

国际大规模定制住宅设计研究： 概念、挑战与对策

Design for International Mass Customized Housing:
Concepts, Challenges and Solutions

王江 | WANG Jiang 赵伯伦 | ZHAO Bolun 郭芸麟 | GUO Yunlin 赵继龙 | ZHAO Jilong

摘要：大规模定制与住宅设计的关联研究作为应用制造业的方法改造建筑业的重要命题之一，已经成为工业化住宅产业发展的新机遇、新挑战。首先，通过相关概念的简述，指明大规模定制住宅是一种面向用户异质需求的建筑类型，在设计中具有一定的灵活性与可变性，在成本上接近或等于大规模生产；其次，对国际大规模工业化住宅设计的发展历程进行归纳总结，剖析其研究现状和面对的挑战；最后，在案例分析的基础上，梳理了大规模定制住宅设计在面向建筑师的设计规则制定和面向用户的交互模式构建两方面的研究进展，旨在为我国当下住宅产业化发展提供借鉴。

关键词：大规模定制、工业化住宅、用户需求、设计灵活性、数字建筑、住宅产业化

Abstract: As one of the important propositions of applying the methods of Manufacturing to transform the Building Industry, the research on the relationship between mass customization and housing design has become a new opportunity and challenge for the development of the Housing Industrialization. Through the brief introduction of relevant concepts, this paper indicates that mass customized housing is a building type facing the heterogeneous requirement of users, which has flexibility and variability in design process and is close to mass production in cost. Furthermore, this paper analyzes the development process of international mass industrial housing design and points out its research status and challenges. Lastly, on the basis of case studies, the research progress of design for mass customized housing is reviewed in two aspects: design rule formulation for architects and interaction mode construction for users. This also contributes to the current advancement of Housing Industrialization in China.

Keywords: Mass customization, Industrialized housing, User requirement, Design flexibility, Digital architecture, Housing industrialization

作者：

王江（通讯作者），山东建筑大学建筑城规学院副教授，硕士生导师；
赵伯伦，山东建筑大学建筑城规学院硕士研究生；
郭芸麟，山东建筑大学建筑城规学院硕士研究生；
赵继龙，山东建筑大学建筑城规学院教授，博士生导师。

教育部人文社会科学研究规划基金项目（18YJAZH088）；山东建筑大学博士科研基金项目（X21111Z）

DOI: 10.12285/jzs.20200508002

在全球建成环境中，住宅建筑的存量是最多的，但针对不同社会文化环境下个体或家庭偏好的反映却并不充分。伴随着工业文明以来经济适用型住宅的大规模建设，用户需求愈发呈现出多样性、个性化特征。对工业化住宅设计而言，满足用户需求本应属于基本前提，然而在现实中却并非如此。工业生产中的多样性或个性化要求通常意味着低下的生产效率与繁多的部件类型，而理想的生产效率要通过重复性、标准化的批量生产实现。大规模建设的工业化住宅虽能在生产力、

质量和效率上满足住宅本体的基本要求，但在设计环节上却表现得灵活性差、信息封闭、效率不高且资源利用率低下。因为用户无法参与设计，所以建筑师在所负责的大部分住宅设计任务中难以兼顾用户日益增长的个性化偏好。近年来，随着数字智能技术的快速发展，传统的住宅设计模式迎来了变革契机，特别是开始借鉴“工业4.0”时代制造业在大规模定制生产方面积累的先进经验——在大规模生产的成本投入基础上开展具有灵活性、可变性的工业化住宅设计。

一、大规模定制住宅的相关概念

1. 大规模生产

早在 14—15 世纪, 威尼斯造船厂 (Venetian Arsenal) 就开始以每天一艘船的效率大规模生产船只。到了 1913 年, 亨利·福特 (Henry Ford) 创建了全球第一条流水装配线, 通过机械重复式操作, 不断提高生产效率和产量, 将每辆 T 型车的总生产时间从 12 小时 8 分钟节省至 2 小时 35 分钟, 且在不低于质量的前提下控制成本和价格, 实现了汽车的大规模生产与普及应用。大规模生产依托于标准化设计和预制化技术, 主要环节包括对生产过程的分解、标准组件的预制和流水线的组装等, 并通过规模经济实现综合效益, 即生产效率随着生产规模的增加而增大, 而成本也会相应大幅减少。在福特的装配线概念和系统工程思想的启发下, 勒·柯布西耶 (Le Corbusier)、巴克敏斯特·富勒 (Buckminster Fuller)、沃尔特·格罗皮乌斯 (Walter Gropius) 和让·普鲁维 (Jean Prouve) 等现代主义建筑先驱, 开始尝试将汽车工业化生产所形成的兼顾交付时间和生产成本的规模经济特征引入建筑工业化领域, 为工业化住宅等容易造成同质化现象的建筑市场, 提供不同思路的大规模标准化设计。特别是柯布西耶在 1922 年《走向新建筑》中提出“住宅是居住的机器” (the house is a machine for living in), “像造汽车一样造住宅” (make houses like cars), “流水线上生产住宅” (make houses on an assembly line) 等观点, 将大规模生产称为“伟大时代刚刚开始……我们必须要建立实现大规模生产的精神, 生产大规模住宅的精神, 居住于大规模住宅的精神, 构想大规模住宅的精神”^[1]。

2. 大规模定制

大规模定制 (Mass Customization) 的思想萌芽于“福特主义”。福特从工业化的角度最早对定制的概念进行了假设, 借

此为用户提供多样化的产品。虽然当时福特所设想的定制汽车概念因工艺局限而被选择性放弃, 但是这一假设后来成为了工业生产模式由大规模生产向大规模定制生产转型的原动力。1970 年, 美国学者阿尔文·托夫勒 (Alvin Toffler) 在《未来的冲击》中首先提出大规模定制的理念, 并在 1980 年将其描述为当代社会的《第三次浪潮》; 随后, 斯坦·戴维斯 (Stan Davis) 在 1987 年《完美未来》中正式定名。1993 年, 约瑟夫·派恩 (Joseph Pine) 对大规模定制的概念进行了完整的描述: 在成本与大规模生产接近或相同的条件下, 基于用户需求开展定制化生产。1997 年, 派恩与大卫·安德森 (David M. Anderson) 进一步对大规模定制进行了深层次的剖析和系统化的定义, 全面介绍了如何为异质需求的市场开发定制产品^[2]。这种工业生产模式整合了大规模生产和定制化生产二者的优势, 既能创造出因人而异的产品, 以匹配用户的个性化需求, 又能解决产品种类繁多而导致的生产效率低下问题, 还能控制成本并避免重复性劳动。目前大规模定制已经在数码 (Dell), 服装 (Nike) 等领域得到了充分应用, 它正在成为工业化生产提升可持续性的一种标准, 也为下一代工业化生产模式描述了目标^[3]。对建筑师而言, 如果说标准化生产和装配线预制是 20 世纪初的普遍理想, 那么利用大规模定制提升工作效能或将成为 21 世纪的理想目标。

3. 定制化住宅

在前工业化时期, 定制化住宅即已出现。以家庭包工制组织生产的工匠, 受到雇佣后为用户量身定制住宅。因当时生产力水平低下, 住宅的定制任务多为单一或少量, 建设周期较长; 建设工艺趋于精细化, 但效率低且成本高; 工匠与用户的距离近, 甚至有时是一体的; 目标用户局限于一部分特权阶层上, 且用户需求层次相对不高。到了工业化时期, 定制化住宅虽然未能在产品的质量、效率与

成本上得到明显改善, 但是因为能与建筑师、供应商直接“对话”^[4], 这类住宅产品获得了较高的用户满意度, 用户也更愿意为定制化设计服务支付额外的费用。此外, 住宅供给市场的激烈竞争时刻驱动着定制化住宅朝向大规模定制住宅转型发展^[5]。

4. 大规模定制住宅

如果说大规模住宅是一种由同质化建筑市场生产的必需品, 那么大规模定制住宅则是为彰显社会文化异质性而生产的经济适用型产品: 不仅在建设成本上应接近或等于大规模生产, 而且在设计上还应具备一定的灵活性与可变性。从历史经验看, 当前工业化住宅已经衍生出一条相对成熟的产业链, 而且产业规模越大, 由标准化生产所形成的既有优势就越明显, 这为大规模定制住宅的“降本”设计提供了可靠的技术支撑。在设计上实现灵活性与可变性, 既需要对标准化模块与特殊性模块进行集成设计, 也需要在住宅设计系统上集成由生产、供应等环节所衍生的标准化服务。由此可见, 推行大规模定制住宅, 一方面能充分发挥标准化生产的优势, 另一方面也不会限制住宅设计的创新性要求。此外, 为了匹配用户的异质需求, 设计系统还需要进一步集成用户的居住偏好、居住满意度、个人理想和环境感知等信息, 因此大规模定制住宅的设计过程也是用户参与设计与交互的过程。

二、大规模工业化住宅的发展概况

制造业所引领的工业生产方式变革对建筑业的发展产生了深远的影响, 出现了“如何用制造业的方法改造建筑业”的愿景。以 2010 年约兰·科伦 (Yoram Koren) 所剖析的全球制造业发展轨迹为线索, 梳理了大规模工业化住宅的产业发展趋势。从图 1 可知, 后者大致比前者落后了 5~10 年。

1. 标准化设计的住宅：1913—1960年代

这一时期属于“大型化、批量化”的建筑工业化时代，一些学者认为此时的大规模住宅在设计与生产上属于简单性、同质化的工作，容易诱导竞争者刻意模仿，对创新性产生消极影响；用户、建筑师与供应商的距离越来越远，用户需求常常不为产业链后端的传统型供应商所熟知，导致住宅产品因缺乏多样性、过度单调、空置率高和经常性地推倒重建而广受批评。同一时期，也出现了很多著名的工业化住宅设计案例，它们不断地回应着福特所提出“标准化生产并不等同于同质化的千篇一律”的论断。1914年柯布西耶提出的多米诺住宅框架体系（图2-1）和1924年吉瑞特·里特维德（Gerrit Rietveld）设计的施罗德住宅（图2-2）是较早的两个可

变性案例，开启了大规模定制住宅的早期实践。此外，柯布西耶在法国佩萨克项目（1925—1929年）中设计了由4种类型组成的200套住宅，不仅每一类型的室内空间有所区别，而且每一种户型平面因其内墙能够平移可再次细分（图2-3）^[6]；1941年格罗皮乌斯与康拉德·瓦克斯曼（Konrad Wachsmann）创办通用面板公司（General Panel Corporation），开发了基于预制建造技术的组装式住宅（Packaged House）系统（图2-4）^[7]；弗兰克·劳埃德·赖特（Frank Lloyd Wright）在美国传统郊区住宅项目（1946—1954年）中设计了47栋住宅，表达了“住宅随用户不同而不同”的设计思想（图2-5）^[8]。以上案例的共同点是在“蓝图式”设计流程中，建筑师均有能力为用户的未来需求预留出有限的自定义空间，但很难平衡需求与质量、效率、成本之间的关系。随着第三次工业革命的

来临和自动化生产技术的普及，建筑市场上的工业化住宅供给量不仅达到了量产高峰，而且产品类型越来越丰富，用户逐渐开始有了一定的选择空间。

2. 参与式设计的住宅：1960—1990年代

1960年初，一种参与式设计（Participatory Design）的住宅实践在全球兴起。约翰·哈布瑞肯（John Habraken）认为这种探索能够有效回应大规模工业化住宅的单调性和同质化等问题^[9]。他根据环境层级所呈现出交错连续的包含关系（空间）和依附关系（实体），提出了由支撑体（上一层级）和填充体（下一层级）组成的开放建筑（Open Building）概念（图3-1）：前者具有管束能力，相对而言不易变动；后者虽受前者管束，但仍具有一定的弹性应变能力以应对使用需求的变化，这为工业化住宅的设计灵活性提供了理论基础。1969年，克里斯多夫·亚历山大（Christopher Alexander）将建筑模式语言的理论研究融入住宅设计流程，用步骤式描述（Step-by-step Description）建筑空间的组织过程（图3-2）^[10]。受到以上理论的启发，乔治·斯蒂尼（George Stiny）和威廉·米切尔（William J. Mitchell）在1978年将帕拉第奥别墅（Palladian Villa）的平面图进行抽象化表达，梳理出一套能体现其建筑风格特征的语法规则，并将其转译为可用计算机程序自动化生成的设计方法（图3-3）^[11]；之后罗斯（Cross）、马维尔（Maver）^[12]与弗罗纳（Wrona）^[13]也分别提出了参与式设计的具体方法。巴克里希纳·多西（Balkrishna Doshi）则进

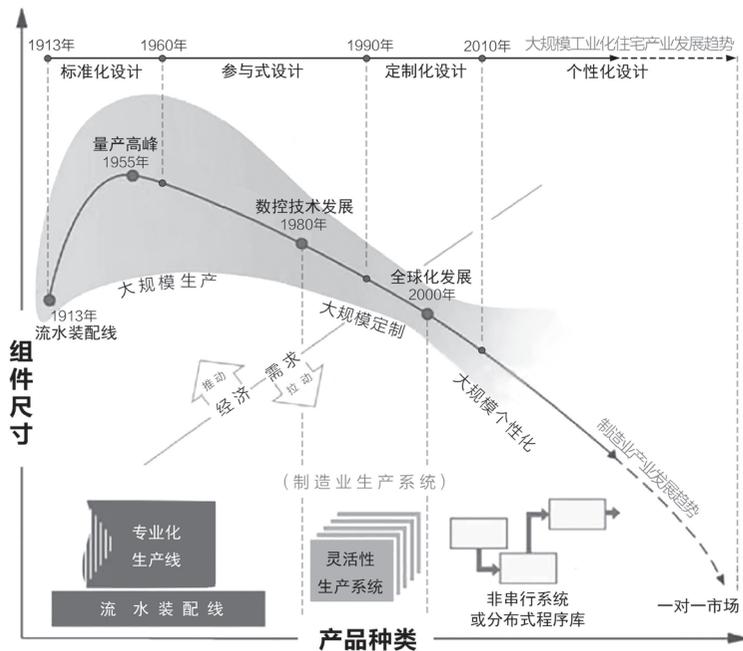


图1：制造业与大规模工业化住宅的产业发展趋势对比

1. 柯布西耶(1914年)：
多米诺住宅框架体系

2. 里特维德(1924年)：
施罗德住宅

3. 柯布西耶(1925—1929年)：
法国佩萨克住宅

4. 格罗皮乌斯和瓦克斯曼(1941年)：
通用面板体系与组装式住宅

5. 赖特(1946—1954年)：
美国传统郊区住宅

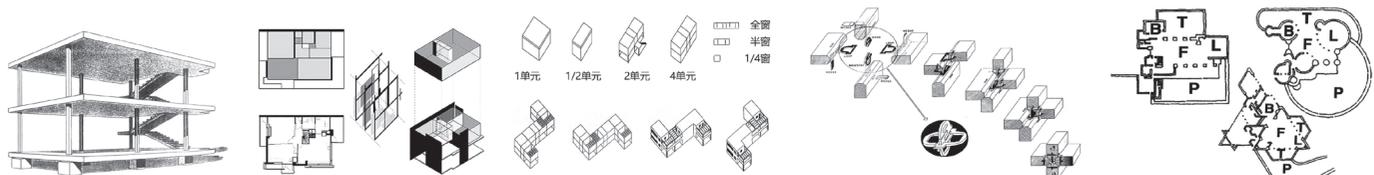


图2：大规模工业化住宅的标准化设计案例

一步将开放建筑理论与参与式设计方法结合,在印度阿兰若项目(1981—1986年)中,为80套示范住宅定义了三种核心住宅(Core Housing)类型与一套可引导用户自助参与建造的详尽规则表(图3-4)^[14];此外,查尔斯·柯里亚(Charles Correa)在贝拉布尔项目(1983—1986年)中进一步提出了邻里单元的“梯级构成”概念,在基本单元中预留出弹性空间,用于用户根据家庭需求开展自助建设(图3-5)^[15]。1970年代,受到丰田公司开发的TPS生产系统(1990年代被广泛称为精益生产)影响,日本的工业化住宅开始朝向产业化发展,由此开启了在工厂里快速生产质优价廉住宅的时代^[16]。“部件预制工厂化、现场装配机械化”不仅成了大规模工业化住宅的关键生产技术,也催生出“建筑工业化”的理论雏形。然而,这一时期的工业化住宅仍未能能在设计上实现民主性、多样化和个性化,在建造上也缺乏灵活性和可变性,而且由戴维斯所定名的大规模定制理念仍处于萌芽期,并未发挥出市场作用。

3. 定制化设计的住宅: 1990—2010年代

随着大规模定制的概念逐渐明晰和数字设计、计算工具、数控建造设备的相继

出现与普及,大规模定制具备了在工业化住宅产业中实施的条件,特别是很多研究指向住宅设计系统的研发与优化。20世纪90年代末,格雷格·林恩(Greg Lynn)在胚胎住宅(Embryological House)项目中将基本功能、文化需求与个性需求兼顾考虑,通过数控建造进行非标准化的快速生产,开启了大规模定制住宅的数字设计实践(图4-1)。2001年,何塞·杜阿尔特(Jose Duarte)为阿尔瓦罗·西扎(Alvaro Siza)设计的葡萄牙马拉盖拉(Malagueira)住宅项目(1977年至今)进行数字化“复盘”,提出了基于形状语法(Shape Grammar)的住宅定制设计系统(图4-2)^[17];2003年,麦克里什(McLeish)提出了以用户为中心的住宅设计模式(图4-3)^[18];2004年,黄(Huang)和克拉夫奇克(Krawczyk)建立了一套基于互联网的预制住宅设计配置系统(图4-4)^[19];2009年,本罗斯(Benros)和杜阿尔特在西班牙建筑师Gausa提出ABC住宅设计概念的基础上,建立了一套大规模定制住宅集成系统,其中,设计系统用于方案规则的编码,建造系统用于建筑结构、构件预制等施工信息的集成(图4-5)^[20]。通过以上研究可知,开展定制化设计的前提是制定出规则,并仿照西尔斯·罗巴克式的预制组件目录(Sears Roebuck & Co. Catalogue)建立一套规则与组件对应的语料库,进而生成数字

设计模型,便于用户从中进行选择。然而,这一时期仅有少数的在线配置平台支持用户对平面图和立面图进行些许修改。此外,一部分相关的市场研究指明住宅定制化设计将增强非专业用户体验的愉悦感和价值感,因此具有很好的应用潜力。

4. 个性化设计的住宅: 2010年至今

21世纪初,美国乔治·华盛顿大学预测了“改变未来的十大科技”,其中“个性化定制”位列首位,预测的主要依据是在制造业全球化发展的趋势下,产业模式将由“一对多的批量供应,统一服务”向“一对一的定制生产,个性服务”转型,由此推动个性化定制的迅速发展。2011年,英国建筑师阿拉斯泰尔·帕文(Alastair Parvin)和尼克·伊罗迪亚努(Nick Ierodiaconou)共同研发的WikiHouse平台项目,标志着大规模工业化住宅产业进入了一个全新的个性化定制时代。该平台由基于算法和参数的智能信息系统控制,可提供具有开源特征的多种解决方案及其无穷尽的配置结果,因此能部分或全部取代人工化设计服务。以文森特·穆勒(Vincent Muller)主持的荷兰阿尔梅勒的布腾区(Buiten) WikiHouse社区项目为例,任何非专业用户均能在平台上通过简单操作参与住宅设计,获得“我是建筑师”“我

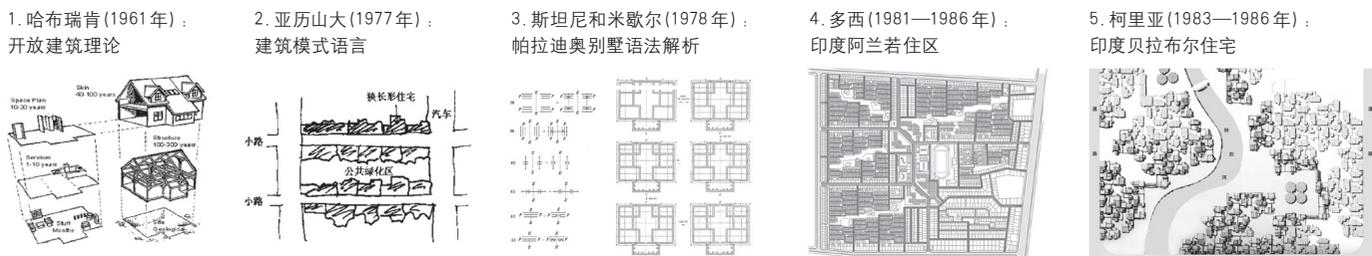


图3: 大规模工业化住宅的参与式设计案例



图4: 大规模工业化住宅的定制化设计案例

设计、我建造”的体验^[21]，目前该项目的28套住宅已进入筹备建设阶段（图5-1）。2016年，哈利利阿吉（Khaliil-Araghi）和柯洛维奇（Kolarevic）提出了一种基于几何尺寸约束的参数化设计系统和一种基于在线交互的用户配置系统，前者提升了规则定义的灵活性，后者确保了产品设计的用户满意度（图5-2）^[22]。同年，克维琴斯基（Kwiecinski）在“我是住宅设计师（My House Designer）”项目中，同时利用形状语法和遗传算法两种生成设计方法，建立了一套以轻木框架为主要结构的住宅定制设计与生产系统（图5-3）^[23]。2019年，比安科尼（Bianconi）等建立了一种以交叉层压木材（Cross-Laminated Timber，简称CLT）为主要材料的大规模定制住宅Algoritmo+设计系统，通过性能模拟并使用遗传算法，实现了数字模型的优化设计；该系统既能协助建筑师进行设计决策，也能为非专业用户的交互设计提供可视化界面（图5-4）^[24]。同年，在宜家Space10实验室与EFFEKT事务所合作开发的城市乡村（Urban Village）项目中，威廉姆斯（Williams）利用低成本、高效率的预制CLT模块系统，为不同背景的用户提供了更加灵活便捷的个性化定制设计服务（图5-5）。与住宅个性化设计研究并行的是，各国住宅供应商也陆续推出不同类型的产品在线配置系统（图5-6~图5-10）。通过比较研究者与供应商所开发的设计系统，可发现：

前者更为复杂，能为用户提供更多的解决方案，但研发成本高、研发周期长；而后者则相对简单，提供的解决方案虽然有限，但是能以较低成本快速响应市场需求。

三、大规模定制住宅设计面临的挑战与对策

为了填补研究与实践之间的差距，大规模定制住宅设计主要面临以下挑战：如何从建筑师的角度制定设计规则，以提升定制设计的灵活性，包括转译用户需求、设定规则层级和把控定制程度等；如何从用户的角度构建交互模式，以简化定制设计的复杂性，包括引导用户参与、避免信息过载和验证用户体验等。

1. 设计规则的制定

1.1 转译用户需求

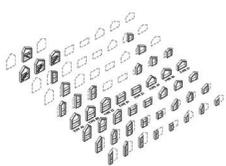
将用户需求信息与住宅设计规则进行对应转化是构建大规模定制住宅设计系统的首要难题，即确定用户需求并为用户定义理想住宅的所有形态特征。用户需求的转译过程包括获取、分析、定义、编码和测试，其中用户需求并不容易精确获取，这是一个费时、费力的反复过程，取决于用户与建筑师的沟通效率^[25]。2005年，杜阿尔特面向建筑师定义了一套“话语”语法（Discursive Grammar），利用其中的

编程语法（Programming Grammar）回应了需求与形式的对应关系^[26]。然而，这种方法是形态规则作为设计起始点，具有明显的专家系统特征，是否能够兼容非专业用户的异质需求仍有待商榷。因此，应当借鉴制造业的发展经验，探索将用户需求作为设计起始点的方法，主要环节包括：①采集并处理非专业用户的需求数据，将用户描述的零散化信息转化为规范化的设计要素；②将设计要素转译为参数化图形或模型，并为之建立相互对应的规则联系；③发现并纠正一些不可用的需求信息^[27]。在需求工程领域，以上环节所采用的方法分别对应着结构化需求的抽取方法、系统化的需求建模方法以及形式化的需求验证方法。其中，结构化需求的抽取是基于模糊定制概念^[28]，即利用由模糊几何定制程序（FGC）、虚拟现实建模语言（VRML）和通用网关接口（CGI）程序组成CyberFGC系统，将用户的语言信息转译成互联网可识别的偏好信息。

1.2 设定规则层级

为了使定制设计具有灵活性和可变性，建筑师预先定义了层层递进的设计规则，包括选择邻里位置和改变建筑形式、平面布局、内装修等，这些规则决定了用户参与的有效性。霍夫曼（Hofman）等从内装修、体量（外饰面）、平面布局、技术系统和环境5个层级归纳了住宅设计的35种属性（图6）^[29]。米希拉（Mishra）

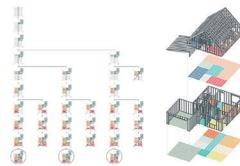
1. 穆勒（2018年）：
荷兰WikiHouse社区



2. 哈利利阿吉（2016年）：
基于尺寸的住宅定制系统



3. 克维琴斯基（2016年）：
“我是住宅设计师”项目



4. 比安科尼（2019年）：
意大利Algoritmo+系统



5. 威廉姆斯等（2019年）：
宜家城市乡村项目



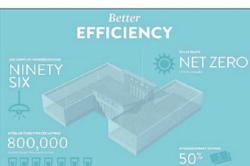
6. 荷兰：Hermit Houses



7. 英国：Living Homes



8. 美国：Bluhomes



9. 美国：Resolution 4 Architecture



10. 美国：TollBrothers



图5：大规模工业化住宅的个性化设计案例

等提出了变化（内装修和建筑设备）、排列（建筑立面）、配置（根据平面图变化改变建筑形体）3级设计规则：其中，变化规则和排列规则均可结合模块化技术用于制定定制设计的解决方案^[30]。纳门（Nahmen）和班德罗（Bindroo）根据美国住宅供应商的评估报告，提出了不定制、较小平面修改、较大平面修改和整体定制4级设计规则^[31]。安德森（Anderson）则提出了可调整的定制空间，模块化的定制空间和多维度的定制空间3级设计规则^[32]。梳理设计规则的方法一般采用形状语法，利用其树形结构构建多层次规则语料库，便于设计系统高效、准确地响应用户需求。由于设计规则的数量级庞大，难以通过手动的方式建立数据库，因此还需要匹配自动化计算的设计方法。

1.3 把控定制程度

设计灵活性与用户参与度密切相关。兰普（Lampel）和明兹伯格（Mintzberg）按照定制程度（从低到高）提出了5种大规模定制类型（图7）^[33]：①完全标准化（Pure Standardization）是指采用大规模生产策略生产标准化产品，不需要用户参与，灵活性仅体现于对产品本身的选择权；②分段标准化（Segmented Standardization）面向多样化生产，为细分市场提供不同类型的系列化房间模块，用户从供应环节和组装环节介入，产品成本较低，例如丰田之家（Toyota Home）；③定制标准化（Customized Standardization）是指工厂生产独立房间时，用户从装配环节介入，选择标准化的零件、组件和部件进行定制装配，例如积水海姆（Sekisui Heim）；④特定制定制化（Tailored Customization）的方案设计与零件设计由供应商负责，用户从组件设计介入，设计灵活性较高，成本也较高，例如积水住宅（Sekisui House）（图8）；⑤完全定制化（Pure Customization）则是从设计环节开始提供“一对一”的顾问式服务，而非面向所有用户，这种类型的产品层次高端、成本最高，对设计系统的集成要求也高。基于以上剖析可知，用户越早参与设计，定制程度就会越高。此外，定制设计的尺度也

能体现定制程度。辛普森（Simpson）提出基于模块化的产品系列（Modular-based Product Family）和基于尺寸的产品系列（Scale-based Product Family），前者通过添加、替换、删除一个或多个功能模块执行，后者通过适应性调整一个或多个尺寸变量以响应市场需求^[34]。乌尔里克（Ulric）提

出6种模块化产品体系，分别为组件共享（Component-sharing）、按需裁剪（Cut-to-fit）、组件交换（Component Swapping）、总线（Bus）、分段（Sectional）和混合模块化（Mix Modularity）；其中，前两种的定制程度较高，且按需裁剪等同于完全定制化或基于尺寸的定制，属于目前定制程度最高的个性化

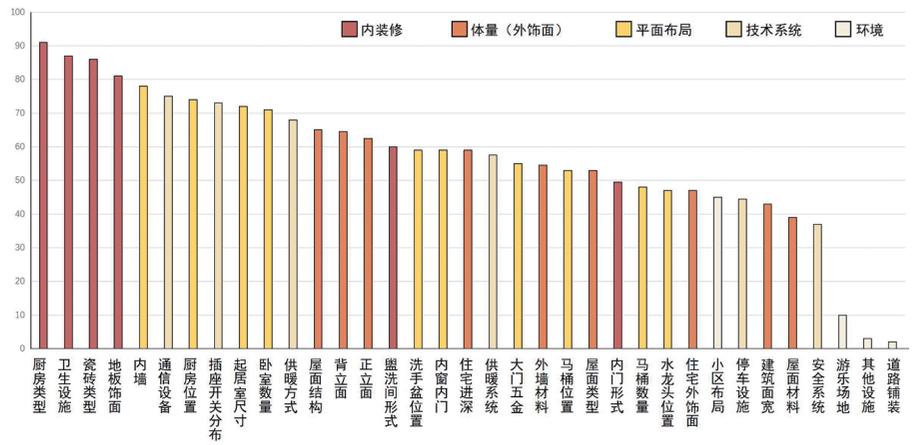


图6：霍夫曼等归纳的35种住宅属性

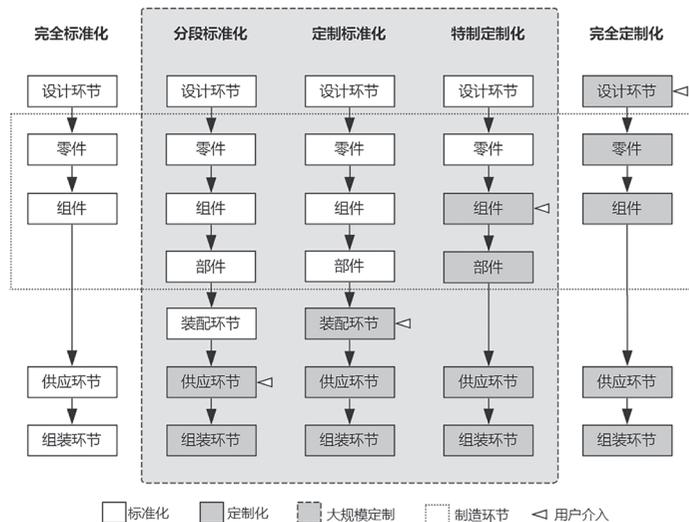


图7：按照定制程度划分的大规模定制类型

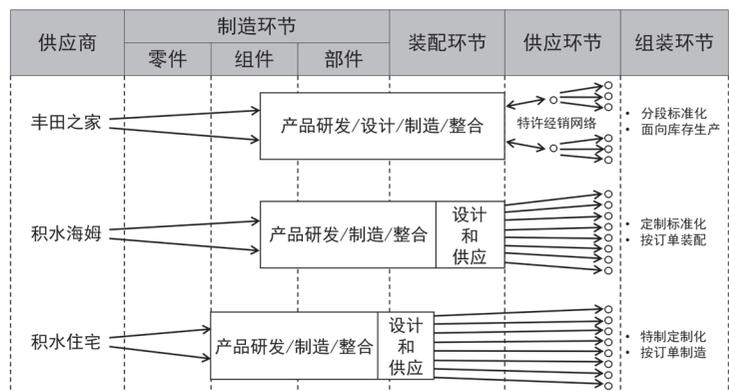


图8：丰田之家、积水海姆和积水住宅的产业模型

定制，对设计系统的复杂性和运算量要求更高；它主要用于用户从设计环节参与的情形，在尺寸限度内操控住宅形体的变化，因此设计灵活性高，利于用户独立开展研究和探索解决方案；而建筑师仅需定义相关参数，可节省大量重复性设计工作^[35]。

2. 交互模式的构建

2.1 引导用户参与

用户参与式设计存在着同位 (Colocated) 和错位 (Dislocated) 之分^[36]。前者是指用户面向建筑师阐明需求和要求，并在设计过程中不断地与建筑师进行面对面“对话”，直到获得满意方案为止；从理论上讲，建筑师需要肩负技术研发与设计应用的双重任务，但实际上他们的工作大多局限于集成应用层面，很少会涉及技术研发 (图 9-1)。后者是指在互联网上利用交互式计算机系统为用户提供有限的选择，引导他们做出决策；这种系统大多由供应商开发，对非专业用户而言，其操作友好度并不高，因用户知识和技能的不充分，经常出现由决策偏差所引起的无效设计；而且建筑师也未从中参与设计，所以住宅设计质量不一定能得到保证。当协同设计的概念提出后，用户参与式设计的过程才开始变得更加灵活^[37]：首先，将用户视为产品的主要设计者和改变者，使其自主行为与设计原型进行交互并将偏好信息反馈至系统，提高用户产出的价值占比，还

能自定义和修改大部分单一步骤的设计过程；其次，将研究者从建筑师的角色中剥离出来，使其成为设计过程的主要组织者和设计规则的制定者，也承担着挖掘用户意识和需求的工作；再次，建筑师参与设计的占比越来越低，更多地扮演着协调者、配合者和观察者的角色，并从感性层面获得用户需求等第一手资料 (图 9-2)。这种协同设计的方法在一定程度上将取代传统建筑师的部分工作，既能增强设计决策的效力，也能加快开发出更符合用户需求的住宅产品。

2.2 避免信息过载

为了最大限度地提高定制设计的灵活性，增加解空间 (Solution Space) 的元素数量是提升用户获得满意方案机率的有效途径之一。但这种方式有时也会适得其反，因为用户很难从大量的解决方案中快速作出选择，而且定制设计过程在需求或要求密集发生时也会涉及大量信息，需要用户不断认知并做出判断。因此，信息过载增加了定制设计的复杂性，最终会影响定制设计的质量。为此，一些研究者开发出成系列的包含特定设计语言的需求分析工具，将专业知识转化为用户不必接触的“设计黑箱”，为用户参与设计降低了门槛。希佩尔 (Hippel) 对需求分析工具提出了基本要求：①支持反复实验，提高试错的效率；②在生产约束下尽可能地增加解空间中的元素数量，提升设计灵活性；③系统性构建规则语料库和相应的调用规则；

④将用户偏好转化为设计信息进而传输至生产系统，尽量避免进一步修订^[38]。

2.3 验证用户体验

为了从住宅供给市场上获得竞争优势，大规模定制设计需要在住宅质量和设计体验上尽可能地提高用户满意度 (Customer Satisfaction)。影响用户满意度的基本因素包括住宅产品的成本、质量和和服务^[39]。在成本上，用户更倾向于选择用低成本创造出足够多种类的产品，倘若某些选项对成本影响很大，他们通常会选择低级别的定制方式，因此可将不需要定制的产品组件采用标准化生产以发挥规模经济的优势。在质量上，基于用户需求与产品属性特征的关系，不仅要为用户提供更多有效的解决方案，进一步提高模块化设计的配置能力，还要增强模块、组件与产品属性及用户需求的关联度，为三者建立结构层级关系，精确定位有变形设计需求的组件尺寸范围，从而有效提升定制效率。在服务上，高水平的定制化服务也会对用户满意度产生积极的影响，虽然当前协同设计对于非专业用户而言仍具有一定的挑战，但是可以通过适时地为用户提供咨询服务，帮助他们填补专业知识的空白；此外，向用户提供指导意见、协助沟通和现场指导等服务，促使用户高效地完成个性化定制。

四、大规模定制住宅设计案例解读

1. 基于形状语法的规则设计

2018年，美国卡内基梅隆大学佩德罗·维罗索 (Pedro Veloso) 等建立了一个大规模定制住宅设计系统，尝试通过规则定义和形状编码两个步骤制定设计规则^[40]。他们采用了形状语法的树形结构逻辑和图形结构逻辑，将每条规则与构成住宅平面的一种形状对应，并用形状—动作图 (Shape-Action Graph) 表示形状规则推演过程中各结点图形与其构成元素之间的索引和映射关系。

在该设计系统中，首先，将初始住宅

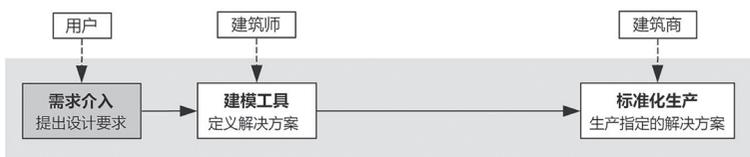


图9-1: 传统的同位参与式设计流程

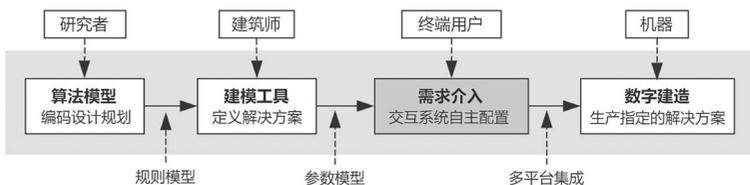


图9-2: 大规模定制的协同设计流程

平面划分为私密空间, 公共空间和设备空间三个区域, 以此作为规则推演的根结点。其次, 制定出形状生成设计的两种规则: 分割规则 (Division Rule) 用于将单个父结点图形 (Parent Shape) 划分为多个下一代子结点图形 (Child Shape), 组合规则 (Union Rule) 用于将一组指定的父结点图形拼合成单个下一代子结点图形, 两种规则交替运行, 以丰富规则语料库 (图 10)。再次, 将住宅平面信息输入 CAD 系统 (Rhinceros 平台), 上述定义的几何图形及其拓扑关系也随之导入并呈现于交互界面上, 该步骤可通过以下操作实现: ①管理导入的几何图形: 识别结点图形的各项信息, 检验并修正多段线的方向和控制点, 统一以结点图形的左上角点作为参考点; ②创建基准有向图: 将形状—动作图中各结点图形之间呈现出的层级映射关系, 在 Grasshopper 中转译为具有树形数据特征的有向图; ③建立索引映射关系: 主要针对构成结点图形的房间、门、窗等基本元素; ④编码形状—动作图: 利用 Grasshopper Python 工具将步骤②和③的结果按照面向对象 (Object-oriented) 的方式编码, 通过广度优先搜索 (BFS) 遍历每一个结点图形的所有组成元素, 生成该结点图形的所有变体; ⑤关联几何对象和拓扑关系: 将所有图形的坐标原点进行转换, 使所有结点图形均处于同一个全局坐标系内, 各结点图形与其构成元素共同形成完整的索引和映射关系。

此外, 研究者还利用穷举算法 (图 11), 生成各户型 (90m²、140m²、160m²、180m²、230m² 和 250m²) 平面的所有变体, 利用深度优先搜索 (DFS) 从根结点图形 (初始平面) 开始访问, 运行所有可用的分割规则和组合规则, 遍历举出该根结点图形下所有符合条件的结点图形 (变体), 从而生成 6 套针对不同户型平面布局的形状—动作图。

2. 基于用户体验的交互设计

2018 年, 波兰华沙工业大学的克

维琴斯基 (Kwiecinski) 和 马库西维奇 (Markusiewicz) 开发了一个名为“住宅规划器” (Home Planner) 的定制设计工具^[41], 其目标是促进用户参与住宅设计并简化设计流程。该工具主要由算法设计和交互界面两部分组成。在算法设计上, 为了使制定的规则独立于当地规范之外, 这里应用了基于形状语法的通用语法来定义元设计 (Meta-design) 逻辑, 使之可生成与用户需求相对应的通用设计规则。在交互界面上, 采用交互式桌面 (主要交互界面) 和平板电脑 APP (辅助扩展界面) 相结合的方式。其中, 交互式桌面上呈现的 9 种实体木块, 分别代表前厅、卫生间、厨房、餐厅、起居室、家庭办公室、主卧室、次卧室和浴室, 用以标记房间类型 (图 12)。

具体的交互操作步骤包括: ①用户将基本信息输入平板电脑, 此时系统会自动识别并生成一系列可视化的方案以供选择; ②用户通过交互式桌面参与设计, 既可在系统推荐方案的基础上直接修改, 也可选择重新设计; ③每当用户移动或旋转木块时, 交互界面上会同步显示房间的布局和面积等信息; ④系统对用户操作自动进行可行性验证, 每当用户选择或修改的平面布局不符合其预定义的设计规则时, 系统会重新检索出一个既符合设计规则又与其需求最相近的配置方案; ⑤若用户对设计方案仍不满意, 可继续操控木块对方案进行调整, 直到满意为止。为了验证该工具在实际应用中的可行性, 研究者分别在美国和波兰招募志愿者参与设计并作出满意

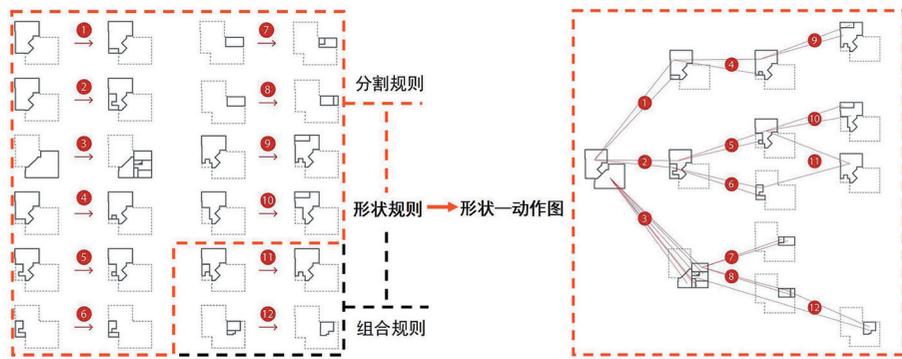


图 10: 由分割规则和组合规则组成的形状—动作图

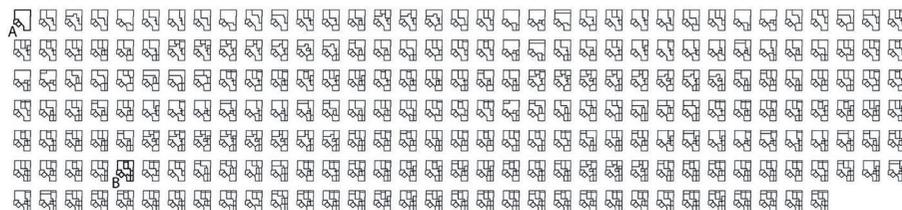
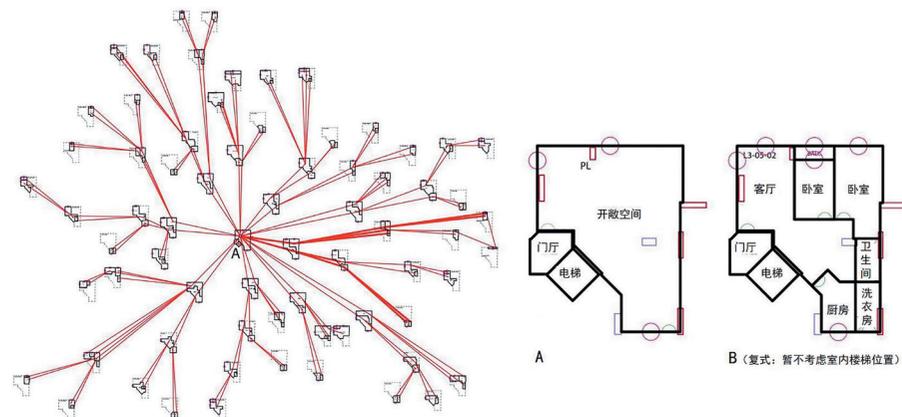


图 11: 由 140m² 户型形状—动作图所生成的 242 种平面布局结果

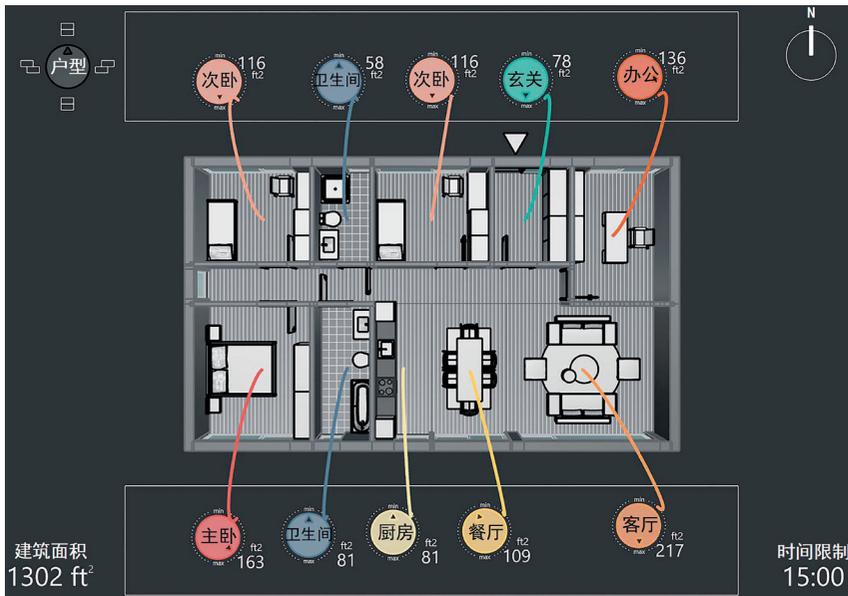


图12：“住宅规划器”设计系统的用户交互界面



图13：由志愿者完成的住宅配置方案

度评价 (图 13) [42]。结果表明，所有志愿者均能在 15min 内获得满意方案，且对于大多数指标的满意度分值为 4 或 5 (图 14)，并一致认为这种计算机辅助设计系统可以帮助用户检索和设计满足其未来需求的住宅方案。

五、结论

自建筑业面向工业化、产业化发展以来，通过对整体建筑或复杂部件进行标准

化设计、工厂化预制、装配化施工与科学化组织，大幅度提高了生产效率。可是，与制造业相比，建筑业仍被认为是低生产力行业之一，而且与制造业的差距在不断加大。通过欧美等国家的研究与实践可知，住宅产业发展可以借鉴制造业的大规模定制生产经验，并具有一定的市场需求和行业发展潜力，但仍将面临不少挑战：首先，住宅的设计、制造、施工和供应等环节几乎没有重叠，产业集成度不高；其次，建筑业的任务通常需要众多不同的企业和部

门协作才能完成，这种分散的组织模式容易导致产业运行机制的低效化；再次，传统的“蓝图式”设计方法和建造技术相对落后，尚不能满足兼顾大规模定制住宅的标准化与个性化要求。当住宅产业化发展遭遇瓶颈时，这项研究不仅有助于把握未来建筑生产模式、供给机制的变革方向，而且也是探索解决各种城乡环境和社会问题的积极途径。住宅产业化发展终究是以技术的进步和产业的整合为前提的，但是有一个事实不能被忽视，即位列住宅产业链条最前端的并不是建筑商或供应商，而是研究者或具有前瞻研究能力的建筑师，他们对大规模定制住宅的探索将更有指导意义。

大规模定制住宅设计研究属于新兴的交叉领域，是工业 4.0 时代因产业、技术结合而生的新事物，其研究进展对我国当前城乡住宅产业化发展，特别是解决关乎国计民生的城乡居住问题将具有一定的启发和借鉴意义。首先，面向建筑师制定出住宅形态特征与用户需求信息对应的设计规则，以保证住宅设计的灵活性；面向非专业用户构建出由研究者、建筑师、用户和机器共同组成的交互模式，以保证定制设计的友好性，为我国工业化住宅设计理论做出有益补充。其次，探索大规模工业

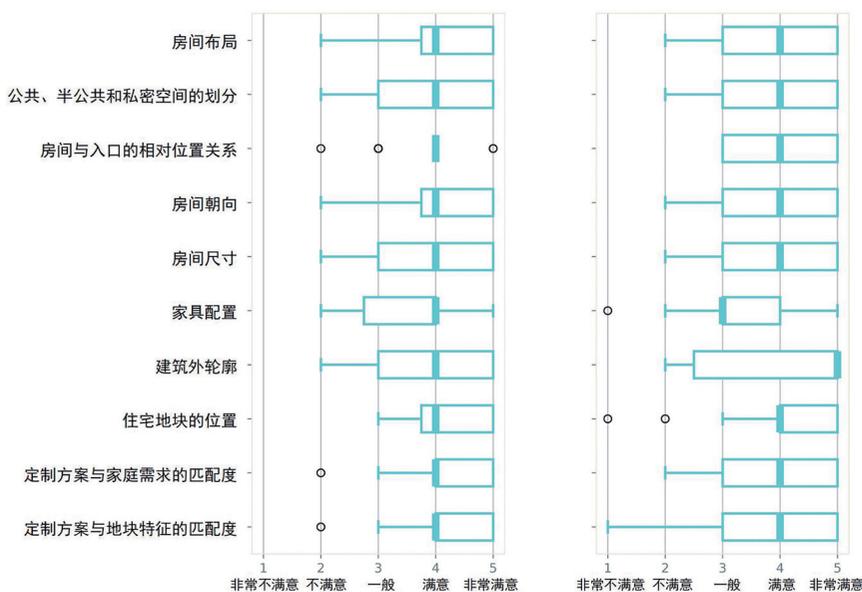


图14：美国(左)与波兰(右)志愿者对住宅配置方案的满意度评价结果

化住宅与数字设计及智慧建造的互动机制, 为未来住宅产业化体系的优化和创新住宅产业生态系统提供借鉴。再次, 由大规模定制住宅设计衍生出的新型住宅供应模式, 可为我国未来转变住宅供给机制进行前期研究准备。最后, 推动住宅产业由增量向存量发展, 由标准化建设存量向定制化建设存量转型, 力促新旧动能转化所要求的新技术、新产业、新业态和新模式的路径探索。

此外, 还需要特别指出的是, 现阶段大规模定制住宅的系统研发与产品推广, 仍要面临市场适应等问题, 特别是因其高度的集成性和复杂性, 需要高昂的初始成本投入, 风险系数偏大。从知识产权的范畴上, 大规模定制住宅产品与传统住宅产品也是不同的, 其知识产权究竟归属于用户、研究者、建筑师、建造商中的一个主体还是多个主体, 仍有待商榷。该问题同时反映出当前大规模定制住宅产品的不成熟一面, 即一旦定制过程中出现了因用户需求频繁变动等问题所导致的情况, 例如住宅方案的设计失效、模块或组件等部件的生产失效, 或是最终交付的产品在使用过程中出现的质量等问题, 哪一个主体该为此担责? 从以上列举的问题中可以看出, 大规模定制住宅设计产业化的实现, 不仅要依托于科技的进步, 凸显其设计的灵活性、建造的高效性与供应的集成性等优势, 还要健全产业管理机制和相关技术规范, 着力理顺各主体之间的关系, 化解认识分歧, 促使各方达成共识。

注释

- [1] Corbusier L. Toward an Architecture[M]. Los Angeles: Getty Research Institute, 2007.
- [2] Anderson D. M., Pine J.B. II. Agile Product Development for Mass Customization: How to Develop and Deliver Products for Mass Customization, Niche Markets, JIT, Build-to-order, and Flexible Manufacturing [M]. Chicago: Irwin Professional Publishing, 1996.
- [3] Matt D. T., Rauch E., Dallasega P. Trends towards Distributed Manufacturing Systems and Modern

Forms for their Design[J]. Procedia Cirp, 2015, 33: 185-190.

- [4] Noguchi M., Friedman A. A Mass Custom Design Model for the Delivery of Quality Homes: Learning from Japan's Prefabricated Housing Industry[A]. CIB W060-096 Joint Conference[C]. Hongkong, 2002: 229-244.
- [5] Daud N., Hamzah H., Adnan Y. M., Sengupta U. Examining the Potential for Mass Customization of Housing in Malaysia[J]. Open House International, 2012, 37 (1) : 16-27.
- [6] Boudon P. Lived-in Architecture, Le Corbusier's Pessac Revisited[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1979.
- [7] Wachsmann K. House in Industry[J]. Arts & Architecture, 1947, 11: 28-38.
- [8] Sergeant J. Frank Lloyd Wright's Usonian Houses: the Case for Organic Architecture[M]. New York: Whitney Library of Design, 1976.
- [9] Habraken J. De dragers en de Mensen, het einde van de massawoningbouw[M]. Amsterdam: Scheltema & Holkema NV, 1961.
- [10] Alexander C. A Pattern Language[M]. Oxford: Oxford University Press, 1977.
- [11] Stiny G., Mitchell W. J. The Palladian Grammar[J]. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 1978, 5 (1) : 5-18.
- [12] Cross N., Maver T. W. Computer Aids for Design Participation[J]. Architectural Design, 1973, 43 (5) : 274.
- [13] Wrona S. Participation in Architectural Design and Urban Planning[M]. Warsaw: Politechniki Warszawskiej, 1981.
- [14] 王江, 郭道夷, 赵继龙. 双重组织驱动的住区开放设计模式研究——以印度阿兰若住区为例[J]. 城市发展研究, 2018, 25 (9) : 117-132.
- [15] 刘华. 印度贝拉布尔低收入者住宅的设计解析[J]. 建筑师, 2007 (01) : 19-23.
- [16] 刘名瑞. 我国集成住宅技术发展前景初探[J]. 建筑学报, 2004 (04) : 73-75.
- [17] Duarte J. P. Customizing Mass Housing: A Discursive Grammar for Siza's Malagueira Houses[D]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [18] McLeish T. J. A Platform for Consumer Driven Participative Design of Open (source) Buildings[D]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [19] Huang J., Krawczyk R. i_Prefab Home Customizing Prefabricated Houses by Internet-Aided Design[A]. In: Communicating Space (s) . 24th eCAADe Conference Proceedings[C]. Volos, Greece, 2006: 690-698.
- [20] Benros D., Duarte J.P. An Integrated System for Providing Mass Customized Housing[J]. Automation in Construction, 2009, 18 (3) : 310-320.
- [21] Franke N., Schreier M., Kaiser U. The "I Designed it Myself" Effect in Mass Customization[J]. Management Science, 2010, 56 (1) : 125-140.

[22] Khalili-Araghi S, Kolarevic B. Captivity or flexibility: complexities in a dimensional customization system[A]. In: Herneoja, Aulikki; Toni Österlund and Piia Markkanen. Proceedings of the 34th eCAADe Conference[C]. Oulu: University of Oulu, 2016: 529-536.

- [23] Wood Mass-Customized Housing - A dual computer implementation design strategy[A]. In: Herneoja, Aulikki; Toni Österlund and Piia Markkanen. Proceedings of the 34th eCAADe Conference[C]. Oulu: University of Oulu, 2016: 529-536.
- [24] Bianconi F., Filippucci M., Buffi A. Automated Design and Modeling for Mass-Customized Housing. A Web-Based Design Space Catalog for Timber Structures[J]. Automation in Construction, 2019, 103 (07) : 13-25.
- [25] Thomke S.E., Hippel E.V. Customers as Innovators: a New Way to Create Value[J]. Harvard Business Review, 2002, 80 (4) : 74-81.
- [26] Duarte J. P. A Discursive Grammar for Customizing Mass Housing: The Case of Siza's Houses at Malagueira[J]. Automation in Construction, 2005, 14 (2) : 265-275.
- [27] Xu R., et al. Demand Engineering in Mass Customization Using Data-Driven Approach[A]. In: Customization 4.0. Springer Proceedings in Business and Economics[C]. Berlin: Springer, 2018: 75-86.
- [28] Chen Y. H., Wang Y.Z., Wong M.H. A Web-Based Fuzzy Mass Customization System[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2001, 20 (4) : 280-287.
- [29] Hofman E., Halman J. I. M., Ion R.A. Variation in Housing Design: Identifying Customer Preferences[J]. Housing Studies, 2006, 21 (6) : 929-943.
- [30] Mishra M., O'Brien M., Ku K., Beliveau Y. Digitally Enabled Mass Customization in Residential Construction for Production Home Builders[A]. In: Proceedings in the International Conference on Mass Customization and Personalization-Extreme Customization[C], Massachusetts and Montreal, 2007: 12-24.
- [31] Nahmens I., Bindroo V. Is Customization Fruitful in Industrialized Homebuilding Industry?[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2011, 137 (12) : 1027-1035.
- [32] Anderson D.M. Build-to-Order & Mass Customization: The Ultimate Supply Chain Management and Lean Manufacturing Strategy for Low-Cost On-Demand Production Without Forecasts or Inventory[M]. California: CIM Press, 2004.
- [33] Lampel J., Mintzberg H., Customizing Customization[J]. Sloan Management Review, 1996, 38 (1) : 21-30.
- [34] Simpson, Timothy W. Product Platform Design and Customization: Status and Promise[J]. Ai Edam, 2004, 18 (01) : 3-20.
- [35] Ulrich K.T. The Role of Product Architecture in

the Manufacturing Firm[J]. *Research Policy*, 1995, 24 (3) : 419-440.

[36] Sanoff H. *Participatory Design: Theory and Techniques*[M]. California: Create Space Independent Publishing Platform, 2018.

[37] Kvan T. *Collaborative Design: What is It?*[J]. *Automation in Construction*, 2000, 9 (4) : 409-415.

[38] Von Hippel E. *User toolkits for innovation*[J]. *Journal of Product Innovation Management: An International Publication Of The Product Development & Management Association*, 2001, 18 (4) : 247-257.

[39] Forsythe P. *Monitoring Customer Perceived Service Quality and Satisfaction During the Construction Process*[J]. *Construction Economics and Building*, 2015, 15 (1) : 19-42.

[40] Veloso P., Celani G., Scheeren R. *From the Generation of Layouts to the Production of Construction Documents: An Application in the Customization of Apartment Plans*[J]. *Automation in Construction*, 2018, 96 (12) : 224-235.

[41] Kwieciński K., Markusiewicz J. *Interfacing Automation for Mass-customization*[A]. In: Kepczynska-Walczak, A, Bialkowski, S (eds.). *Proceedings of the 36th eCAADe Conference*[C]. Lodz: Lodz University of Technology, 2018: 253-262.

[42] Kwieciński K., Duarte J. P. *Customers Perspective on Mass-customization of Houses*[A]. In: Sousa, J.P., et al. *Proceedings of the 37th eCAADe and 23rd SIGraDi Conference*[C]. Porto: University of Porto Portugal, 2019: 97-102.

参考文献

[1] Rycroft W. R., Kash D. E. *The Complexity Challenge: Technological Innovation for the 21st Century*[M]. London: Pinter, 1999.

[2] Armstrong P. J. *From Bauhaus to m-[h]ouse: The Concept of the Ready-Made and the Kit-Built House*[J]. *New Directions in Prefabricated Architecture*, 2008, 1 (1) : 72-80.

[3] 王江, 赵继龙, 杨阳. 面向大规模定制的工业化住宅产业发展历程与趋势展望[J]. *东岳论丛*, 2020, 41 (10) : 114-123.

[4] Kaplan A. M., Haenlein M. *Toward a Parsimonious Definition of Traditional and Electronic Mass-Customization*[J]. *Journal of Product Innovation Management*, 2006, 23 (2) : 168-182.

[5] 斯蒂芬·基兰等. *再造建筑——如何用制造业的方法改造建筑业*[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

[6] Koren Y. *The Global Manufacturing Revolution: Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.

[7] Habraken H. J. *Supports: An Alternative to Mass Housing*[M]. London: Routledge, 2021.

[8] Kolarevic B. *From Mass Customisation to Design 'Democratisation'* [M]. *Architectural Design*, 2015, 85 (6) : 48-53.

[9] 李飏, 韩冬青. 建筑生成设计的技术理解及其前景[J]. *建筑学报*, 2011 (06) : 96-100.

[10] 王江, 郭芸麟, 赵伯伦, 杨阳, 赵继龙. 面向制造与装配的住宅定制设计研究[J]. *室内设计与装修*, 2021 (02) : 116-117.

[11] 李飏, 张佳石, 卢德格尔·霍夫施塔特, 郭梓峰, 魏力恺. 算法模型解析设计黑箱[J]. *建筑师*, 2019 (01) : 94-99.

[12] Durdyev S., Ihtiyar A., Banaitis A. *The Construction Client Satisfaction Model: A PLS-SEM Approach*[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2018, 24 (1) : 31-42.

[13] 苏平, 熊璐. 面向大规模定制的数字建筑设计变革[J]. *建筑师*, 2013 (06) : 34-39.

[14] 王江, 范伟, 郭道夷, 杨阳, 赵继龙, 董廷路. 基于形状语法的AutoCons可持续住区生成设计研究——以章丘岳滋新村为例[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 53 (3) : 429-436.

图表来源

图1: 根据参考文献[6]改绘
图2-1, 图2-3, 图3-1: <https://www.pinterest.com>
图2-2: <http://www.archdaily.cn/cn>
图2-4: Imperiale A. *An American Wartime Dream: The Packaged House System of Konrad Wachsmann and Walter Gropius*[C]. ASCA Fall Conference, 2012: 39-43.
图2-5: <https://franklloydwright.org>
图3-2: 根据注释[10]绘制
图3-3: 根据注释[11]绘制
图3-4: 自绘
图3-5: 根据注释[16]绘制
图4-1: Carpo, M. *The Digital Turn in Architecture 1992-2012*[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
图4-2: 根据注释[17]绘制
图4-3: 根据注释[19]绘制
图4-4: 根据注释[18]绘制
图4-5: 根据注释[20]绘制
图5-1: <https://wikihousedestripmaker.nl>
图5-2: 根据注释[22]绘制
图5-3: 根据注释[23]绘制
图5-4: 根据注释[24]绘制
图5-5: <https://www.urbanvillageproject.com>
图5-6: <https://www.woonpioniers.nl>
图5-7: <https://www.livinghomes.co.uk>
图5-8: <https://www.bluhomes.com>
图5-9: <https://www.re4a.com>
图5-10: <https://www.tollbrothers.com>
图6: 根据注释[29]绘制
图7, 图8: Barlow J. *Choice and delivery in housebuilding: lessons from Japan for UK housebuilders*[J]. *Building research & information*, 2003, 31(2): 134-145.
图9-1, 图9-2: 根据文献e Costa E C, Jorge J, Duarte J. *Comparing digital tools for implementing a generative system for the design of customized tableware*[J]. *Computer-Aided Design and Applications*, 2019, 16 (5) : 803-821. 改绘
图10, 图11: 根据注释[40]绘制
图12~图14: 根据注释[42]绘制