

建筑几何意识： ZHACODE 数字设计与建造的研究探索

Architectural Geometry Awareness: ZHACODE's Research Work on Digital Design and Fabrication

段雪昕 | DUAN Xuexin [英]沙杰·布尚 | Shajay Bhooshan

中图分类号: TU201

文献标志码: A

文章编号: 1001-6740 (2023) 05-0020-11

DOI: 10.12285/jzs.20231010003

摘要: 计算与设计研究组 (以下简称 ZHACODE) 成立于 2007 年, 是扎哈·哈迪德建筑事务所的核心先锋研究团队, 本文简要梳理了 ZHACODE 研究组的研究谱系和设计基因, ZHACODE 设计研究的特点是在尊重建筑性能、行为感知、材料特性、建造技术的基础上, 通过极高的数学几何研究进行整合。他们主要通过几何和数学进行建筑实验, 以寻求物理的、经济的和可行的建筑问题解决方案, 并解释了建筑几何的三个重点: 计算机辅助几何设计、几何通用语言以及累积与协同设计。通过具有代表性的实验与实际项目举例说明为什么需要有结构和建造意识的建筑几何。在最后还是简短地介绍了近期 ZHACODE 在元宇宙的最新探索。可以说在建筑领域中, 这支先锋团队担任着理论研究、技术探索, 以及教育者的角色。正是这种不断探索的实验精神, 使得他们一直处于行业和学术界的最前沿。

关键词: 建筑几何、结构与建造意识、数字设计和建造、ZHACODE

Abstract: Zaha Hadid Architects Computation and Design Group (ZHACODE) is founded in 2007, they are the core pioneer research team of Zaha Hadid Architects. This paper briefly introduces the research strand and design gene in ZHACODE Research team, They are doing the architectural experiments mainly by geometry and mathematics to find physically, economically and feasible solutions to architectural problems. And explains three highlights of their research: Computer-aided geometric design, a common language of geometry, and cumulatively and collaborative design. Exemplified the structure and fabrication aware geometry through selected projects. At the end of the paper, the latest exploration of ZHACODE in the metaverse is also briefly introduced. It can be said that in the field of architecture, this pioneer team plays the role of theoretical research, technical exploration, and educators. It is this experimental spirit of continuous exploration that has kept them at the forefront of the architecture discipline.

Keywords: Architectural geometry, Structure and fabrication aware, Digital design and fabrication, ZHACODE

作者:

段雪昕, 同济大学博士研究生, 扎哈·哈迪德建筑事务所助理总监;
[英]沙杰·布尚, 扎哈·哈迪德建筑事务所副总监。

录用日期: 2023-03

数字技术现已渗透到生活的方方面面, 也为社会带来了持续的加速发展, 而在过去的十年里, 建筑师对数字设计和建造这一主题也进行了大量的研究。扎哈·哈迪德建筑事务所 (Zaha Hadid Architects, 简称 ZHA) 的计算与设计研究组 (Zaha Hadid Architects Computation and Design Group, 以下简称 ZHACODE) 也是这一研究领域中重要的先锋队伍。去年是 ZHACODE 成立十五

周年, 研究组是由帕特里克·舒马赫 (Patrik Schumacher)、尼尔斯·菲舍尔 (Nils Fischer) 和沙杰·布尚 (Shajay Bhooshan) 于 2007 年在伦敦建立的。在 2000 年千禧年那段时间里, 尤其是在英国, 像是一个为技术庆祝的时间点, 英国政府为迎接 21 世纪兴建了许多千禧年标志性建筑, 像是罗杰斯的千禧穹顶 (Millennium Dome), 福斯特的千禧桥 (Millennium Bridge)。同时期, 很

多建筑事务所也开始成立特殊计算小组，比如福斯特的专业建模研究组（Specialist Modelling Group）。ZHA 的规模虽然在当时没有很大，但也已经非常知名，并且在中国也开始有大型的项目，基于整个社会技术发展的大背景，以及公司本身也是在那时开始快速发展，越来越需要成立一个研究组，对当下项目的应用进行探索，继而探索未来。ZHACODE 就是在这样一个大背景下成立的。研究组主要通过数学几何学进行建筑实验和探索，以找到建筑问题在物理上、经济上可行的解决方案，然后将从研究中获得的知识应用于实际项目。正是这种探索的实验精神，使得他们一直处于行业和学术界的最前沿。

一、研究谱系与设计基因

对于 ZHACODE 来讲，一个核心关键词就是创新，而为数字时代的建筑创作提供创新的建筑知识有两方面需求：一方面与设计建造技术相关，另一方面与设计本身的概念相关。前者涉及计算机和机器的知识、材料性能、结构系统等，而后

者涉及的是空间组织、设计风格、理论学派等知识。帕克里特·舒马赫则主张在设计概念中纳入计算工具和科学方法，通过开发计算基础，将科学方法统一到一个建筑知识的框架中，这也是研究组工作的目标。

基于此 ZHACODE 的研究线可以分为两大主线。第一大主线是与内容创造（Content Creation），即设计几何相关的，包括壳体结构、可展开的曲面、空间结构等二十几个小类别。第二大主线是与内容交付（Content Delivery），即建造制造相关的，包括机器人辅助制造、增材制造等十几个小类别。并且针对每个新的概念和想法，ZHACODE 基本都会沿着一条“概念—原型（prototype）—装置—项目”的流程进行探索。在充分地了解先驱所做过的相关探索后，产生回应当下问题的新的概念，有了初步理论概念后，首先会在学术领域通过各种课程或工作坊的形式进行原型研究，再通过实验性的装置进行实际建造中的探索，经过一系列从理论上和实践中的探索后，最后才是将一系列新的方法运用到实际项目中（图 1）。

在 ZHACODE 不同的研究工作中，起点都是“站在巨人的肩膀上”进行探索，许多先驱的作品都对 ZHCODE 的研究产生了巨大的影响，这些巨人不仅来自建筑领域的，还有来自数学，物理，计算机等各学科领域的，如弗雷·奥托（Frei Otto）、费利克斯·坎德拉（Felix Candela）、塞德里克·普莱斯（Cedric Price）、约瑟夫·奥尔德斯（Joseph Alders）、霍夫曼和罗恩奇（Huffman & RonResch）等。也许影响最深远的先驱之一是雷和查尔斯·埃姆斯（Ray and Charles Eames）。他们可以说是在设计领域中，最早开始投入时间和精力在研究如何与软件一起协同工作的（Neuhart J, Eames C, Eames R, et al, 1989 年），他们在使用 Mathematica 软件所作出的努力，就像我们现在使用各种不同设计软件所作的努力一样。

而 ZHACODE 的运作模式可以概括为三个角色：教育者、咨询者和合作者。教育者主要负责学术环境中教授课程，比如设计工作坊，他们在 AA, UCL 等多所学校教授工作坊，已累计超过四十多个不同的设计工作坊。而这些学术环境都可以作为

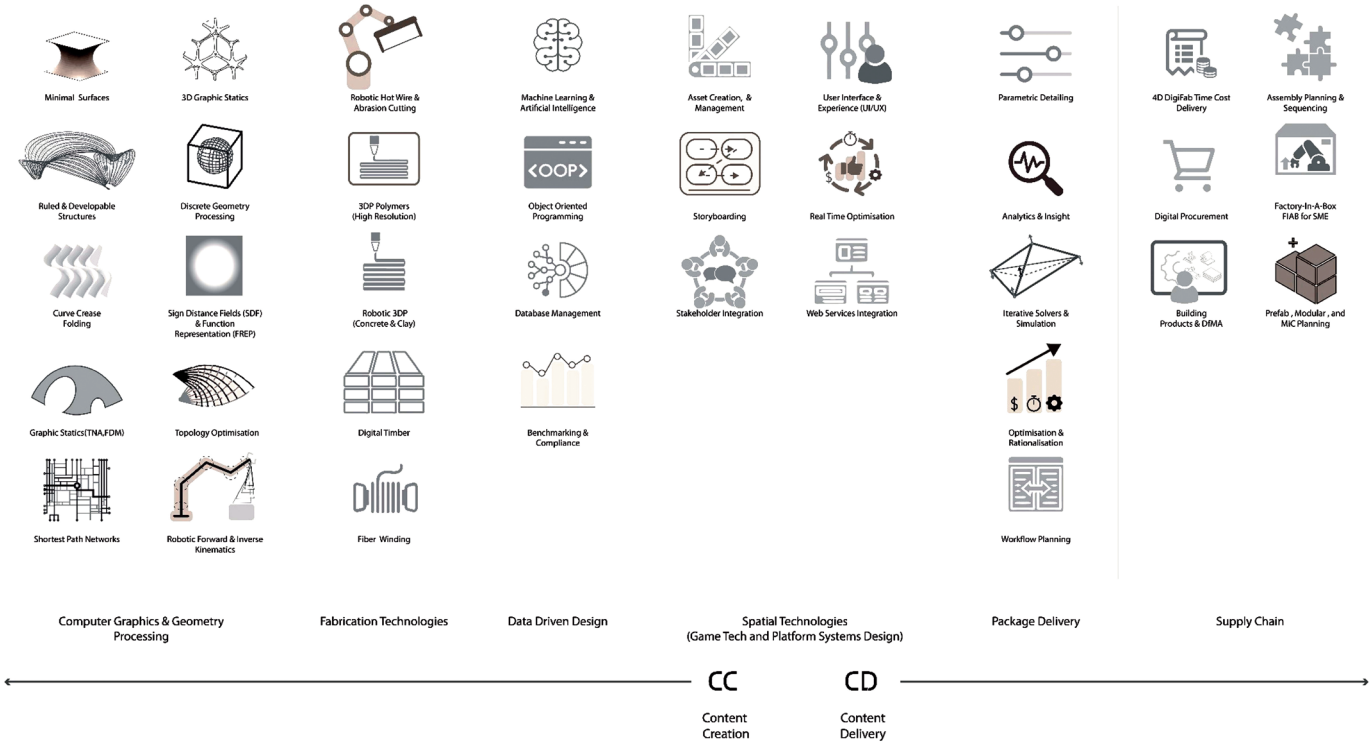


图 1: ZHACODE 内容创造（Content Creation）与内容交付（Content Delivery）研究谱系图表

正在进行的计算方法的研究与原型建造的测试平台。第二种角色，作为内部顾问，或短暂或长期地加入公司的实际项目中，传授新的设计方法、在项目中使用新的设计工具，并同时随着项目的进展继续开发和研究。作为合作者的第三种角色是与不同的技术专业团队，如三维打印公司，机械臂制造商等，进行合作研究，深入了解当下最前沿的技术。

在他们的工作背后，有两大主要的科学领域做支撑：形式科学（如数学、计算机科学、物理科学等）与自然科学（如结构物理、材料科学等）。他们在最初的8~10年里一直致力于开发数字设计和建造语言或材料和技术词汇，而在近3~5年他们也同步在试图增加对社会科学的理解，考虑社会经济、生产系统等，利用统一的设计语言来关注更多的社会问题。基于此，ZHACODE的研究工作可以分为基于物理的设计和基于社会的设计。在本文中，作者将主要关注基于物理的设计。

二、建筑几何意识

基于物理的设计是关于使结构、建造以及环境物理性在设计中可见的一个概念，这也可以总结为舒马赫提出的建构主义（Schumacher P, 2017年），表达了建筑与工程的融合，也正如菲利普·布洛克（Philippe Block）所提出的，工程思维可以增强建筑设计思维（Block P, 2016年）。ZHACODE所提出的建筑几何是指物理和机器参数被抽象为几何属性，它是具有结构信息、建造意识和环境适应性的。在ZHACODE看来，使用建筑几何有明显的益处，在结构、生态和空间上都更好。他们所谓的更好，也包含了为设计师提供更好的自由度，同时也意味着建筑几何可以成为不同学科间人们协作的共同工具。因为与纯数字的表达相比，几何可以让人们直观地理解，需要区分的是，相较于纯数学学科意义上的几何概念，建筑几何更具物理意义。为说明ZHACODE如何不断地将建筑与建筑几何的技术方面联系起来，本

文将从三个关键层面进行解释，这三个层面分别是计算机辅助几何设计，通用的几何语言，以及累积与协作设计。

1. 计算机辅助几何设计

计算机辅助几何设计是一种将物理学嵌入几何中的融合设计。就像服装设计师知道织物的悬垂性一样，计算机辅助几何设计可以帮助建筑师在数字环境中捕捉所谓的直觉。一个经典的例子是贝塞尔（Bezier）样条曲线，它类似于一个可以悬挂重量的物理弹性杆，当涉及数字方面时，它就被抽象为一个几何工具，当你在Rhino软件中绘制NURBS曲线时，它的物理特性是被隐藏的。因此，计算机辅助几何设计是物理和建造的几何设计。通常被称为建筑几何的一些引领者，如赫尔穆特·波特曼（Helmet Portman）、菲利普·布洛克、阿希姆·门格斯（Achim Menges）等，将这一理念拓展到建筑的规模，环境物理性可以被直观地捕捉，使设计师能够直接运用并释放潜在的表达潜能。

在计算机领域表达几何有三种主要方式：NURBS、网格（Mesh）和图像。ZHACODE主要使用的是网格，之所以更偏爱使用网格，其中一个原因是因为这与建筑的“表达”（articulation）有关。例如，在幕墙优化和板块划分时，与NURBS相比，网格曲面在计算机领域更容易将物理的相关属性与其几何属性相关联，在使用网格曲面时，建筑几何体更容易“意识到”物理的力，并“意识到”它们将是如何可以被建造出来。

2. 通用语言的几何

第二个方面是几何的通用语言性质，ZHACODE认为这可以将建筑师、工程师、承包商甚至客户等多个利益相关者统一起来，因为相较于理解纯数字和分析技术，绝大多数人都更容易直观地理解几何。例如，牛顿最著名的发明之一可能就是轨道的椭圆性质。这纯粹是基于几何证明，它

是基于几何和三角形的简单性质。将同样的概念扩展到建筑中，就像这些几何方法应用的著名先驱安东尼·高迪（Antonie Gaudi）一样，因为他运用了基于几何计算结构稳定性的方法，他能够用非常简单的图形方法来计算拱门的稳定性，所以他绘制的这些三角形将有助于深入了解结构的行为。基于几何来计算结构使事物在物理建构的建筑学中更接近可见。

建筑几何所指的不仅涉及结构意识，还包括建造意识、材料意识等。正如上面所提到的，高迪除了通过几何计算来计算其结构行为之外，圣家堂还有很多关于他的聪明之处，比如切割石头，以及以结构上有意义和高效的方式排列石头（Burry M, 2003年）。所以根据ZHACODE的定义，如果建筑师的设计需要工程师进行后期的单独有理化，那么这就不是一个所谓的建筑几何，这只是一个纯粹的几何表达。具有结构与建造意识的网格曲面或几何体才是建筑几何。

3. 长期积累与协作设计

第三方面就是在学术领域，实践领域的长期积累以及同其他行业的密集合作研究，跨学科的研究有助于建筑学学科的进步。就像克里斯·威廉姆斯（Chris Williams）与诺曼·福斯特（Norman Foster）在大英博物馆屋顶上的合作一样，这使得工程师和建筑师都能接触到复杂的数学。最初的原理文件对于建筑师来说几乎不可能理解消化，但威廉姆斯帮助非数学学科的人获得了这些复杂的信息（Williams C J K, 2001年）。就像安德鲁·维特（Andrew Witt）在建筑的机器认识论中介绍的，早在18世纪19世纪就已经发明的用于构建复杂曲线的绘图工具（Drawing Devise）一样，人们不需要精通数学几何，也不需要了解物理学的所有知识，就能绘制复杂的曲线和几何图形，因为相关的知识已经被这些具有几何约束的绘图工具所捕捉（Witt A, 2010年）（图2）。这与ZHACODE所做的类似，通过向历史先驱学

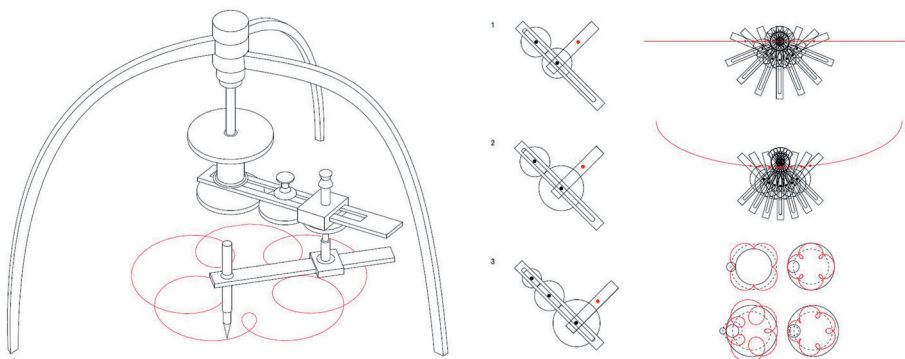


图 2：用于构建复杂曲线绘图工具发明

习，加之与不同学科专业的人合作，将知识转化为几何和简单直观的设计工具，使复杂的结构或其他学科的知识与信息变得可用 (Bhooshan S, 2016 年)。

三、结构与建造意识的几何

对于 ZHACODE 来说，真正重要的不是技术本身，但他们之所以热衷于了解技术，是为了探索特定结构条件下的空间解决方案。他们从根本上感兴趣的是探索设计空间本身，就像是弗雷·奥托 (Frei Otto) 在 20 世纪 60 年代与他的工程师和数学家在基于张力的空间设计上所做的探索一样。而针对结构和建造约束，ZHACODE 所采取的主要策略简单讲其实就是移动网格面上的控制点，直到可

以满足特定的几何条件。但关键就在于如何移动这些控制点以及其背后控制原因的巧妙性。ZHACODE 的研究项目不胜枚举 (图 3)，在下文中，作者选取了一些典型的项目进一步地详细解释各研究主题背后的巧思，尽管在文中将研究线归类为建筑几何的结构意识与建造意识，但所有的项目其实与这两个方面都相关。

1. 结构意识的几何

在结构意识的几何 (structure-aware geometry) 的探索中，本文将会以壳体结构 (shell structure) 为线索来展开说明 ZHACODE 在这方面的研究。“拉膜成型” (“Fabric forming”) 以及拉膜生成混凝土壳体结构的方法，对于实现具有复杂

的曲率，良好的曲面质量，拥有易于运输的模板材料，降低成本方面都非常有优势，这些优点都为人们研究此领域提供了持续探索的动力，回顾历史也已有大量的相关研究和文献，尤其是集中在施工方法或“找形”的设计方法上，包括力密度法 (Schek, 1974 年)、动态松弛法 (Day, 1965 年) 等。然而，上述的研究无论是从方法上还是软件方面，依然都不容易被建筑师所使用，所以导致不容易被纳入建筑几何被建筑师在设计过程中所考虑。所以 ZHACODE 团队一直都在不断地探索并形成一套软件工具，从而使得材料的自然物理特性可以引入到建筑几何中，供建筑师在早期的设计阶段就可以使用。

在众多结构意识几何的第一批研究中，其中一个是在 2010 年印度 AA 访问学校工作营上进行的研究，这也是使用织物寻找壳体结构形状的常用策略之一，如上文所讲，移动表面上的控制点是关键策略，人们需要做的只是以特定的方式沿着固定轨道拉伸同一块布料，然后在其表面上浇筑混凝土，最后成形的几何就是既具有物理意义又具有建造意义的。这个工作营是纯手工完成的，因为当时几乎没有任何数字工具可以协助。但这是一个非常有用的例子，展现了不一定需要在高科技环境中才能交付这些复杂的几何曲面，在那

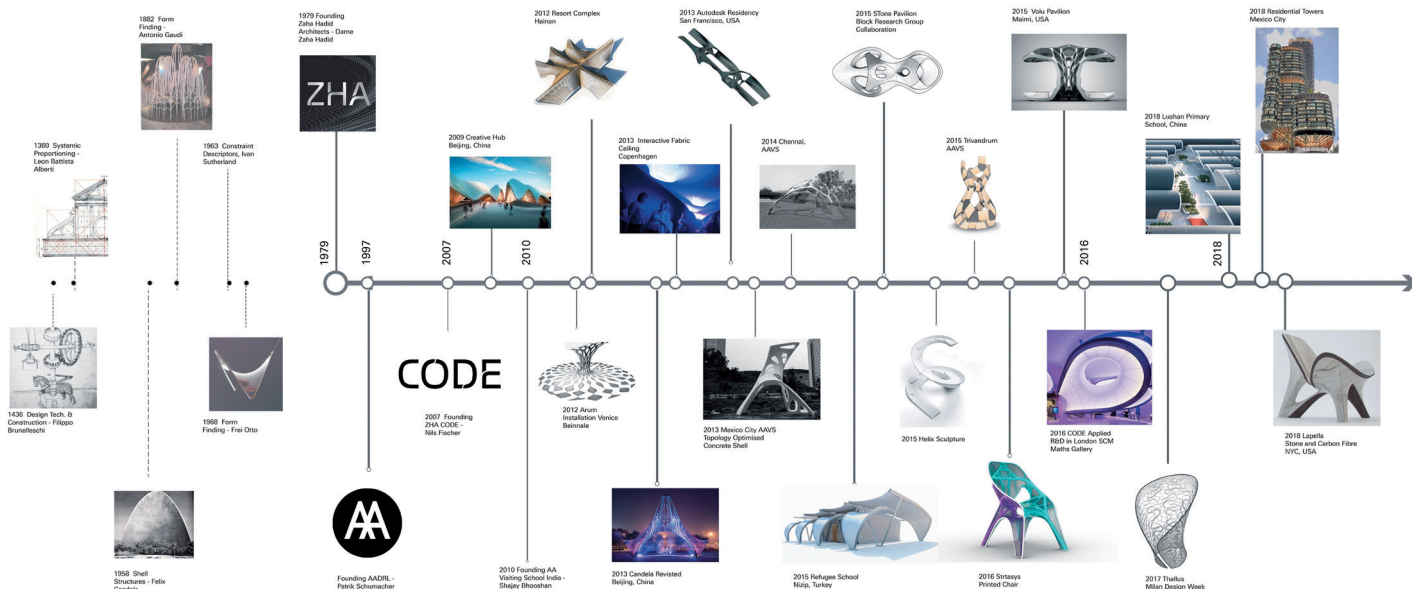


图 3：ZHACODE 研究代表项目时间图表

时，只需要几天的劳动和十几天的时间。这种纯手工的探索，可以说为数字设计和建造方面奠定了很好的基础（图4）。

在最新的关于拉膜生成混凝土壳体结构的探索中，2019年完成的 KnitCandela 可以算是非常成功的代表，这是一个实验性的展亭装置，位于墨西哥当代艺术大学博物馆内，是一种基于超轻针织模板的双曲面薄壳结构，通过引入新的计算设计方法和创新的针织模板技术，重新设计其创造性的混凝土外壳结构，也是向建筑师和工程师费利克斯·坎德拉（Felix Candela）的致敬（图5）。薄壳结构有诸多优势，比如流畅的曲面线条，大跨度的空间和轻便省料的构造，就像鸡蛋壳，握住它时就算用很大的力也不会轻易碎掉，薄薄一层却可以承受这么大的压力，这也是为何建筑师在不断地追求“像蛋壳一样的混凝土”。

同样的，KnitCandela 也是对薄壳结构的一种挑战，50m² 重量约 5t 的双曲面薄混凝土外壳，是用仅 55kg 的 KnitCrete 织物模板支撑，有趣的是，其实这 55kg 的织物模板是设计师在瑞士完成后用两个行李箱从瑞士带到墨西哥的。而且织物模板上的设计图案，不仅是装饰线条，这些线条其实是几何中的作用力线，在编织的过程中会换一种材料进行加强，很巧妙地将结构信息融入到设计当中。而且，整个设计到建造的过程也可以充分地展现多地多专业的协同合作，一种合著模式的设计，这个项目结合了位于伦敦的 ZHACODE 设计技术，位于瑞士的 BRG 计算结构性能技术以及数字建造技术，还有位于墨西哥当地的施工技术。设计到完工仅两个半月，而最后在现场施工仅用了约两周，可以说是在紧凑的时间、有限的空间和最低的预算内完成

建造，而整个造型最后之所以能做到如此轻巧，并非是因为织物这种材料，而是因为建筑几何本身，用一种巧妙的方式组织了这些材料，才使得整体结构更加轻巧。

其实与苏黎世联邦理工学院建筑技术研究组（ETH-BRG）的合作可以追溯到 12 年前，自 2010 年起，BRG 就与 ZHACODE 展开了紧密合作，一起探索为自由曲面引入结构驱动的计算工具和方法。与上文所述的拉伸力为主的薄壳结构相对的另一大类就是纯压缩的结构。在 2015 年石亭（Stone Pavillion）实验性的展亭项目中（图6），ZHACODE 与 BRG 一起探索这种纯压缩的薄壳结构的形式可能性，这个项目很好地将两方合著者独特的优势结合在一起。一方面，继承了 BRG 在纯压缩结构几何设计方法的多年创新研究；另一方面，结合了 ZHACODE 在空间与建筑美学的设计语言。双方一起探索了参数化主义建筑风格的结构性（Bhooshan V, Reeves D, Bhooshan S, et al, 2018 年）。

随后双方又一起于 2017 年在上海 DigitalFuture 的设计工作营上，使用 RhinoVAULT 插件和学生们一起探索，基于 ZHACODE 的多边形建模的代码与 BRG 推力线网络分析（Trust Network Analysis）相结合的方法，设计出新的几何图形，通过改变输入的几何图形，去理解力图如何将如何改变或发展，然后再将他们细分为小的板块进行三维模型的打印，以模拟建造的逻辑。通过这种实验的方式深入理解结构与几何形式之间的关系，探索新的有结构意识的几何形式。如图7中所示，打印模型是由小的板块拼装在一起，模型没有使

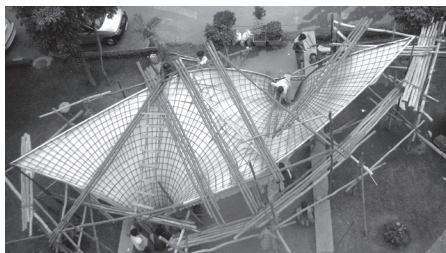


图4：2010年印度AA访问学校工作营



图5：KnitCandela项目

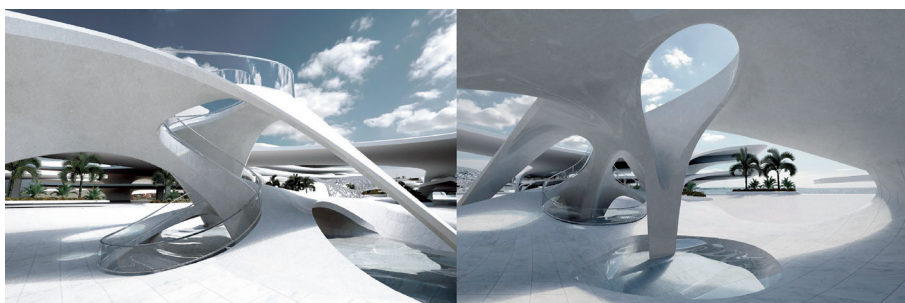


图6：ZHACODE与BRG合作的纯压缩结构石亭项目

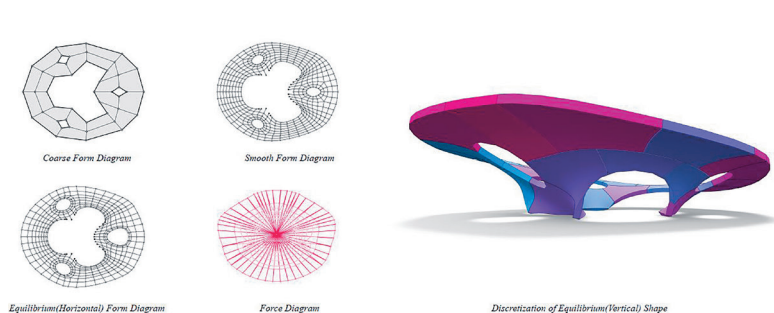
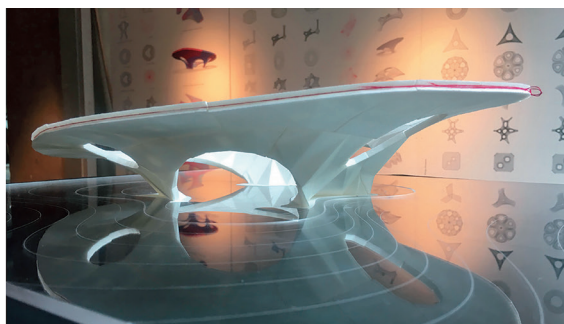


图7：2017年上海DigitalFutures工作营中一组学生的成果



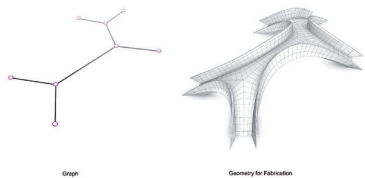


图 8: 2021 年 Striatus 人行步桥的设计模型与建成后照片



图 9: 2012 年在班加罗尔 (Bangalore) 与学生一起制作的曲线折痕折叠式雕塑

用胶水固定，完全是靠最顶部的那根红线“系”在一起，如果剪断红线，整个结构就会坍塌，这也证明了整个几何体是纯压缩受力的。通过控制几何图形，其实就是在同步控制结构中的压缩力线，进而得到更为有效的薄壳结构。这也是 ZHACODE 想建立的对建筑几何与结构意识的理解，并通过工作营的形式将研究灌输给学生，让他们在设计领域中继续探索。

而在最新的双方合作项目——2021 年底在威尼斯双年展展出的 Striatus 人行天桥——可谓是当代数字设计的一个重要里程碑，它是首座三维打印的无钢筋砌块拱形人行天桥，而且它也是干组装的，没有使用任何砂浆或任何胶水（图 8）。从其名字 Striatus（可译为带条纹的），就可以非常直观看出其结构和建造逻辑，混凝土在打印时是垂直于主要结构受力面的，从而创造了一个纯压缩的“条纹状”结构。整个结构的强度是凭借其建筑几何造型获得的，而非像传统混凝土受力那样凭借材料堆积和材料自身的强度获得的。由于混凝土砌块被巧妙精确地放置，可以使得力在纯压缩受力中传递。作为高性能的建筑几何（high performance geometry），此设计可以说是达到了低耗能、低碳、薄而轻的结构，并且具有高强度，大跨度和高耐久性的优势。这个项目也是双方与 incremental3D (in3D) 一起合作研究的项目，而所有这一切也都是站在巨人的肩膀上实现的，不仅是由目前的团队完成的，而是一项长期累积的研究发展。从 2009 年菲利普·布洛克开创性的提出推力线网络分析 (TNA)，到基于此发展的 RhinoVAULT 设计工具，使得设计师可以

方便地将结构约束融入设计初期，再到随着数字技术的发展，可以在实际建筑中更广泛地实现，是经过不同研究者的多代更迭，才打破了传统的从设计到建造的线性模式，实现了设计结构建造一体。

2. 建造意识的几何

关于建造意识的几何 (Fabrication-aware Geometry)，下文将用曲面折纸和三维打印这两个研究主题为例来展开介绍如何将建造的属性融入到建筑几何当中。曲面折纸在现代历史中最早始于包豪斯，后来一些数学家和艺术家，像是罗恩·莱斯赫 (Ron Resch) 和大卫·哈夫曼 (David Huffman) 都对这一领域的进步作出了很多的贡献，而赫尔穆特·波特曼也正在运用数字工具来拓展这个领域 (Demaine E D, Demaine M L, Koschitz D., 2011 年)。从物理上来说，这非常简单，只需在纸上划线并进行折叠，然后就可以自然地得到个三维曲面。基于简单的原则和前人的研究，在 2012 年 ZHACODE 与 35 名印度学生共同完成了一次放大版的研究——曲线折痕折叠式雕塑 (Curved Crease Folded Sculpture, 图 9)，随后基于此在 AADRL 的工作营也是手动地进行了从二维到三维的转换，然后放大到金属

板、塑料板等。不同的是，在印度工作营蛋形雕塑探索的基础上，除了继续探索不同的二维图案如何可以转化为新颖的三维几何形状和形式外，更进一步的是需要考虑结构受力，做到一件能够承受正常使用时产生的作用力的家具 (图 10)。

这种从二维到三维的转换，虽然可以简单并直观地通过手工快速完成和测试，但却不容易被数字化。所以在各个学术工作营中的实验，都是先用小的纸张进行测试后，再进行等比例放大到金属板或塑料板上进行折叠。而 ZHACODE 也是基于此一直在努力利用 Maya 或 Rhino 将这种直觉带入数字领域，试图将物理的直觉捕捉转化为几何的运算，ZHACODE 将其背后的数学知识简化为可操作性的数字工具，用一句话概括，就是在一个平面上围绕一个顶点的所有角度加起来都需要等于 360° ，这意味着可以将其展平。我们可以看到这背后，并没有疯狂的数学计算，通过一点编程，只要移动面上的控制点来确保满足这两点条件即可（所有面都是平的和所有顶点的角度加起来都是 360° ）。可以看出与之前的原则一样，移动网格面上的控制点直到满足特定条件的设计思想在此也适用 (Bhooshan S, Bhooshan V, ElSayed M, et al, 2015; Bhooshan S, 2016 年)。

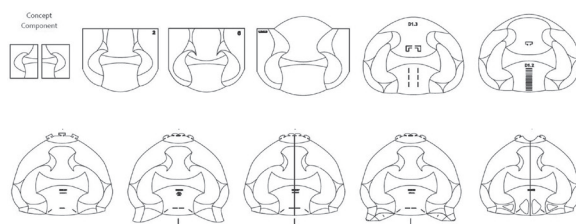


图 10: 2013 年 AADRL 学生 (Julian Lin, Henry David Louth, Yang Du, Guillermo Oliver) 设计的曲线折痕座椅 (Rocking chair by curved origami)

除了在学术领域进行探索外，这项研究也在不同的装置中进行实际建造的探索，在2012年威尼斯双年展的Arum装置项目中，曲面折叠的工艺变得复杂许多，因为它需要同时展开400多个面板，并且所有边界都需要对齐，但两个需要满足的几何条件还是一样的。所以整个设计生成过程其实就是从概念的三维网格面生成相应的控制点的网络，然后再不断地移动所有控制点并同步进行计算，直到所有的控制点都满足几何条件，最后直接生成一个可展开的二维平面几何图形。在这个装置中，可以看到曲面折叠的潜力，它提供了一种可以通过曲面折叠几何找形的设计方法，并且这个设计方法可以同时将建造的约束条件融入其中，是可以扩展放大到建筑空间尺度的（图11）。

从最开始的蛋形雕塑，到曲面折叠家具座椅，再到装置展亭，不仅是从规模上的增长，更多的是看到数字建造逐渐变得主流和可被接触到，而ZHACODE在曲面折纸研究主题的关键贡献主要在于提供了一种可扩展的、便于探索的数字方法，完

成了对参数化技术的描述，以便可以直接从数字生成的几何中生成建造的数据。

另一个值得一提的关于建造意识的几何研究线，则是最近ZHACODE在开发的三维打印混凝土的研究线。混凝土三维打印并非什么新想法，但ZHACODE的创新性在于如何生成这些三维打印的形状，驱动的问题在于如何理解三维打印，尤其是以一种直观的方式在打印混凝土中，理解材料在三维打印时的行为。

因为打印的行为是逐层生成形状，所以为了融合建造与设计，第一直觉自然会思考到的是，如何让几何造型的设计生成本身也变成逐层生成的过程。典型的三维打印过程是，设计师建模一些任意的几何造型，然后将其随机切片成层以进行三维打印，打印软件并没有直观的可视化这些切片。ZHACODE所做的像是个反向思维，几何造型并非任意的形状，而是约束在设计图层中的，这些图层也将是之后打印时机械臂所遵循的路径，不仅仅是设计的形状在设计过程中可见，每一个切片都是随着几何造型的生成而有所设计的

(Bhooshan S, Van Mele T, Block P, 2018年)。而这些图层路径的生成算法是借用了MRI三维扫描技术的思路，就像在Photoshop中查找边界，可以将整个几何体表示为图像堆（image stack）。通过使用图像技术而非传统的典型方式（如NURBS曲面）表达几何图形，这一点为什么很重要？因为这使得在早期设计找形的过程中，自然地将之后的打印路径进行融合，而非传统的设计完成后进行随机的切片再打印，因此这些路径图层已经自然地结合了设计意图和后期制造的约束。而ZHACODE开发的设计工具和算法则是给设计师操纵这些几何形状的机会，这套算法是在Rhino和Grasshopper中开发的，设计师需要做的只是定义顶部和底部，而在这两者之间所生成的几何形状则是从一个图像融合到另一图像的自然结果（图12）。虽然这个过程听起来很简单，但它的巧妙就在于设计师可以基于此完成各种复杂的几何图形和复杂的拓扑造型。这套方法也在2018年上海DigitalFutures的设计工作营和学生们一起进行了形式上可能性的探索，以及用黏土代替混凝土做了实际打印的测试（图13）。

除了在工作营上的探索，在上文中提及的Striatum人行天桥就是利用这种三维打印技术，创造了全新的混凝土语言。不同于20世纪铸造式的混凝土语言，ZHACODE试图创造一种新的混凝土设计语言，把传统砖石结构中的智慧与新的数字建造工具相结合，混凝土材料在这个语境下，并非是一种连续的液体根据模具进行灌注，而是被看成“微型的砖石”，被机械臂打印出来。创新的关键在于砌块在两种不同尺度上的应用，一种是砌块间以仅压缩受力的布局排列，另一种是砌块本身在打印时各层与受力面要尽可能正交。这两种尺度上的创新使得整体结构不需要任何其他加强筋，而且可以做到50%~60%的中空，精简巧妙的设计方法起到了事半功倍的巨大作用（图14、图15）。正是因为ZHACODE结合新的研究和技术，创造了新的几何形状，对于ZHACODE来讲，这也是可持续性发展中很重要的一点，创

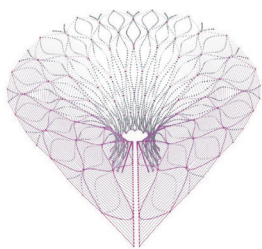


图11: Arum装置曲面控制点网络与2012年威尼斯双年展Arum装置照片

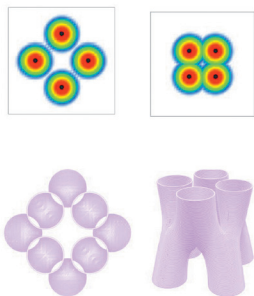
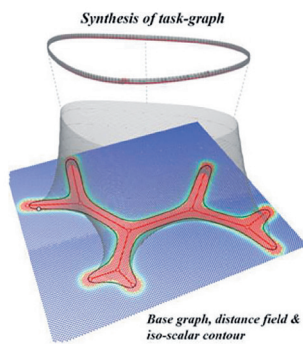


图12: 任务图的合成 (Synthesis of task-graph)

图13: 2018年DigitalFutures三维黏土打印工作坊其中一组学生的成果

造合适的形状 (appropriate shape), 这与材料本身无关。合适的形状将消耗更少的材料, 提供更多的强度。在这个项目中, 他们就做到了减少混凝土的碳足迹, 并保留混凝土的所有其他好处, 例如耐久性和广泛可用性。实现了“减量化、再利用、再循环” (reduce, reuse, recycle) 的设计原则。关于这个项目, 除了结构与建造意识的建筑几何, 还有一点值得一提, 就是通用的建筑几何起到了促进不同专业间交流协作统一语言的作用 (Bhooshan S., 2017 年), 使得多方真正地从设计构思到最后落地一起合著这个项目。在设计构思过程中, BRG 的结构设计和评估以及 In3D 三维打印的约束都会实时的反映到设计中, 三方一直无缝地沟通, 因为在项目进展的 6 个月期间正好是在疫情控制最严格的时间段里, 直到项目完成前, 整个过程三方从未在线下实际会面。这个项目像是对协作设计、协作思维方式的一种致敬。之所以具有协作性, 也正是因为它依赖于 ZHACODE 一直强调的通用的几何语言, 这对建筑领域有很重要的贡献, 不同于 20 世纪的建筑生产方式是依赖于图纸的, 这

已经与当下的数字设计或机器建造不相适应, 通过一种通用的几何语言, 可以使得结构、建造等多方提前融入设计。

3. 建筑几何的实践

通过所有这些在计算框架下的开发和对技术的研究, 逐渐地除了实验性的展示装置项目, 这些技术和方法也在 ZHA 很多实际建筑项目中进行了应用, 其中最能描述他们研究成果和精神的就是 2016 年完成的位于伦敦的科学博物馆中的数学展馆设计 (图 16)。此项目可以说是对研究组在建筑几何的设计方法、跨专业协同设计、创新性等各方面的最好总结。展馆中有两个设计特征可以很好地说明结构与建造意识的建筑几何这个概念, 这两个特征分别是中央的膜结构和机器热切割混凝土长凳。

展馆的主要概念来源于策展需要将哈德利飞机放置于画廊的中心, 设计的主要概念就来源于飞机周围的气流模拟, 并以此作为空间布置原则 (图 17)。中央的膜结构是对长期历史先前经验的吸收与转移的研究结果, 通过使用最新的计算方法和

数字工具, 再次扩展了弗雷·奥托的最小面找形 (Minimum Surface) 的深入研究, 首先利用方程代码做最小面找形, 然后根据实际织物建造的条件进行合理化。同时在设计过程中, 不仅是数字上的模拟, 团队依然会做小规模的原型物理模型, 以更好地了解几何结构上织物膜的性能和接缝布局。事实上, 正是这种深入了解建造约束的研究模式, 使得项目在落地阶段可以更好地延续设计意图。比如, 在最开始工程方提供的接缝布局只是机械式的随意拼接, 并没考虑几何曲面本身的优势, 从而导致有很多三角面, 也是对材料的一种浪费。正因为在设计的同时, ZHACODE 有对工具和制造限制的深入了解, 再加上之前积累的关于织物膜的知识, 他们最后可以推动制造商提出更好地接缝布局, 推动了建造与设计的融合 (图 18)。

另一个设计特征是展馆中的 16 组热切割混凝土长凳, 长凳的几何造型继承了数学对规则曲面 (rule surface) 的长期研究历史, 结合了当代机器建造的方法 (图 19)。因为在设计之初就已经考虑了机械臂的路径轨迹, 这些长凳的几何造型不



图 14: 2021 年 Striatum 人行天桥混凝土砌块三维打印



图 15: 2021 年 Striatum 人行天桥混凝土砌块截面



图 16: 伦敦科学博物馆数学展馆室内

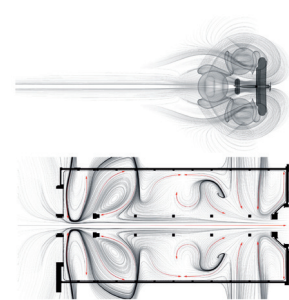


图 17: 数学展馆设计灵感来源: 飞机的流场模拟



图 18: 数学展馆设计原型的手工模型



图 19: 数学展馆的热切割长凳

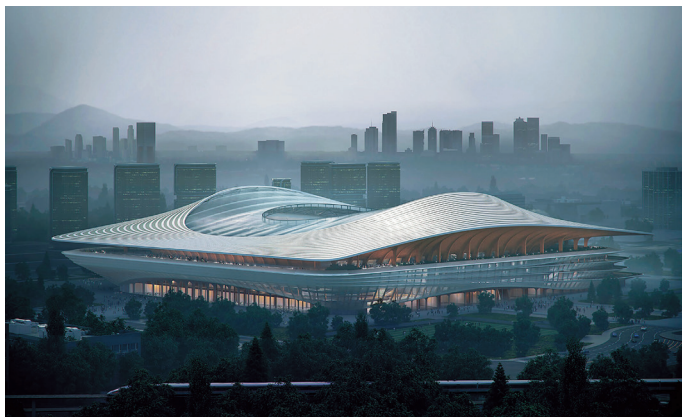


图 20: 西安国际足球中心效果图



图 21: 罗坦岛住宅设计效果图

是随意画出来的，而是为了配合机械臂所能做到的限制而设计的，长凳上的每一个弧面与曲线都是机器制造与设计美学的结合。也正是因为这种巧妙地融合，从一个完整的砌块到一个长凳，仅需 7~8 次的切割，在 3 分钟能即可完成，而普通的这种规模的产品通常需要几个小时才能完成切割。除了大幅度地减少了制造时间和节省材料，还有个优势就是每个长凳都可以有不同的设计，因为对于机器来说，只要在轨迹路径约束的范围内，调整曲面弧度与角度，只是调整了一些参数，对于其生产时间都是一样的。

在实际项目中，我们不难看到里面包含了多种经过验证的研究的应用，比如数学展馆的长凳来自多年热线切割的研究，织物膜来自长期对拉伸结构的研究。可以看到自 ZHACODE 成立以来，前 10 年长期积累的研究与探索，在近 5 年，也是在这个数学展馆建成后，应用到实际项目的规模也越来越大。他们在结构与建造意识的建筑几何研究的潜力也得到了更大的发挥，就像这个预计在 2023 年完工的西安国际足球中心，其开创性的大跨度双层正交索网屋面设计，极大地降低了二次结构的用量与复杂度，实现了最小负载的同时，最大限度地节约了材料（图 20）。通过使用 ZHACODE 自己的找形数字工具，搭建一套各专业都可以直观理解的共通的建筑几何，而非纯数字上的分析，这样可以更好地与结构工程师在设计初期进行协作，将各限制条件与参数输入到建筑几何

中，进行统一的设计，从而推动技术上的边界，做到更轻盈的结构。从上文的实践例子中，无论是小到人行桥的设计，还是大到体育馆的设计，我们可以看到对于 ZHACODE 来讲非常重要的内驱力其实是“负责的设计”（Responsible Design）。ZHACODE 的研究和探索不仅确保了 ZHA 流线性动态性的建筑几何是有结构意识的，具有生产意识的和具有环境适应性的。更意味着这些几何能够真正平衡高性能要求：一方面是建筑物高强度和耐久性的要求；另一方面是低碳排放、低能耗和运行能耗的要求。

四、建筑几何的下一阶段

ZHACODE 研究的很大一部分是基于物理方面的，并将相关的物理属性抽象为几

何，因此这可以成为设计师与工程师、制造方合作的工具。同时，这也为他们研究的下一阶段提供非常重要的基础：让未来的用户也提前参与到设计过程中，让每个人都有发言权。

他们在 2017 年为洪都拉斯的加勒比罗坦岛（the Caribbean island of Roatán, off the coast of Honduras）所设计的数字模块化住宅项目中，就实现了让未来的住户自己“设计”自己未来的家（图 21）。ZHACODE 设计开发了一个游戏，或者说是类似游戏的数字建筑平台，作为未来居民的用户可以登录到一个网站进入游戏，他们可以选择未来家的大小，布置室内和家具（图 22）。每个家庭可以选择一到五个体素（voxel），每个体素约 35m²，4m 高，人们可以根据喜好进行不同的组合，可以有多达 15000 种不同的变化以满足不

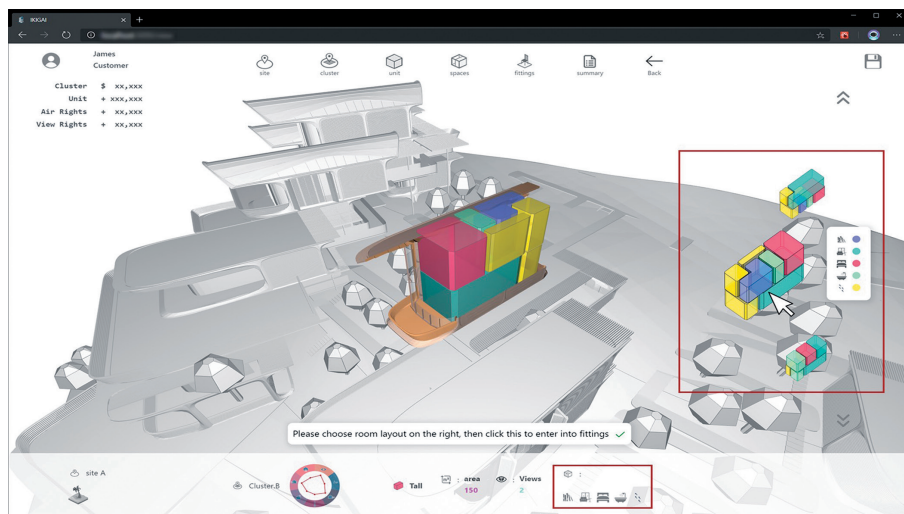


图 22: 罗坦岛住宅游戏界面

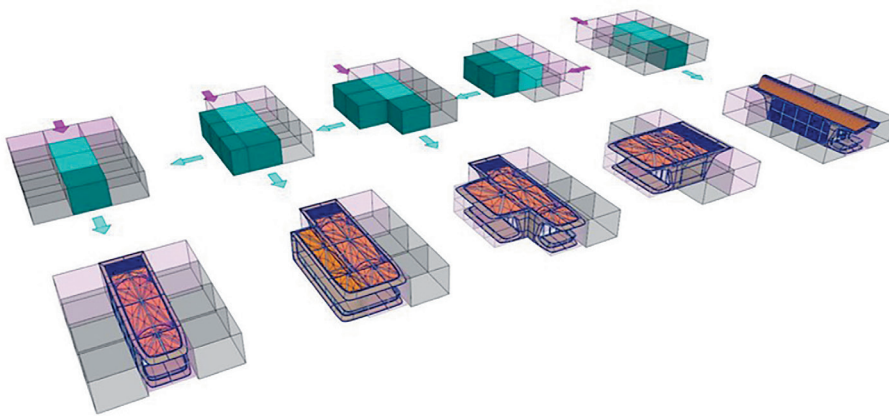


图 23: 罗坦岛住宅空间模块

同的需求（图 23）。不仅如此，他们还可以在在游戏中四处走动，感受从房间中可以看到什么。不同于在二维图纸上设计平面的布局，这更多的是通过空间体验在做设计，因为通过游戏，用户可以便捷直观地感受三维空间。游戏结束后，将根据相应的算法生成建造所需的“图纸”，直接加工建造。这个数字平台整合了从设计到建造的过程并且实现了部件的不同配置，做到了每个住宅的个性化建造。

ZHACODE 致力于让更多的参与者参与到设计过程中来，他们所做的就是设计这些空间元件（spatial kit），探索不同类型的可变性。而用户需要做的就是进行不同的组合，就像人们在宜家订购家具一样。ZHACODE 将这种空间元件的思考方式来规划空间，再加上建筑几何的其他物理属性参数，比如考虑环境性能、建造因素等，最后统一整合到他们搭建的游戏化的数字平台中，就可以使得越来越多的人参与到设计过程中，实现参与式设计（participatory design）。而从另一个层面来讲，这也表达了可持续设

计的第二种态度，除了上文所述的关于几何形状的可持续，对于 ZHACODE 来讲可持续性也是关于吸引人的参与式设计（engaging design）。对于投资者来说，他们可以提前知道正在建造的建筑是受用户喜欢的，不必在建造后发现是没有市场需求的。而对于建造方来说，他们所接收到的建造订单，也都是按需定制的，不会造成浪费。可以说，可持续设计在这个语境下，是指时间和资源在使用方面都更加高效。

除了游戏技术慢慢地被引入到建筑设计过程中，随着过去 5 年区块链技术元宇宙爆发性的出现，以及当前的大型多人在线（MMO）视频游戏制作技术和高速网络云技术的快速发展，使得网络空间成为互动丰富的、在社交和感官上都引人入胜的三维空间。换言之，互联网也正在慢慢地成为建筑。而在创建赛博物理的建筑平台（cyber-physical architectural platform）背景下，ZHACODE 所提倡的建筑几何更是一种高度相关的设计技术范式。与关注工程和建造的建筑信息建模（BIM）范式

不同，建筑几何（AG）可以与计算机辅助形式设计（computer aided shape design）、用户体验分析和其他计算机图形技术（computer graphic technologies）更好地结合起来。因此，建筑几何、游戏技术和元宇宙在底层技术、对设计师友好的交互设计思想等方面非常兼容。

自 2020 年起，ZHACODE 一直在通过实验性的项目不断地发展空间技术集（Spatial technology stack）和设计程序，并积极地扩展到元宇宙相关的设计中。比如 2021 年底在迈阿密海滩巴塞尔艺术展（Art Basel Miami Beach）发布的 NFTism 虚拟美术馆，就旨在探索元宇宙中的建筑与社交的互动。而在 2022 年发布的利伯兰元宇宙（Liberland Metaverse）更是在城市的尺度上进行探索，利伯兰自由共和国作为目前第三小的主权国家，虽然实体土地仅有 7 平方公里，但已经吸引了众多数字公民（e-citizens）。不同于目前元宇宙的娱乐与游戏性质，利伯兰元宇宙可以说是对赛博城市的一种真正地探索。它的城市和建筑设计具有丰富的互动和沉浸式的三维空间环境。利伯兰元宇宙试图将元宇宙和 web 3.0 愿景与城市规划相结合，作为一种去中心化的、开放参与式的空间技术和治理技术的探索（图 24~ 图 26）。

总之，空间技术集（Spatial Technology Stack）将建筑几何和游戏技术统一起来，可以有力地支持创建环境，提供新颖、吸引力和有活力的空间用户体验，而这种以建筑和游戏技术为动力的赛博物理建筑和城市化（cyber-physical architecture and urbanism），对我们的未来社会来说也是至关重要的。



图 24: NFTism 虚拟画廊设计



图 25: 利伯兰元宇宙设计



图 26: 利伯兰元宇宙界面

五、结语

ZHACODE 就像是一种催化剂，也像是一种转移机制，不断地将不同学科和不同专业的知识转移到建筑学科中。ZHACODE 通过向先驱学习和多领域合作来进行研究工作，包括壳体结构、曲面折纸、拓扑优化等，都是基于结构、基于材料以及基于建造的，而他们特殊的研究框架还涉及计算机图形、数字设计、机器人建造技术，以及游戏引擎和 Web 服务的技术等。但所有这些研究的核心线索都是建筑几何，他们通过建筑几何利用计算与数字技术为前几个世纪的知识做升级。

ZHACODE 所提倡的建筑几何有诸多优势，虽然现在大的建筑环境还是与现代主义保持一致，生产系统还都是以制造直线或矩形为基础，但随着前沿技术不断地商业化，这些新形式的数字设计与数字建造正在慢慢成为主流，这种数字化设计与建造可以克服 20 世纪建筑的大批量同质化生产的贫乏。ZHACODE 将他们的探索不断地纳入 ZHA 的设计中，以解决建筑环境的参与性和可持续发展的紧迫问题。他们的思想、项目和技术都旨在共同创造一个适应于 21 世纪的建筑——互动密集的、体验丰富的、以用户为中心的、资源利用高效的建筑。

ZHACODE 长期以来所作的努力也是在引领建筑师以及与建筑相关行业的人们在数字技术上投入精力，无论他们在探索哪一块领域，其主要目标都是提高建筑师和更多不同专业的人对几何的理解，因为如果能让事情以几何图形的形式被人直观地理解，那么就可以有更多的人加入交流，从而真正做到建立协作网络，一起推动建筑学科的发展，为建筑环境升级。

参考文献

[1] Bhooshan S, Bhooshan V, ElSayed M, et al. Applying dynamic relaxation techniques to form-find and manufacture curve-crease folded panels[J]. Simulation, 2015, 91 (9) : 773-786.

- [2] Bhooshan S. Interactive design of curved-crease-folding[D]. University of Bath, 2016.
- [3] Bhooshan S. Upgrading computational design[J]. Architectural Design, 2016, 86 (2) : 44-53.
- [4] Bhooshan S. Parametric design thinking: A case-study of practice-embedded architectural research[J]. Design Studies, 2017, 52: 115-143.
- [5] Bhooshan V, Reeves D, Bhooshan S, et al. MayaVault—a mesh modelling environment for discrete funicular structures[J]. Nexus Network Journal, 2018, 20: 567-582.
- [6] Bhooshan S, Van Mele T, Block P. Equilibrium-aware shape design for concrete printing[C]//Humanizing Digital Reality: Design Modelling Symposium Paris 2017. Springer Singapore, 2018: 493-508.
- [7] Block P. Parametricism's Structural Congeniality [J]. Architectural Design, 2016, 86 (2) : 68-75.
- [8] Burry M. Antoni Gaudi's computational legacy[C]//Human-Centric Computing Languages and Environments, IEEE CS International Symposium on. IEEE Computer Society, 2003: 4-4.
- [9] Demaine E D, Demaine M L, Koschitz D. Reconstructing David Huffman's legacy in curved-crease folding[J]. Origami, 2011, 5: 39-52.
- [10] Neuhart J, Eames C, Eames R, et al. Eames Design: The work of the office of Charles and Ray Eames[J]. (No Title) , 1989.
- [11] Otto, F (ed) . Tensile Structures: Design, Structure, and Calculation of Buildings of Cables, Nets, and Membranes[M]. MIT, 1967.
- [12] Schumacher P. Tectonism in architecture, design and fashion: Innovations in digital fabrication as stylistic drivers[J]. Architectural Design, 2017, 87 (6) : 106-113.
- [13] Williams C J K. The analytic and numerical definition of the geometry of the British Museum Great Court Roof[J]. Mathematics & design, 2001, 200: 434-440.
- [14] Witt A. A machine epistemology in architecture[J]. Translated By Annette Wiethuchter. Candide—Journal For Architectural, 2010: 37-88.

图片来源

图 1, 图 3: 由 ZHACODE 绘制。

图 2: Andrew J. Witt “A machine epistemology in architecture.” (2010 年)。

图 4, 图 6, 图 7, 图 9~ 图 14, 图 16~ 图 26: Zaha Hadid Architects 提供。

图 5: Juan Pablo Allegre 摄影。

图 8: Naaro 摄影。

图 15: Alessandro dell'Endice 摄影。