

# 壳体结构景观小品的数字找形及模型建造

许睿 鲁俊逸 刘茜

中国矿业大学建筑与设计学院

**摘要:**以对壳体结构体系和景观小品的研究为基础,结合数字化手段进行壳体结构景观小品的找形设计与模型建造。通过具体案例展现以三角形骨架为基础的壳体结构从设计到模型建造的全过程。设计过程利用Rhino软件中的RhinoVault2插件进行找形和初步方案比较,运用Grasshopper软件中的Ngon和OpenNest插件对壳体曲面进行网格化处理 and 板片构件排布,最终借助激光切割技术通过板片拼接完成小比例模型的建造。整体上通过数字化技术来实现找形设计和模型建造,达到了结构与形式紧密关联的效果。

**关键词:**壳体结构;景观小品;数字找形;模型建造

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.21.016

## 引言

对于建筑而言,结构既是承重的功能载体,也是表达的艺术载体,为各种造型和空间的创造提供可能,壳体结构就是其中的典型代表。壳体结构具有独特的曲面外观,结构简单,体积小,耗材少,抗震强度高,是一种具有巨大发展潜力的建筑结构形式。文章结合壳体结构体系的发展情况,引入参数化设计手段,探讨壳体结构景观小品的找形和实体模型建造方法。

### 一、壳体结构的相关背景

壳体结构是由空间曲面型板或加边缘构件组成的空间曲面结构,<sup>[1]</sup>厚度远小于其他尺寸,由于壳体本身兼有承重和围护作用,不需要支柱就能覆盖大面积的空间。壳体结构属于“高效能空间薄壁结构范畴,可以适应于力学要求的各种曲线形状,所以其承受弯曲及扭转的能力远比平面结构系统大”<sup>[2]</sup>。壳体结构受力均匀,可以充分发挥材料性能,非常适合于大跨度的建筑。

壳体结构按其受力情况不同可以分为折板、单曲面壳和双曲面壳等多种类型。在实际应用中,壳体结构建筑的形式非常丰富,既可以单独使用又可以组合使用;既适合方形、矩形平面,又可以适应圆形、三角形平面,及至其他特殊形状平面的要求。与传统的结构相比,当代的壳体结构的材料更为丰富,建造更加经济,更适用于复杂的曲面。这种结构无须使用内部支撑物,自然地形成了一种开放、通畅的大跨度空间,满足对公共空间的需求。<sup>[3]</sup>

### 二、壳体结构的景观小品

壳体结构在建筑中的运用十分广泛,不仅适用于大跨度的仓储、体育、交通、博览类建筑,也适用于亭榭类开敞空间和公共空间的景观小品。景观小品通常是指景观空间中的构筑物,或者起点缀作用的雕塑、家具之类。这些构筑物可以有座椅等实际的使用功能,也可以只是具有纪念性的精神功能,也可以没有明确的功能,主要为游人提供互动和游乐。这类小品出于互动性的考

虑,涉及生成性设计、材料计算和组装技术等多个设计主题。<sup>[4]</sup>近年来,伴随着新材料与新技术发展,出现了越来越多曲面形态的趣味性小品,这也进一步推动了壳体结构的发展。

从设计风格上看,当代的景观小品类型丰富,受数字技术发展的影响,设计的参数化和建造的智能化也将成为必然趋势。这一点在许多先锋事务所的作品中都可以看到,其中也不乏优秀的壳体结构作品。比如菲利普·布洛克设计的威尼斯双年展上的装置“穹顶之上”,通过壳体生成计算设计并运用数字建造技术。小品由399块切割好单独的石块组成,石块与石块之间没有水泥或钢筋的加固,完全凭借各个石块之间的相互作用达到平衡状态,整个壳体的跨度约为16米,而材料厚度只有5厘米左右。数字化建模的过程使得每一块单元体的形态和角度都合乎整体形态逻辑,同时也满足了精确装配的要求。<sup>[5]</sup>

### 三、壳体结构的找形方法

在上述壳体结构景观小品的设计过程中,借用参数化插件进行找形对于设计方案的优化和实施起到了非常重要的作用。在计算机辅助设计尚未普及的时代,为获得符合结构逻辑的空间形态而采取的找形方式主要是图解静力学和物理模型试验两个大类。

在图解静力学的理论研究领域,西蒙·史蒂文发表了力的平行四边形图并展示了绳索悬挂重物形成的索拱形状图;卡尔·库尔曼提出表示几何形状的形式图和结构力的力图,通过几何和力学分析借助索拱曲线生成纯受拉或受压形式。此后,在图解静力学的实践领域,胡克与雷恩发现圣保罗大教堂的砖石圆顶是稳定的纯受压结构形式;古斯塔维诺则使用压力平衡计算出圣约翰大教堂球形圆顶结构的受力。<sup>[6]</sup>

在物理模型试验找形的研究领域,胡克通过实验发现将受重力作用的悬索倒置可以生成拱结构形式。高迪在其圣家族教堂的拱顶设计中运用了垂吊找形法,用铅重沙袋模拟荷载分布,找到与结构应力线吻合的垂线形态,由此生成复杂的曲面造型。海恩兹·伊斯勒则利用纺织物张拉悬吊来找形,将悬空的正方形纺织物固定四角并进行张拉,通过悬吊重物使纺织物形成符合悬链线法则的形态,再将纺织物倒转得到等值的抗压结构体系,找到合适的壳体曲面形状。他通过这种方法,设计了诸如瑞士南代廷根服务站等著名的混凝土壳体建筑。<sup>[7]</sup>

数字化时代的结构找形方法更为多样,有力密度法、物理力学模拟法、拓扑结构优化法和推力网格分析法等。其中物理力学模拟法是建立在粒子弹簧系统基础上,可以协助建筑师模拟出复杂的力学环境。随着数字化技术在建筑领域的普及,逐渐出现了以力学计算为基础的找形软件,Rhino软件中的RhinoVault插件便是其

中的一种。RhinoVault的运算以结构找形理论为依据，根据初始条件和各个元素之间的相互关系，运行程序就能得到直观的运算结果，这些结果可由Rhino软件产生形态向用户进行及时反馈。

#### 四、壳体结构的模型建造

数字化找形方法在设计中得到日益广泛的运用，同时，在设计方案实施的过程中，数控建造技术的进步也打破了结构构件的形态局限，可以实现包括壳体在内的各种复杂曲面形态。在现代数控施工技术中实现壳体曲面形态的主要有异形模板浇筑、机械臂增材打印和平面构件拟合等方式。

异形模板浇筑法是指利用数字技术对异形模板进行定制，比如热锯切割曲面，然后利用可塑材料进行自由曲面形态的浇筑。在建筑施工过程中，混凝土的浇筑需要用模板作为模具定型使用，这些模板也需随异形外观的需要加工成不规则形状。

机械臂增材打印是一种快速成型技术，3D打印是其中的代表。3D打印不仅可用于打印塑料、玻璃等材料和一些小的混凝土构件，也可以用于整个建筑的打印建造，在技术的推进下，灵活性和适应性越来越强，在壳体结构复杂曲面形态的施工中具有很大优势。<sup>[8]</sup>

平面构件拟合是通过将曲面形态的建造对象拆分成多个平面构件，采用激光切割机、CNC数控切割机和机械臂等数字化加工设备对处理构件，然后组装拼接。激光切割机和CNC数控切割机可以对整块板材按照数字图纸切割获得到较小的板片构件，这类装置在壳体结构设计探索阶段运用普遍。

#### 五、壳体结构景观小品的设计过程

在数字化技术发展的推动下，壳体结构景观小品的曲面形态日益复杂，下面将以多边形骨架为基础的壳体为出发点研究特殊曲面形态，采用数字化找形方法，以平面构件拟合方式进行模型建造，以具体案例展现壳体结构景观小品从设计到模型制作的全过程。

整个流程主要包括以下四个步骤：首先，运用RhinoVault2进行数字化找形，获得三维壳体结构的造型。第二，在Grasshopper中利用Ngon插件进行壳体曲面形态的网格分析和处理，获得主体平板构件和连接构件；第三，使用布板工具OpenNest，对完成平面化之后的构件进行排布和标记。最后，将编好号的构件进行激光切割，通过板片拼接完成小比例实体模型的建造。

##### （一）壳体结构找形及方案比较

RhinoVault2是Rhino软件的插件，主要用于索膜和壳体结构设计，通过指定锚点和受力方向，在力的作用下使网格形态发生变化，达到找形目的。本案使用RhinoVault2进行壳体结构找形，景观小品设计方案以三角形骨架形式结合壳体结构为概念设计起点。

找形操作流程为：首先绘制平面骨架，对确定的平面形态进行曲面网格化处理，得到平面网格；然后设置边界支撑条件，包括边界形状、支撑点的选择、平面中开口的大小和位置等；再然后通过改变图形中节点的分布，并进行平滑处理，得到相互对应的形图解与力图解；最后进行力平衡运算，根据软件提示分别操作形图

解和力图解生成不同的几何形态，确保图解中的节点和网格线都处于水平力平衡状态，进行垂直平衡计算后，输入想要的高度，得到最终的壳体形态。找形流程如图1所示。

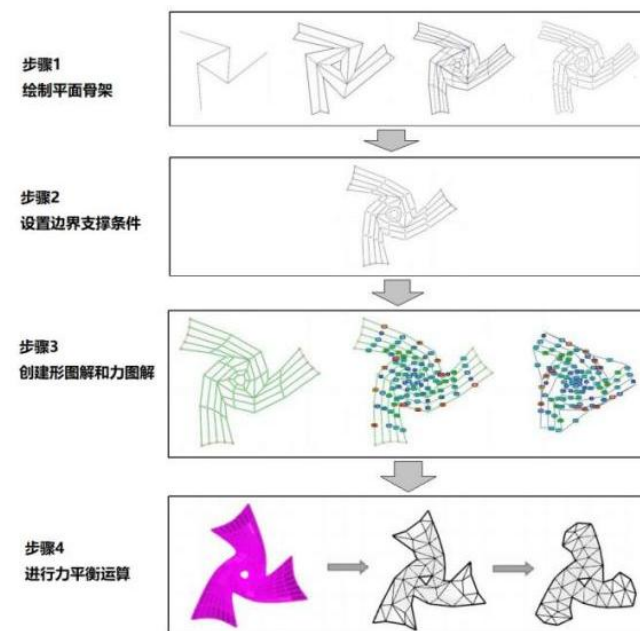


图1 RhinoVault2壳体结构找形流程（图片来源：自绘）

通过上述流程完成了一个初步方案的结构找形，确定了一种的壳体形态。从不同初步方案出发，重复这一流程，完成多个不同骨架形式、不同骨架高度、不同受力特壳体结构形态比较，最终选定受力合理且形式美观的一组进行后续设计，比较过程和结果如图2所示。



图2 不同初步方案壳体结构形态比较（图片来源：自绘）

##### （二）壳体形态网格分析处理

完成壳体结构找形，并经权衡选定三角形作为网格平面化的面板类型后，在Grasshopper中利用Ngon插件进行面板和连接件的生成。具体程序为：调用offsetmesh运算器将划分好的平面网格偏移2mm，然后调用RecipricalEdges运算器在每个三角形平面构件之间创立连接件，再调用PolylineMove运算器将连接件厚度设置为2mm。

利用Ngon生成壳体模型面板及连接件后，需要在面板恰当位置设置连接节点和进行构件开槽，具体程序为：调用loft运算器将曲线成组，调用Cap运算器再次生成构件和连接件的平面，确保每个构件都是完整的平面片状结构，调用SDiff运算器赋予平面厚度，成为厚度2mm的可搭接模型。

**(三) 壳体构件编号及构件铺平排布**

利用Ngon完成壳体形态网格处理后，为了实现模型精准搭接，采用Grasshopper中的OpenNest插件来对构件和连接件进行排版和编号。具体操作为：调用Pack Objects运算器将平板曲线轮廓一一对应地投影到水平面上，提取每个单元的平面，将其移动到地面上平铺，生成55块构件和67块连接件的编号和模型。经过构件平铺和编号，所有编号一一对应，在拼装的时候只需要找寻到带有编号的面板按照计算机中的模型放到指定位置即可。建造的小比例模型为1:100，图3为在激光切割的600x900mm木板上平铺的构件和连接件示意图。

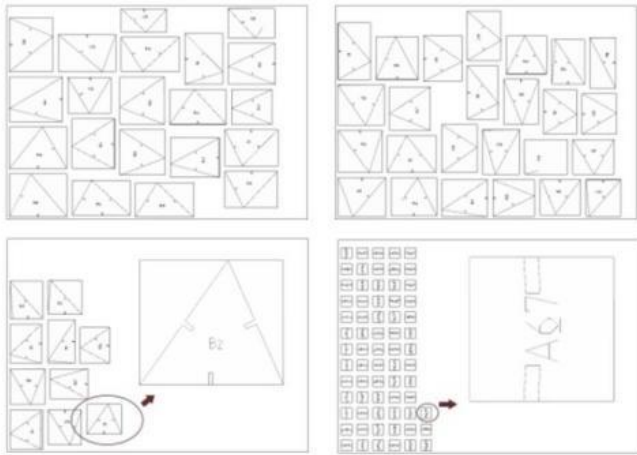


图3 壳体构件的铺平排布 (图片来源: 自绘)

**(四) 壳体结构模型建造**

经过材料对比选择，采用椴木板作为该壳体结构景观小品的模型材料，构件和连接件厚度均为2mm。共有55块构件和67块连接件，因为编号清晰使得建造过程省时省力。在小比例模型搭建的过程中，由于激光切割构件的实际尺寸与设计尺存在微小误差，使得主体构件与连接构件之间出现细微的空隙，成果模型与理想模型略有差距。(图4)如果想要获得无缝衔接的理想效果，可以借助机器人木材切割铣削工艺来确保各个构件的几何精度。

**六、结语**

从上文壳体结构景观小品从找形设计到拼装建造的全过程可以看到：结合参数化设计工具进行壳体找形和方案深化，结合数控加工技术进行模型建造，是一种行之有效的设计思路；对于不具备充分力学和结构知识背景的建筑师而言，相较于传统的手工模型制作，运用相关软件进行复杂曲面的找形设计和曲面壳体的平面化网格处理和构件排布，借助激光切割技术完成平面构件拟合的模型建造，是一种过程更高效、表达更清晰的设计方式。



图4 壳体结构模型 (图片来源: 自摄)

**参考文献**

[1] 中国大百科全书总编辑委员会. 中国大百科全书·土木工程[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1985: 452

[2] 苗洪喜. 对各种大跨度建筑结构体系类型的探讨[J]. 科技与企业, 2012, No.206(05): 205

[3] 袁烽. 基于结构性能的建筑简史[J]. 时代建筑, 2014, No.139(05): 10-19

[4] 戴庆来. 形态基因——基于形态发生学的景观小品参数化生成设计研究[D]. 南京: 南京艺术学院, 2021: 16-20

[5] 查迎. THEVERYMANY事务所表皮自承式参数化装置研究[D]. 南京: 南京艺术学院, 2022: 25

[6] 张海潮, 余光鑫. 力学找形逻辑下的数字化设计和建造实践[J]. 南方建筑, 2023, No.225(07): 96-106.

[7] 张枢健. 基于力学性能的极小曲面壳体生形优化设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022: 26-27

[8] 李茜茜. 数字技术背景下建筑设计范式的演进研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2021: 106-108

基金项目: 2022年国家级大学生创新训练计划项目“基于参数化设计的校园景观小品建构”(项目编号: 202210290095Z)

作者简介: 许睿(2001.8-), 女, 中国矿业大学建筑与设计学院本科在读, 从事参数化建筑研究;

鲁俊逸(2001.10-), 男, 中国矿业大学建筑与设计学院本科在读, 从事参数化建筑研究;

刘茜(1976.6-), 女, 硕士, 副教授, 从事建筑理论研究。