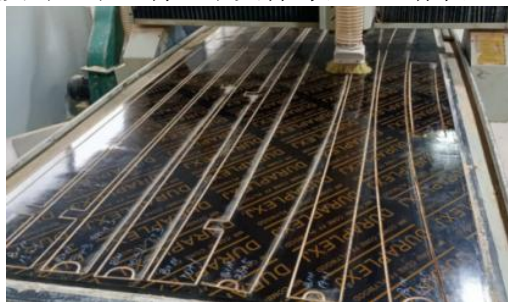


图 13.数控加工



图 14.预拼装

5.3 半成品管理

CNC 全数控自动化加工机床加工按照任务单加工完成后将加工完成的半成品定型背楞、模板进行尺寸检查，并按照任务单进行编号，各施工区段的模板进行统一存放^[8]，并按部位摆放整齐，不同区域的禁止混淆存放。做好防火防潮措施，有利于下一步工序的进行。

在造型背楞断缝处进行深化拼接记号，以便于工人现场安装拼接。拼接时根据拼接图纸

的显示，若单块成品背楞长度超过 10m 时则对其进行分开拼接，将成品背楞分为两段以免垂直运输时背楞断裂损坏。

半成品造型背楞拼接完成的成品造型背楞必须同样进行分区域统一堆放。

6.结论

综上所述，自由曲面清水混凝土壳体的模板、背楞设计需以数字化驱动（参数化+BIM）为核心，结合精密制造，在保证结构安全的前提下实现蝉缝、螺栓孔的精准美学表达。深化设计过程中需与建筑师、结构工程师、施工方全程协同，确保方案可实施，确保项目完美落地。

参考文献

- [1] 朱同然.从饰面清水混凝土到双曲面艺术清水混凝土——技艺成就建筑之美[J].建筑技艺.2022（01）
- [2] 彭林林.土建施工中的清水混凝土技术应用研究[J].居舍.2022（19）
- [3] 方如明.大面积清水混凝土施工技术研究[J].混凝土世界.2020（10）
- [4] 赵鹏，章明友，张文文，张展.BIM 参数化设计在复杂异型建筑中的应用[J].建筑结构.2023（S2）
- [5] 张宏，伊若勒泰，白苏日吐，叶红雨，张军军.曲面结构建筑 BIM 数据化设计建造教学——以 Solar Ark 4.0 为例[J].建筑学报.2024（08）
- [6] 郭亚鹏，孙双全，王思颖，王思翔，王成.基于参数化 BIM 应用的异形清水混凝土建筑实施研究[J].土木建筑工程信息技术.2023（04）
- [7] 叶尔扎提·哈卡尔，周娜娜，宋千军.基于 BIM 技术的变曲率清水混凝土墙施工技术[J].绿色建造雨智能建筑.2024（08）
- [8] 雷冠军，陈晓东，郭朋岗.复杂曲面清水混凝土模板加工质量控制[J].建筑结构.2020（06）