



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Engineering Management—Article

## 工程建造服务化及其转型路径——从价值增值视角

刘典<sup>a</sup>, 王红卫<sup>b,\*</sup>, 钟波涛<sup>c</sup>, 丁烈云<sup>c</sup>

<sup>a</sup> SILC Business School, Shanghai University, Shanghai 201899, China

<sup>b</sup> School of Management, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

<sup>c</sup> School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 1 June 2021

Revised 17 September 2021

Accepted 28 September 2021

Available online 7 December 2021

#### 关键词

工程建造  
服务化  
价值增值  
服务创新  
平台共享

### 摘要

在当前以服务和技术为主导的社会技术背景下,工程建造面临着产业转型升级的新机遇。面对制造业通过服务化实现转型升级的成功经验,工程建造行业的学者和从业者开始探索工程建造服务化的可能性。然而,现有实践与理论表明工程建造领域对服务化存在不同的理解,且处于萌芽期,缺乏对服务化深入、系统的认识,不利于借助服务化推动工程建造的转型升级。为此,本文立足工程建造行业面临的问题,从服务化的价值增值本质出发,系统性地分析了工程建造服务化的动机、定义与内涵;再结合数字建造新趋势,从价值共创、服务创新与网络化运作等不同角度分析了数字时代工程建造服务化的转型途径,还基于财务、人力、技术与材料设备等工程建造支撑要素剖析了工程建造服务化对工程建造生态圈的影响。通过系统性的分析与阐述,期望为学者和从业者提供一种对工程建造服务化从内到外的全面认识,帮助推动工程建造的服务化转型。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

世界经济的发展已经从后工业经济时代进入服务经济时代[1], 服务在各类经济活动中的重要性越来越突出。自20世纪80年代“服务化”概念被提出[2], 通过服务来增加核心产品的价值进而获得竞争优势的观念被越来越多的学者接受, 也不断有企业通过服务化转型实现了竞争力提升。例如, 著名的航空发动机公司Rolls-Royce不仅销售飞机发动机, 同时提供发动机管理与维护服务, 甚至出售飞机发动机的飞行时间(power-by-the-hour); IBM公司出售硬盘、个人计算机等业务, 转而为客户提供量身定制的

综合解决方案, 如今已经发展成为主要的高科技服务企业。

这些现象的出现并不是偶然, 恰恰符合当前经济环境下产业发展的需求。一方面, 技术进步使得企业提供的产品逐渐趋于同质化, 在全球化竞争背景下, 企业必须增加产品的差异化, 获得无法轻易复制的竞争力。另一方面, 随着物质水平的不断提高, 消费者并不满足仅仅获得产品, 更加关注产品的使用体验, 形成个性化和多样化的需求。服务化动机的研究[3–4]表明, 服务是一种增加产品差异化的方法; 服务也能够产生具有吸引力的利益分享, 市场量级也比产品市场大; 服务化产生的不同形式的产品服务系统(product service system, PSS)能够帮助企业满

\* Corresponding author.

E-mail address: [hwwang@hust.edu.cn](mailto:hwwang@hust.edu.cn) (H.-W. Wang).

足复杂的客户需求。正是因为服务化在竞争力提升和满足客户需求方面的作用能够帮助企业适应产业发展现状，所以服务化转型成为顺应时代变革的产业发展趋势。

受制造服务化影响，工程建设行业在过去10年间也出现了服务化迹象，主要表现为在交付设施实体基础上提供长期服务以满足建设者商业需求的服务主导型项目（service-led project）。这类项目使承包商关注的焦点从交付设施实体转移到在设施实体基础上提供长期服务。这种转变导致传统的项目管理周期从交付阶段延伸到了运营阶段，增加了项目管理的复杂性。从有关服务主导型项目的一系列研究[5]中可以看出，蕴含的建造服务化涵义是在交付设施实体的基础上提供长期运维服务，通过将设计、施工和运维捆绑作为集成方案来满足建设方的需求[6]。早期的大部分服务主导型项目都是以公私合营（public-private partnership, PPP）方式进行的大规模工程项目，需要有民营企业提供长期服务[7-9]。然而，从2010年代以来，许多建筑企业开始引入和使用服务化概念而不涉及PPP方式[10-11]。研究也指出，聚焦于设施实体交付后的运维服务容易忽略项目交付过程本身存在的问题[12]。

除了上述服务化实践，中国学者近年来也提出了“互联网+”工程建设平台模式下的工程建设服务概念[13]，将工程建设服务定义为建造行业各参与方凭借人、设备等有形资源进行的一系列活动，以满足业主某种特定需求[14]。基于Koskela [15]的研究，Wang等[16]从价值流视角对工程建设进行刻画，将工程建设服务划分为设计服务、材料供应服务、施工服务和其他支持服务。他们提出的工程建设服务概念更加强调对工程建设过程的服务化。这种建造过程的服务化使专业化分工更加精细，为建造行业各参与方在互联网平台上进行基于建造需求的交易提供可能，进而实现建造资源的汇集和优化配置。

上述服务主导型项目的实践与工程建设服务概念展现了业界和学界对工程建设服务化的不同理解，表明工程建设行业缺乏对工程建设服务化的一致认识。不论是实践还是理论，对工程建设服务化的认识仍然处于萌芽期，缺乏对工程建设服务化的清晰界定和系统性理解（包括动机、内涵实现路径以及影响），难以为工程建设行业的服务化转型提供理论支撑。因此，需要有研究能够明确工程建设服务化的概念、内涵及其实现路径，帮助工程建设企业实现服务化转型。

本文在分析工程建设服务化转型动机的基础上，提出了工程建设服务化的定义；以服务的价值增值效果为切入点深入分析了工程建设服务化的内涵；再结合数字技术在建造行业的实践情况设计了工程建设服务化的实现方式；

最后从金融、人力、技术、材料设备等方面分析了工程建设服务化催生的新业态。因为数字建造正成为一种新趋势，所以在讨论工程建设服务化转型路径时需要考虑工程建设数字化实践。综上，本研究期望建立对工程建设服务化的系统性理解，以推动工程建设行业及相关产业的服务化转型，帮助解决工程建设行业面临的发展问题，实现产业升级。

## 2. 工程建设服务化

### 2.1. 服务化定义

服务化最早由Vandermerwe与Rada [2]提出，现在被广泛接受的定义是从提供产品向提供产品-服务包的转变[17]。因为这能够带来价值增值，所以引起了学者的关注和研究。Baines等[17]在总结以往服务化定义基础上，将服务化描述为组织能力和过程的革新，旨在通过从销售产品向销售PSS转变来更好地创造共同价值。这种价值的共同创造表现为顾客参与产品-服务系统的提供以更好地满足顾客的个性化需求，不同于传统的通过产品销售实现价值创造的方式。

PSS最早由Goedkoop等[18]正式提出，被定义为一个由产品、服务、参与者网络和支持基础设施组成的系统，该系统的目标在于保持竞争性、满足顾客需求并降低对环境的影响。之后，许多学者在此基础上提出了不同的PSS定义，Baines等[19]综合这些定义，将PSS概括为一种在使用中提供价值的集成产品和服务，使经济效益与产品消费分离进而降低经济活动的环境影响。这些定义都表明，PSS强调通过产品使用而非产品购买来满足顾客的需求，利用服务实现“去物质化”来减少原料消耗，进而实现环境的可持续性[20]。从满足客户需求角度看，PSS是制造服务化的一种特例，重视资产绩效或利用而非所有权，通过产品和服务的集成实现差异化，为客户提供使用价值[19]。

服务化的另外一种表现形式被称为服务型制造，由中国学者Sun等[21-22]提出，他们在分析世界制造业变革趋势基础上提出了一种制造与服务相融合的先进制造模式。服务型制造提供三种形式的PSS：包括面向产品的PSS、面向使用的PSS和面向效用的PSS。从制造与服务融合方式看，服务型制造包括面向服务的制造[23]和面向制造的服务，前者是制造企业提供的工艺流程级的制造过程服务，而后者对应生产性服务企业提供的覆盖产品全生命周期的业务流程级服务[24-25]。

总的来说，服务化强调通过产品与服务的集成来满足顾客的个性化需求，在需求被满足过程中产生价值增值，

而产品服务系统是一种产品与服务集成的广义产品，根据产品和服务所占比重的不同表现出不同的形式[26]。相比于制造服务化，服务型制造不仅关注产品与服务集成的价值实现方式，还提倡产品制造过程的服务化，即制造企业提供专业化服务为其他企业完成生产任务。通过这种方式，使得企业主体能够在更广阔范围内获得具有比较优势的制造资源，在降低制造成本的同时提高生产效率[21]。

## 2.2. 工程建造服务化现状

服务化理念已经在制造业领域盛行，建造领域的学者和从业者分析了这种模式能否解决建造行业面临的问题，如建造效率低、核心竞争力弱以及利润单一。事实上，过去20年已经有了很多关于建造服务化的讨论。

在这种转变的早期，出现一种对建筑行业理解的转变，即从承包商向客户提供建筑产品转变为承包商在此过程中还提供一系列建筑服务[27]。近年来，服务主导概念在建造行业兴起并有越来越多的应用，如服务主导型项目和契约、服务主导型关系。“服务主导型项目”一词用来代表一类越来越普遍的复杂项目类型，该类项目的生命周期因项目需求驱动而延伸到运营维护阶段[28]。一些学者也将这类项目称为“服务主导型契约”[29]。“服务主导型关系”是指基于项目的企业因为项目的唯一性和动态性而采用服务主导逻辑（service-dominant logic, SDL）和关系营销（relationship marketing, RM）[30]。关系营销鼓励企业通过与顾客建立长期关系而不是单次交易来提高盈利能力，而服务主导逻辑则将企业的重点从销售产品转移到服务交易。

总而言之，这些概念反映出建造行业需要从产品交付转向满足用户需求。因此，对服务化的研究重点也转向了全生命周期的考虑和项目的服务维度。对现有研究的回顾揭示了建造行业对服务化的一些思考。例如，基于已安装的资产提供长期服务被视为服务主导型项目的驱动力[8]。长期服务需求要求承包商将注意力从关注保修期内的交付和支持转移到对未来可能发生事情的长期考虑。在此情形下，承包商不仅仅是设施建造者，还是通过充当维护工程顾问和最终顾客的服务提供商，成为项目整体维护过程的主动参与者[31]。在寻求合作的客户-供应商项目关系时，服务（而不仅仅是产品）成为核心标准[32]。这些研究议题表明建筑行业已经开始接受这种通过提供基于建成资产的长期服务来增加价值的模式。

尽管上述研究并未直接提及建筑服务化，但长期服务提供的含义与源自制造业的服务化概念是一致的[2]。由于建造企业越来越多地需要考虑建筑物全生命周期的表

现，学术研究开始探索服务化在建造行业中的影响。Robinson和Chan[33]指出，随着私人融资计划（private finance initiative, PFI）和PPP的激增，服务化在建造行业开始变得重要，因为设计和施工承包商越来越多地参与建筑资产的运营和维护。通过追踪一家建造企业走向服务化的历程，Robinson等[10]显示了如何通过供应链中调动新资源、开发新产品和创建新服务产品，使组织能够以新的方式创造和获取价值。此外，通过对另外一家建造公司追求服务化的案例进行分析，Robinson等[34]提供了关于新兴技术特性如何以及为何能够使组织价值链中的参与者以更服务化的方式采取行动的新见解。这些研究表明，服务化是为建造企业创造新价值的有效途径，技术开发在服务化转型中发挥着重要作用。

依据服务主导逻辑，创造的价值是按照使用中的价值进行评估，最终客户和其他利益相关者的服务体验起到重要作用[35]。为了检验总承包商和供应链成员通过服务设计改善服务体验的程度，Smyth等[36]对10个总承包商进行半结构化访谈，观察到客户和用户都在他们的服务体验中实现了次优价值。Fuentes[37]指出，将最终用户视为被动参与者而不是价值的共同创造者，可能会影响项目的体验和财务价值结果。这些研究强调了最终用户在项目执行期间服务体验的重要性，并建议将最终用户视为价值的共同创造者。

随着行业焦点转向通过在建筑资产的运营维护阶段提供服务来增加价值，也出现了沿着服务型制造思路讨论建造服务化的研究。也就是，建造活动被概念化为在项目交付期间增加价值的建造服务[14]。这种概念化旨在通过互联网平台上的建造服务交易实现资源整合和按需分配[16]。此外，工程建造平台模式为建造行业解决所面临的传统问题提供了新的机遇，如信息孤岛、协作效率低下及施工效率低下等[13]。近年来，中国市场也催生了一些与建造相关的互联网平台，如建造电商平台云筑网（yzw.cn）和工程服务众包平台话梅糖（huameitang.com）。

综上，从不同角度考虑建造行业服务化内涵有两条研究路线：运营服务化和生产服务化。大多数研究都是通过案例进行，为服务化实践提供了证据。然而，对于建造服务化意味着什么以及如何实现，仍然缺乏明确的概念。而且，服务化的概念应该将两个研究方向的观点合二为一。

## 2.3. 工程建造服务化的定义

出于通过服务化升级建造行业的动机，必须将服务主导逻辑整合到建造行业，以促进专业群体之间的信息共享和积极协作[38]。转型过程必须在建设中引入差异化要

素，实现多元化竞争，让实体用户参与服务提供过程以更好地满足用户需求来提升服务。总之，通过强调建造过程服务化、实体建造与服务提供一体化以及用户参与可以有效地帮助建筑业应对发展问题。

此外，工程建造与服务结合的实践与研究表明，工程建造服务化蕴含两种不同含义：一是在建筑实体基础上提供与使用和运营维护相关的服务；二是为建筑实体交付提供面向建造过程的专业化服务。与服务型制造相比，这两种含义分别对应基于产品与服务集成的产品服务系统和基于产品生产过程的的服务化。由制造服务化的研究可知，PSS和生产性服务统一于价值增值动机，前者通过满足客户个性化需求实现价值增值，后者则通过提高生产效率、减少浪费来实现价值增值。基于上述分析，本文将工程建造服务化定义为通过在实体建造和实体使用过程中引入服务元素来增加价值。按照建造阶段，建造服务化的表现形势可分为面向建造的服务和面向使用的服务。

### 2.3.1. 面向建造的服务

面向建造的服务是指在施工过程中而非以用户为中心的使用阶段提供的旨在帮助施工企业完成施工相关需求的服务。根据服务是否与施工活动直接相关，可以将这些服务分为施工过程服务和施工支持服务。施工过程服务是建造企业为完成施工活动而提供的服务，施工支持服务是服务企业为促进施工活动的完成而提供的服务，包括资源型服务（如设备租赁和材料供应）、基于知识的服务（如信息服务和咨询服务）以及其他支持服务（如物流和计算服务）。

### 2.3.2. 面向使用的服务

面向使用的服务是指由利益相关者提供的建筑实体与服务集成的综合解决方案，以满足人们对生活的物理空间、工作或娱乐的需求。依附于建筑实体的服务旨在方便实体使用并改善用户体验，包括基本的运营与维护服务，如维护与维修、能源管理、应急管理、变更或搬迁管理和安全[39]，也包括针对特定群体的延伸服务，如老年人的医疗保健服务。此外，根据用户是否拥有建筑实体，可以将面向使用的服务分为两类：用户主导服务和业主主导服务。“用户主导”是指面向使用的服务被直接提供给拥有建筑实体的用户；而“业主主导”是指提供面向使用的服务以满足用户需求，但建筑实体属于所有者而不是用户。

总的来说，工程建造服务化旨在提高工程建造企业的建造竞争力，并更好地满足业主对建筑实体建造以及用户对实体使用的需求。在企业层面，工程建造服务化是建造

企业实现建造过程和产品相关服务的差异化、提高建造效率、快速响应市场需求，进而提升竞争力的有效手段。在行业层面，工程建造服务化是实现建造与服务深度融合的新途径，有助于完成从低端增值向高端增值发展的产业转型。

工程建造服务化的基本定义不足以让从业者确定如何在行业和企业层面实现服务化转型。借鉴制造服务化研究，建造领域的学者非常关注服务化带来的挑战和益处[4]、行业面临的挑战[40]、转型路径[41]。考虑工程建造服务化仍处于起步阶段，可用于分析其挑战的案例很少，本文试图阐明这一新概念的内涵和外延，为从业者实现建造服务化提供路径建议。因此，后续章节将分析和讨论工程建造服务化所蕴含的变化、可能的转型路径，以及服务化对产业生态系统的延伸影响。

## 3. 工程建造服务化的内涵

工程建造服务化意味着一种变化，其核心在于从以建筑实体为中心的项目实施向以客户需求为中心的服务转变。本质上，这种转变会改变传统的工程建造增值方式。建造企业的商业模式以及他们的协同关系也将改变。如图1所示，工程建造服务化带来的转变主要包括三个方面，即价值增值、商业模式和运作模式。

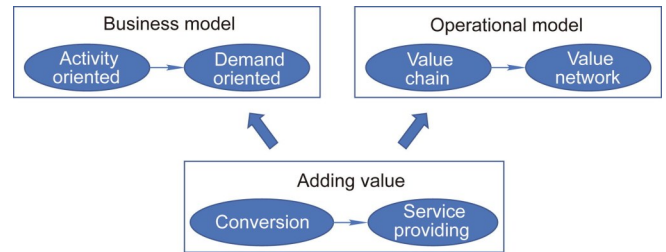


图1. 工程建造服务化蕴含的变化。

### 3.1. 价值增值

根据不同的视角，可以将价值划分为顾客感知的使用价值（use value）和销售时发生的交换价值（exchange value）[42]。在商品主导逻辑下，价值被认为是通过商品交易传递的交换价值。在服务主导逻辑下，价值被认为是由服务提供者和服务受益者在互动中共同创造的使用价值[43]。在工程建造行业，各类企业围绕建筑实体展开业务，使建筑实体成为价值创造、传递和获取的载体。从建筑实体的全生命周期来看（图2），建造行业的价值增值主要发生在两个阶段，即建筑实体的建造阶段和使用阶段。建造阶段包括规划、设计和施工等完成建筑实体的增

值活动，而使用阶段包含保证工程实体发挥正常功能的价值增值活动，如资产管理和翻新。

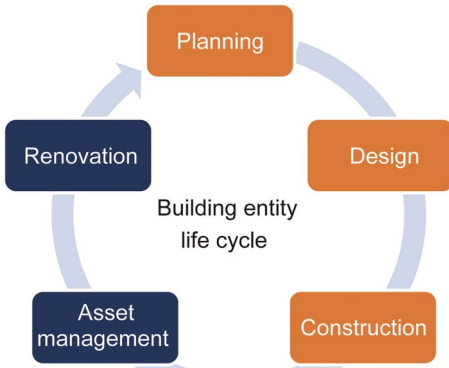


图2. 建筑实体全生命周期。

围绕建筑实体，工程建设各阶段的价值增值活动主要完成从输入到输出的功能性转换。例如，设计将业主对建筑实体的设想转换为设计方案，施工完成从原材料到建筑实体的转换。在转换视角下，工程建设的价值增值活动局限于某一个环节，造成各环节的割裂，不仅压缩了价值增值的空间，还严重削弱了各环节间的协同效率。

相比之下，在服务化视角下，工程建设各阶段的价值增值围绕客户需求展开，通过工程参与者与客户的供需交互实现价值共创（图3）。这里的“客户”不仅指终端用户，还包括业主、承包商、设计单位以及其他在建造过程中有不同需求的利益相关者。工程参与者也被称为供应者，不仅完成建筑实体建造过程中的转换活动，在建造阶段之前或之后的阶段也提供与转换活动相关的支持服务。“客户”也被称为需求者，必须参与价值创造的过程，而不是被动地选择产品或服务，以此更好地满足个性化需求。

基于上述分析，工程建设服务化视角下价值增值转变可概括为：

**转变1。**在工程建设服务化视角下，传统的基于转换活动的价值增值方式已经转变为以各级客户需求为中心的服务提供，既包括功能性服务也包括支持性服务，覆盖建筑实体全生命周期。

### 3.2. 商业模式

商业模式代表了企业在价值网络中创造和获取价值的战略选择和核心逻辑。战略选择决定了企业向哪些客户提供哪些价值，价值创造和获取是企业向客户传递价值并保持生存的过程。核心逻辑澄清了价值传递背后的因果关系并保证战略选择的内部一致性。因此，从组成上讲，商业模式是由战略选择、价值创造、价值获取和价值网络等构成的价值系统。服务化使工程建设企业的价值增值方式发生改变，必然会带来价值创造和获取方式的改变，进而改变整体的价值系统。

传统地，咨询、设计、施工等类企业通过与业主或承包商签订项目活动参与工程项目，为业主或承包商完成管理、设计或施工等建造任务以获得报酬。从商业模式逻辑看，工程建设企业利用自身资源（如人力资源和设备等）完成转换活动为业主或承包商创造价值，同时业主或承包商完成合同支付使建造企业获得价值。可见，传统的工程建设企业是以活动主导的价值交换作为商业模式。

在服务化背景下，工程建设企业的价值增值方式是提供以满足个性化需求为中心的服务。由于个性化需求往往覆盖建筑实体全生命周期的多个阶段，工程建设企业需要突破原有活动范围，实现建筑实体全生命周期的参与。那么，工程建设企业既可以在产品建造阶段为业主创造价值，也可以在产品使用阶段为产品使用者产生价值。简言之，工程建设企业的商业模式变成一种以需求为主导的价值创造手段。相比之下（图4），可以将服务化背景下建造企业商业模式的转变概括为：

**转变2。**工程建设服务化背景下，工程建设企业的商业模式从活动主导的价值交换转向需求主导的价值交换。

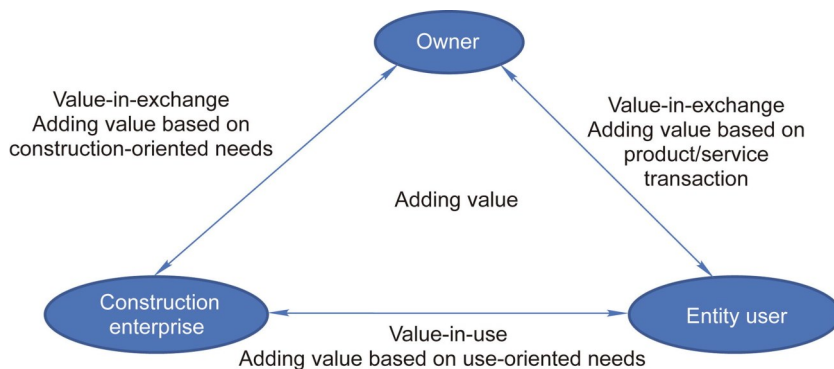


图3. 工程建设服务化下面向需求的价值创造。

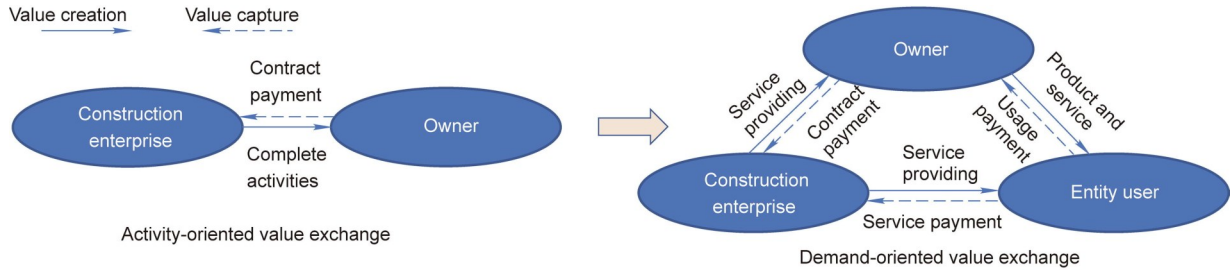


图4. 工程建造服务化的商业模式转变。

### 3.3. 运作模式

在制造领域，生产运作是指企业投入各个生产要素，通过一系列的转化过程，最终产出有形产品和无形服务的过程。由于工程实体的复杂性以及工程建造分工精细化，工程实体的建造必须由若干企业共同完成，因此，工程建造的生产运作是利益相关者相互作用完成工程实体交付的过程，参与者能否从建造过程中受益、建造过程能否高效协同，将成为影响生产运作效率的重要因素。

传统工程建造以工程实体交付为目的进行项目组织，按照不同的项目采购模式，项目成员形成不同的契约关系。但由于工程实体的单件性，项目成员的关系具有典型的临时性，随着项目的完工而结束。如图5上半部分所示，项目成员包括业主、设计方、施工方和供应商，价值链上相邻成员之间有不同的临契约关系，并对应着不同的建筑任务，如规划、设计、实体交付和原材料供应。同

时，工程建造各环节的分隔性（尤其是设计与施工的割裂）造成项目成员只关注自身利益，缺乏相互之间的主动协作，严重影响生产运作的效率与绩效。即使引入供应链、精益建造等管理思想，项目成员的关注点并没有改变，仅仅在外界激励或管理约束下被动协作，并不能最大程度地发挥系统的效率。

相比之下，在服务主导逻辑下，满足顾客需求是企业的焦点，以产品交付为中心的项目组织方式不再适用。在顾客需求驱动下，原本的项目参与者变为服务提供者，活动范围由单个阶段扩展到工程实体全生命周期的各个阶段。为了提供更好的服务，参与者必须主动与各个阶段的利益相关者协作。如图5底部所示，每个参与者都可以通过这两种类型的需求连接到每个其他参与者，而不是通过价值链中的单级连接。例如，在装配式建筑中，总承包商充当设计方和供应商之间的系统集成商，以协调预制件的

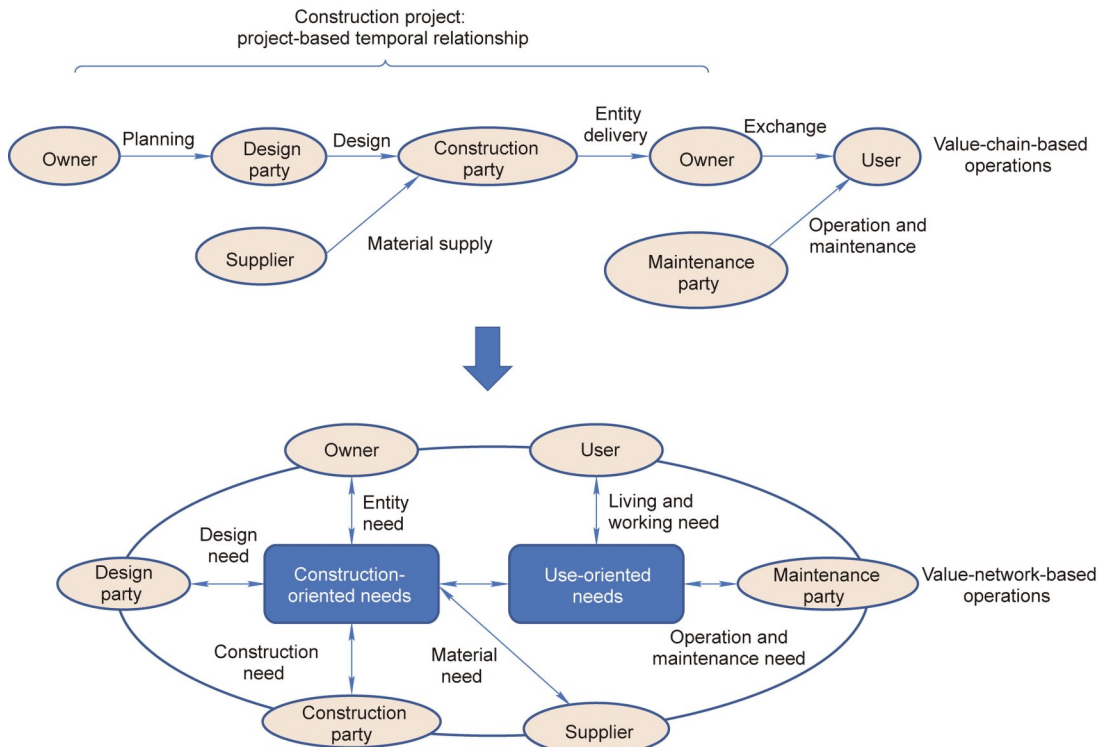


图5. 工程建造服务化的运作模式转变。

设计和生产。虽然建筑实体的单一性依然存在，但由于建筑实体的生命周期很长，每个参与者都必须形成长期的合作关系。这种关系不仅体现在当前的服务项目中，也体现在其他新的服务项目中。

对比服务化转型前后工程建造运作模式（图5），可以将工程建造运作模式转变概括为：

**转变3。**工程建造服务化将过程分割、具有临时组织关系的上下游价值链运作模式转变为全过程参与、长期合作关系的价值链网络运作模式。

## 4. 工程建造服务化的转型路径

建筑业领域引入服务化将从价值增值、商业模式创新以及运营模式创新等方面升级和重塑建造行业。上一节对工程建造服务化内涵的分析突出了各方面转型的核心要素；然而，如何实现上述三个转型的问题仍然存在，特别是在新兴数字技术带来广泛的产业转型背景下。例如，智能制造[44]、智慧医疗[45]、区块链金融[46]以及气候智能农业[47]等，都是传统产业引入数字技术后出现的新业态。因此，结合数字化革新，深入分析工程建造服务化的实现方法势在必行。分析应从建造数字化革新入手，探索具体的价值增值方式、商业模式创新和服务化运作模式。

当前，数字技术的发展与普及极大推动了传统建造行业的数字化变革，催生了数字建造（digital construction）概念[48–49]。此外，起源于制造业的工业4.0被引入建造行业，学者提出了建造4.0（Construction 4.0）概念[50]。不论是数字建造还是建造4.0，背后的核心理念都是利用数字技术来重塑工程建造，包括对工程建造活动、利益相关者协作方式以及建筑实体使用等的改变，其目的在于提高工程建造效率与效益，以满足日趋多元化的用户需求。

从数字化对制造服务化的影响来看，数字化转型能够通过提供复杂而创新的服务来推进制造服务化[51–52]，主要途径是数字化技术与售后[53]、生产[54]和供应链[55]等不同商业维度的集成。另一方面，物联网和人工智能等技术的采用能够增强或完全改变交付服务的特性，并能催生新的面向服务的商业模式。大数据、云计算等不同数字技术的应用也改变了服务化的价值创造方式[56–57]。换言之，数字化主要通过增加新服务或改善已有服务来创新商业模式，并借助技术应用来改变价值创造方式。

对工程建造而言，数字变革意味着在以建筑信息模型（building information modeling, BIM）和通用数据环境（common data environment, CDE）为基础的数字生态系统的支撑下实现建筑实体的交付与相关商业过程。采用的数字技术主要包括视频与激光扫描、人工智能与云计算、大数据与数据分析、区块链、增强现实（AR）/虚拟现实（VR）、物联网等[58–59]。从各类技术的功能来看，数字技术的使用可以从工程实体建模与仿真、数据收集与转换、信息分析与共享等方面为建筑实体的建造与使用过程提供认知与控制支持，改变建筑实体全生命周期中的活动完成方式和参与者交互关系。那么，借鉴数字技术对制造服务化的影响，结合工程建造服务化的内涵，提出如下工程建造服务化的实现框架，如图6所示。

### 4.1. 基于价值共创的价值增值

作为服务主导逻辑的核心观念，价值共创理念认为顾客一直都是价值的共同创造者，因为产品或服务只有被顾客使用或体验才具有价值[60]。换言之，价值共创是产品或服务提供者与顾客通过直接互动创造价值的过程，强调提供者与顾客之间的互动关系[61]。在数字化时代，数字技术的使用正在改变提供者与顾客之间的互动方式。具体

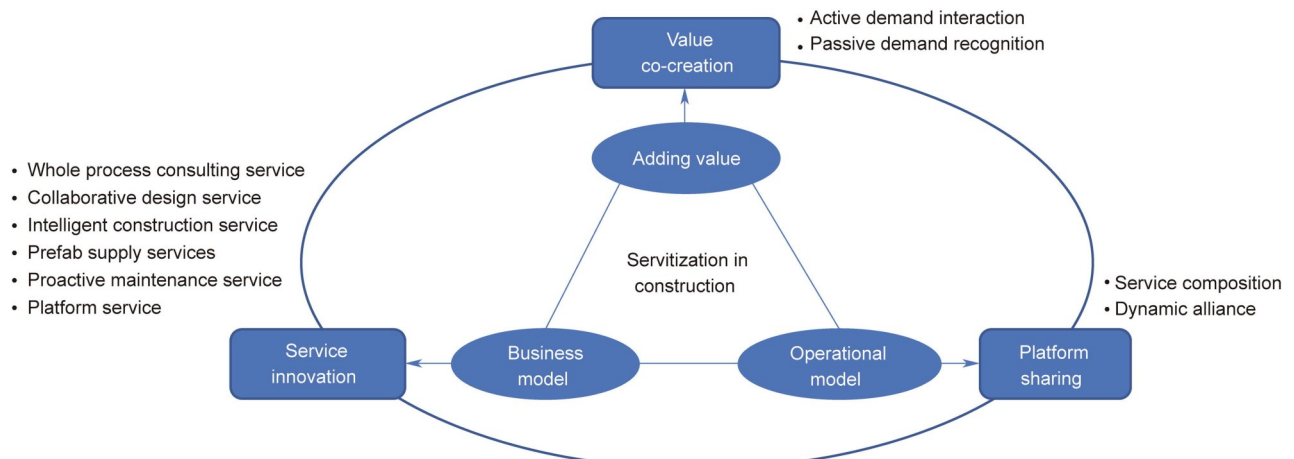


图6. 工程建造服务化转型路径。

而言，数字化的情报、连接与分析能力将提供者和顾客的价值创造活动合并为一个流程，使双方进行资源、过程和结果的互动，企业在这样的联合互动中通过增加互动的广度和深度来共同创造价值[62]。

在价值共创理念影响下，工程建造服务化的价值创造应由建筑实体使用者与建造者在交互过程中完成。数字技术的使用为两者的深度交互提供了可能。得益于BIM技术，建筑实体设计由传统的二维图纸设计转变为三维模型设计，建筑实体被建模为可视化的数字对象[63]。借助AR/VR技术，建筑实体以“可看见、可感受”的方式向使用者呈现，有助于使用者根据自身需要对产品设计提出意见[64]。例如，设计团队与利益相关者在VR环境下进行医疗设施设计的可视化沟通[65]。简言之，BIM和AR/VR技术使得产品使用者能提前参与产品的设计与建造[66]，并提供自己的需求信息，使得最终产品符合自身需求，极大提升了产品价值。

除了产品使用者的主动交互，物联网、大数据、人工智能等技术能帮助建筑实体的运营者从建筑实体使用过程收集使用者对产品的潜在需求，进而改进产品设计以吸引潜在使用者并满足其需求[67]。一方面，借助建筑实体中部署的智能传感器、智能设备捕获产品使用者的行为数据，通过人工智能与大数据分析挖掘可以识别使用者对产品不同功能的满意程度，为工程实体的更新升级提供参考。例如，通过简单的低成本物联网传感器提取高层建筑的使用信息，进而研究人类活动如何影响建筑物的能源使用信息，最终帮助设计节能措施以减少建筑物的能源消耗[68-70]。不仅如此，可以为建筑实体中的智能设备提供交互能力，用于实时响应产品使用者的要求并主动收集使用者的不满意之处，作为产品后续改进的依据[71]。

总体而言，建筑实体建造者与使用者之间的价值共创表现为，产品使用者通过主动或被动的方式将自身对产品建造与运维的情况进行反馈，帮助产品建造者和运维者更好地满足自身需求，进而创造更高的价值。

#### 4.2. 基于服务创新的商业模式变革

制造服务化的相关研究表明，数字化技术将带来新的公司合作形式、新产品和服务、新顾客关系和雇员关系，进而对公司的商业活动和流程产生影响，最终改变价值创造和传递方式，形成新的商业模式[72]。从服务化提供的集成解决方案看，数字化分为远程监控、控制、优化和自主等不同程度。结合集成方案的定制化程度（标准化、模块化、客制化）和定价逻辑（面向产品、面向合约、面向可用性、面向产出），会形成面向产品的服务提供者、工

业化者、定制化的集成方案提供者、结果提供者和平台提供者等5种不同的商业模式[73]。

与之相比，数字化对工程建造服务化的影响主要体现在服务提供内容和服务提供方式上。具体而言，在建筑实体建造过程中，咨询、设计、施工、监理是建造参与者提供的主要服务，数字技术将革新上述服务的内容或提供方式，产生全过程咨询服务、协作式设计服务、智能化施工服务、预制件供应服务、预测性运维服务以及平台服务等创新服务提供（service offering）。

##### 4.2.1. 全过程咨询服务

与传统的咨询服务针对决策规划、设计、施工等不同阶段提供单项服务不同，在数字技术支撑下，咨询企业可以提供覆盖工程实体全生命周期的咨询服务。一方面，BIM和CDE技术能够有效打破建筑实体建造各阶段的信息壁垒，促进信息在建筑实体全生命周期各过程之间的沟通与传递，为进行全生命周期的咨询服务提供了数据与信息支撑。例如，针对大规模水电工程的复杂性、可变性和不确定性，开发基于BIM技术的协同平台有利于项目参与者和利益相关者共享风险、信息和资源，共同参与项目管理[74]。另一方面，信息的有效存储为基于大数据与人工智能的知识挖掘提供了条件，有助于咨询企业从过往服务中积累经验并形成知识[75-76]，进而提供多领域全周期的工程咨询服务。例如，利用基于自然语言处理方法从合同文件中抽取概念及其关系[77]，或者利用文本数据挖掘技术从后项目评价中发现有用的知识并进行分类[78]。

##### 4.2.2. 协作式设计服务

随着BIM技术被广泛使用，基于模型的设计逐渐成为主流设计方法，模型的标准化与模块化特性使得设计任务可以被分解为若干专业设计任务，再由不同的专业设计人员完成。在云计算和虚拟现实技术的支撑下，不同地理位置的各专业设计人员可以同时对一个设计模型进行操作（查看、编辑等），避免设计模型版本不同造成的设计错漏[79-82]。同时，设计任务的可分解性为众包模式的应用提供了可能，即通过互联网平台发布专业设计任务，有资质、有信誉且有意愿的专业设计人员通过竞争或团队合作的方式来完成设计任务，有效利用群体智慧获得满意的设计方案[83-84]。此外，设计服务的协作性还体现在利用以BIM技术为基础的在线平台，使最终用户、专业人员和政策制定者能够对建筑设计进行评论，并从中抽取信息以构建更有效的设计[85]。更理想地，专业设计人员可以参与后续设计相关的任务以提供建筑结构知识，如装饰装



修设计、改造设计等。

#### 4.2.3. 智能化施工服务

近年来，机器人、传感器、执行器等一系列互联网使能的物理设备被用于提供自动、安全的智慧应用。这些设备是提供智能化施工服务的基础。在建筑实体建造过程中，利用增材制造（additive manufacturing）技术自动打印物理构件和产品，可以颠覆传统的基于材料转换的建造方法[86–88]。机器人可以代替人工作业，提高施工效率，避免施工事故发生[89–91]。带有传感器的施工设备可以有效解决环境动态变化带来的不确定性，从而促进环境感知组件的组装和施工[45–46,92]。这些智能应用都需要实时监控和控制，而边缘计算为满足这种实时性要求提供了可能[93]。

#### 4.2.4. 预制件供应服务

装配式建筑是指在工厂生产建筑构件，再将整个或中间过程的建筑构件运输到施工现场进行装配以完成建筑实体[94]。尽管这个概念并不新鲜，但其显著的优势正吸引新一波的兴趣和投资，优势包括更快、更安全的制造，更好的质量控制和更低的环境影响[95]。一般来说，装配式建筑设计包括4个阶段，即设计、生产、运输和安装。装配式建筑方式的广泛采用将对组件的设计、生产和运输产生需求。在大多数情况下，设计和生产服务由制造商统一提供；总承包商负责现场组装，同时作为系统集成者管理涵盖4个阶段的集成供应链。

#### 4.2.5. 预测性运营维护服务

在数字技术赋能的背景下，设施管理者可以根据建筑实体使用过程获得的数据对产品功能组件的状态和使用者的舒适度进行预测，进而提供相应的维修服务或舒适度提升服务。基于功能组件的未来状态预测，设施管理者可以在故障发生以前进行故障检修，提前排除可能的故障。例如，通过物联网实时监测暖通空调（heating, ventilation, and air conditioning, HVAC）系统的状态并获得信息，再利用机器学习算法预测HVAC系统的未来状态，进而制定维护方案[96]。另一方面，建筑环境是影响使用者舒适度重要方面。为了提高产品使用者的舒适度，设施管理者可以从建筑环境数据和使用者行为数据中评估和预测使用者舒适度，进而采取控制策略改变建筑环境。例如，通过可穿戴传感器或红外热成像识别使用者的热舒适调节行为，构建个人舒适模型并预测使用者热舒适度，进而制定HVAC系统控制策略来调节建筑环境[97–100]。

#### 4.2.6. 平台服务

针对建筑实体全生命周期各阶段的信息共享需求，企业可以为项目参与方提供基于互联网平台的信息集成与共享服务。例如，要实现精益装配式建筑，可以利用云计算和物联网技术搭建服务平台，提供预制、运输、装配的各类信息，最终使所有参与企业无需技术知识也能轻松实现信息共享[101]。此外，为实现服务需求与供给的有效对接，平台企业可以提供基于互联网平台的交易服务，提高服务资源的配置效率。例如，基于云计算范式，欧洲电子市场整合了面向服务体系的架构和BIM模型，为建造行业搭建电子商务平台，用于HVAC交易服务和碰撞检测服务[102–103]。

#### 4.3. 基于平台共享的网络化运作

基于价值网络的运作模式是典型的网络化运营。在网络化制造中，网络化运营的特点是克服地域分散的限制，利用互联网技术支持参与企业在产品全生命周期中的协作，以更快的速度、更好的质量和更低的成本为市场提供需要的产品和服务[104]。工程建造服务化的目的在于提供满足个性化需求的集成解决方案。面对不同需求，需要由不同工程建造服务组成的集成解决方案，服务提供者构成的联盟也不尽相同。那么，工程建造服务化所需的网络化运作的关键在于使动态联盟的参与者相互协作，从而高效率、高效益地交付解决方案，涉及联盟成员选择与协作关系管理两个方面的问题。面对建筑实体不可移动性与工程服务提供者地理位置分散的挑战，基于数字技术的平台模式为实现上述网络化运作提供了可能。

随着工程建造领域开始迎接数字时代，建造数字孪生范式将在工程建造行业逐渐推广[105]。数字孪生的核心是利用从传感器收集的实时数据构建产品、过程或服务的镜像计算机模型，以便进行仿真决策与优化[106]。在建造数字孪生支撑下，各类工程建造服务被映射成可计算的形式，汇聚到互联网平台，由需求方通过服务交易获取。基于此，利益相关者通过平台搜索和交易，将不同类型的工程建造服务组合在一起，形成个性化的解决方案，完成他们的个性化任务目标。最终的服务组合方案决定了工程建造的参与者及其协作关系，但参与者能否达到理想化协同仍然取决于管理手段。

在平台交易约束下，联盟成员在服务交付过程中产生的信息必须存储于平台并在联盟成员间共享，这种方式打破了传统工程项目管理过程中的信息壁垒，为成员间的协作打下良好的信息基础。例如，基于BIM和室内定位技术将建筑质量检测信息上传至协作平台，提高质量管理相

关者之间的协作效率[107]；协作式安全监控平台被用来在不同利益相关者之间收集、分析和传播安全信息，克服安全信息不对称和低效沟通对安全监督有效性的限制[108]。此外，平台可以通过设计利益共享、风险共担的合约形式，提高联盟成员的协作主动性。例如，通过设计成本共担合同激励联盟成员间的知识共享[109]；借助激励共享合同促进承包商之间的设备共享，以提高工程施工效率[110]。平台还可以基于积累的历史协作数据评估不同成员间的协作水平，并据此进行服务推荐，以达到培养平台成员的主动协作意识。

## 5. 工程建设服务化背景下的衍生态态

就价值创造而言，工程建设行业不仅需要设计单位、承包商、分包商、运营商等工程建设企业完成建筑实体全生命周期中的价值增值活动，还需要材料供应商、金融企业、劳务公司、技术研发企业等为价值增值活动提供金融、人力资源、技术、材料以及设备等。为了叙述方便，将这两类企业分别称为价值增值核心企业（简称核心企业）与价值增值支持企业（简称支持企业）。这两类企业及其他企业之间的价值交换关系共同构成了工程建设行业的价值系统，加上政治、经济、社会、技术、环境、法律等外部宏观环境，形成了工程建设行业生态。

如前所述，工程建设服务化转型是以个性化需求为出发点寻求价值增值机会。为了满足个性化需求，核心企业

需要改变商业模式和运作方式。作为核心企业的支持者，支持企业同样需要做出改变来适应服务化对核心企业的要求，形成与工程建设服务化相关的新业态（图7）。具体地，工程建设企业对融资、房地产金融、老年人理财保险等的需求将催生新的工程金融产品。工程建设服务创新需要大量专业能力强的劳动力，闲散劳动力的技能提升与规范化管理将成为人力资源的新增长点。数字时代的服务化转型必然会产生大量数据，工程建设企业对数据管理与分析能力的需求会形成工程大数据市场。面对智能楼宇、养老住宅等智能化建筑实体对智能传感设备的大量需求，将会诞生专门的工程智能设备提供商。下面针对上述几个方面展开详细阐述。

### 5.1. 工程金融服务

作为建筑业发展的一种外部环境，金融服务是金融系统向建筑业提供的一种基础性服务，旨在为工程建设行业提供资金。随着建造服务化转型的发生，建造行业对金融服务的需求也从单纯的资金需求转变为较高阶段的综合式服务需求，需要将金融服务深度嵌入建造系统，以解决建造行业全流程或重点环节对金融服务的需求。而且，工程建设涉及材料设备供应、施工、物业运营维护管理等多类企业，每类企业可发展不同模式的工程金融服务。从当前行业实践看，工程金融市场主要包含设备融资服务、房地产金融服务以及养老住宅金融服务等模式，详细描述如下。

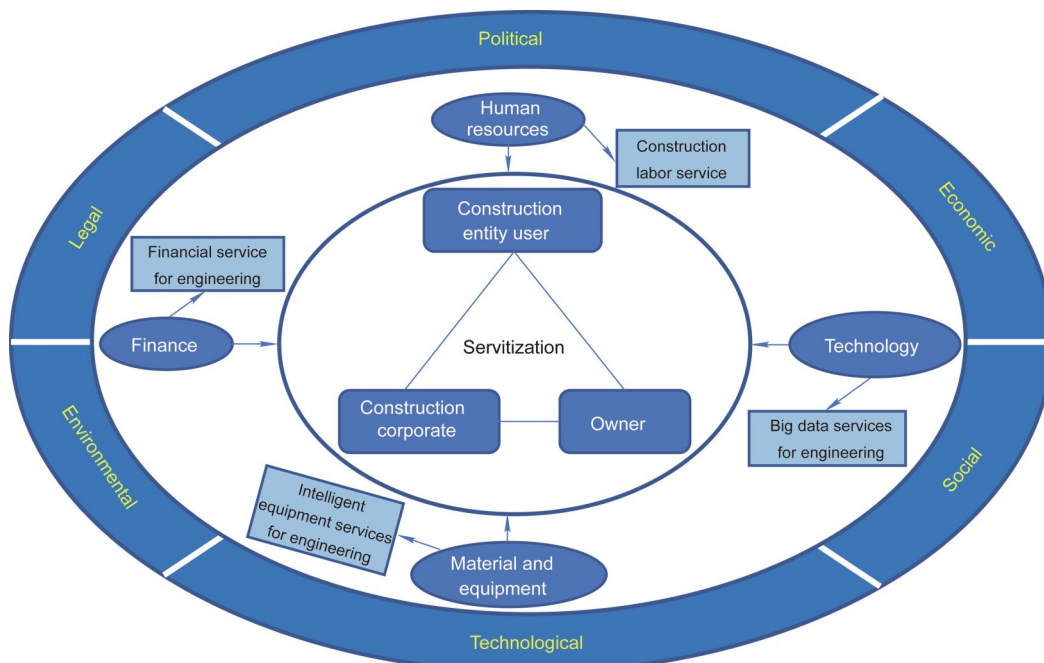


图7. 工程建设服务化背景下的新业态。

### 5.1.1. 设备融资服务

施工机械生产商卡特彼勒公司（Caterpillar Inc.）通过全球1500多个网店的租赁系统，提供短期和长期的租赁服务，以期构建一个涵盖产品、技术与服务的完整产业生态链。事实表明，租赁业务的发展不仅没有降低产品的销售，反而增加了销量，为企业带来利润的增长。此外，卡特彼勒公司在经济危机期间，主动为现金流紧张的中小型企业提供设备融资服务，帮助客户提升业绩与收益，让客户感受其服务的价值，提升了客户忠诚度，有助于与客户建立长期忠诚的合作。

### 5.1.2. 房地产金融服务

当下，有企业与第三方平台合作，推出“互联网+房地产金融产品”，服务个人投资者并为中小房地产企业提供资金解决方案。基于此，金融企业可以进一步建立互联网房地产金融平台，通过设计不同的产品将社会闲散资金、机构资金与房地产项目进行有效对接。需要指出，当大多数企业都依靠第三方平台提供工程金融服务时，平台容易出现运营能力不足、资产成本过高等问题，有条件的企业可以搭建自己的平台，进行相关金融服务。

### 5.1.3. 养老住宅金融服务

一些房地产企业在健康类住宅产业中融入全周期、高保障的健康保险体系，为全年龄段的客户提供专属保险和养老财务规划。对老年人而言，这种服务模式解决了投资理财与保险服务需求；对企业而言，这些服务拓宽了企业的服务业务，还可以通过对销售养老产品所得的反馈数据进行深度分析、筛选与融合，进而提供最能满足老年人需求的金融保险产品。此外，还能将健康保险数据与医疗健康服务结合，开拓养老商业保险与养老服务紧密配合、互为支持的可持续发展模式。

## 5.2. 工程劳务服务

目前，我国有建筑工人5437万人，其中大部分是农民工，劳动关系处于弱势地位。在纠纷中，由于缺乏工作信息等有效记录，其权益难以得到保障。可预见，在这种情况下保护建筑工人权益的需求将会增加。对工人信息进行综合管理是解决这一问题的一种有前途的方法。

2018年11月，中华人民共和国住房和城乡建设部开始使用全国建筑工人管理服务信息平台。该平台对管理拖欠职工工资的失信企业行为起到了积极作用。然而，建筑工人在中国具有很强的流动性，他们的农民身份和工人身份不断转换。因此，在确保构建工人信息系统的一致性和精细化方面遇到了许多挑战。由于施工平台可以收集建筑

工人的各类信息，包括建筑产品信息、工作状态信息、工作评价信息等，有学者开发了记录建筑工人信息的区块链，由建筑工人和企业共同建立。此外，可以通过智能合约自动获取工人的施工质量记录和工资分配，形成可追溯、责任明确、制裁明确的管理模式。

## 5.3. 工程大数据服务

各类数字技术在工程建造服务化转型中的广泛运用将积累大量的工程数据，不仅包括工程实体建造和使用过程产生的数据，还涉及企业经营与管理数据。这些以工程为载体的工程大数据为大数据分析方法的应用提供了土壤，通过对数据的分析为工程实体的利益相关者提供增值服务，主要表现为大数据驱动的工程决策，包括行业治理、企业管理和施工管理。尽管工程大数据的益处很多，但中小型企业无法依靠自身实现大数据应用的全过程，即使对大型企业也是一种挑战。因为工程大数据应用涉及数据采集、数据存储、数据分析等环节，数据采集需要部署由智能感知设备组成的传感网络，数据存储需要购置专门的存储服务器，数据分析更需要专业技术人才。对中小型企业而言，投资工程大数据应用会占用企业在核心业务上的投入，购买第三方企业提供的大数据应用解决方案反而能让中小企业专注于自身核心竞争力。那么，对大数据应用的需求将催生专业的工程大数据服务，旨在为工程建造企业提供工程建造大数据应用相关的服务或集成解决方案。

从大数据应用流程看，专业企业可以提供面向工程大数据收集和存储的工程物联网服务和工程大数据分析服务。工程物联网服务旨在帮助工程建造企业建立数据收集的传感网络，包括传感设备的安装、数据传输网络的部署以及数据存储管理。例如，水泥行业已部署物联网以支持移动搅拌站[111]；混凝土行业也部署了物联网[112]。Xu等[101]提出利用基于云的物联网平台使中小型企业能够经济、灵活地运用物联网技术。工程大数据分析服务向工程建造企业提供大数据技术和专业知识，帮助企业实现不同的管理目标，如资源与废物优化、设施管理、能源管理与分析等[113]。此外，专业企业可以提供面向特定管理目标的工程大数据集成解决方案，既负责数据收集也完成数据分析，为管理决策提供支持。典型的例子是基于视频监控的现场安全管理方案[114]，通过安装在施工现场不同位置的闭路电视，经过对监控视频进行视觉分析，评估现场的安全状况，并对潜在的危险进行预警。

## 5.4. 工程智能设备服务

近年来，工程实体使用者越来越重视工程实体的智能

功能，催生了对智慧建筑（smart building）的需求。综合分析各种智慧建筑的定义可知，智慧建筑是一个集成建筑系统，旨在通过智能设备获取并利用关于环境以及使用者的信息与知识，提高建筑与使用者交互的自适应性，以满足能源效率、长寿命以及占用者的舒适度与满意度等方面的要求[115]。需要指出，作为信息感知与收集工具的智能设备是构建智慧建筑系统的基础，其需求势必会随着人们对智慧建筑越来越多的关注而大幅增长。这种增长不仅体现在数量上，更表现为对新型智能设备与技术的需要。

从目前研究来看，学术界与业界对智慧建筑的关注点主要集中在能源效率和健康保护两个方面，其中健康保护尤其关注老年人居住环境的健康监测与及时响应。从这两个方面出发可以发展出不同类型的工程智能设备服务，主要可以分为两类：居住相关的智能设备服务与建筑环境相关的智能设备服务[71,116]。其中，居住相关的智能设备包括图像传感器、红外传感器、无线电传感器、压力垫、光敏传感器、心率传感器等；建筑环境相关的传感设备包括空气温度传感器、CO<sub>2</sub>传感器、湿度传感器、热流体传感器、颗粒物（particulate matter, PM）传感器等。随着人们对居住或工作环境的要求不断变化，需要获取的信息也在变化，相应地需要研制新型传感设备。反过来，新型传感设备的出现也会刺激新的需求，两者相辅相成，相互促进发展。

## 6. 结论

服务化为工程建造转型升级提供了机遇，学者与从业者也积极探索了工程建造服务化的可能性，但仍然缺乏对工程建造服务化深入、系统性的认知。对此，本文从工程建造行业面临的问题出发，深入、全面地分析了工程建造服务化的动机、含义与内涵、实现方式及工程建造服务化对其他行业的影响。结合建造行业面临的问题，系统地建立了对工程建造服务化的认知框架。综合分析可以得出以下几方面的结论：首先，工程建造服务化所蕴含的价值增值方式与商业模式的变化是工程建造企业制定服务化转型路径的出发点，而运作模式的改变奠定了工程建造管理方式变革的基础；其次，价值共创、服务创新、网络化运作等方面的研究可以作为工程建造企业实现服务化转型的参考途径；最后，工程建造服务化催生的新业态为工程建造支持企业的发展提供了新思路，新业态的形成也将提升工程建造的发展质量，这样互相促进的关系有利于构建合作共赢的工程建造生态圈。

本文试图通过建立对工程建造服务化的系统性认知，

为工程建造行业的从业者实现服务化转型提供理论支撑。然而，本文仅是工程建造服务化研究的一个起点，还存在很多理论和实践上的问题需要学者投入更多的关注。在理论上，对工程建造服务化可能引起的工程建造管理变革及工程建造服务化蕴含的管理问题尚不清楚，需要学者结合制造服务化中存在的问题进行思考，并探索相应的解决方法。在实践方面，因为服务化转型意味着组织结构的变化，传统工程建造企业应该采取怎样的组织结构来推动企业的服务化转型是企业实现服务化转型面临的首要问题。此外，现有政策法规还无法与工程建造服务化所蕴含的新商业模式或运作模式相适应，比如通过平台进行工程建造服务交易尚未获得法律上的认可。因此，如何克服这样的限制推动工程建造服务化转型是一个很现实的问题。除了上述问题外，仍然存在其他问题需要学者更积极地去探索。希望本文的研究能够引起工程管理领域的学者对工程建造服务化的关注，并激发新的思想，努力实现工程建造服务化。

## 致谢

本工作得到了国家自然科学基金(71821001、71732001和72001131)的支持。感谢编辑和匿名审稿人对手稿早期版本的有益评论和建议。

## Compliance with ethics guidelines

Dian Liu, Hongwei Wang, Botao Zhong, and Lieyun Ding declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Overholt WH. China and the evolution of the world economy. *China Econ Rev* 2016;40:267–71.
- [2] Vandermerwe S, Rada J. Servitization of business: adding value by adding services. *Eur Manage J* 1988;6(4):314–24.
- [3] Raddats C, Baines T, Burton J, Story VM, Zolkiewski J. Motivations for servitization: the impact of product complexity. *Int J Oper Prod Manage* 2016; 36(5):572–91.
- [4] Raddats C, Kowalkowski C, Benedettini O, Burton J, Gebauer H. Servitization: a contemporary thematic review of four major research streams. *Ind Mark Manage* 2019;83:207–23.
- [5] Leiringer R, Bröchner J. Editorial: service-led construction projects. *Construct Manag Econ* 2010;28(11):1123–9.
- [6] Brady T, Davies A, Gann D. Can integrated solutions business models work in construction? *Build Res Inform* 2005;33(6):571–9.
- [7] Lind H, Borg L. Service-led construction: is it really the future? *Construct Manag Econ* 2010;28(11):1145–53.
- [8] Alderman N, Ivory C. Service-led projects: understanding the meta-project

- context. *Construct Manag Econ* 2010;28(11):1131–43.
- [9] Hartmann A, Davies A, Frederiksen L. Learning to deliver service-enhanced public infrastructure: balancing contractual and relational capabilities. *Construct Manag Econ* 2010;28(11):1165–75.
- [10] Robinson W, Chan P, Lau T. Finding new ways of creating value: a case study of servitization in construction. *Res Technol Manag* 2016;59(3):37–49.
- [11] van Oorschot J, Halman JIM, Hofman E. The continued adoption of housing systems in the Netherlands: a multiple case study. *J Constr Eng Manag Innov* 2019;2(4):167–90.
- [12] Hellström M, Wikström R, Gustafsson M, Luotola H. The value of project execution services: a problem and uncertainty perspective. *Construct Manag Econ* 2016;34(4–5):272–85.
- [13] Wang H, Liu D, Xie Y, Zhou H. Research on the mode of Internet Plus construction platform. *J Eng Manag* 2017;31(5):91–5. Chinese.
- [14] Wang H, Liu D. Is servitization of construction the inevitable choice of Internet Plus construction? *Front Eng Manag* 2017;4(2):229–30.
- [15] Koskela L. Application of the new production philosophy to construction. California: Stanford University; 1992.
- [16] Liu D, Wang H, Zhou H. Modeling of construction service. *J Eng Manag* 2017; 31:158–64.
- [17] Baines TS, Lightfoot HW, Benedettini O, Kay JM. The servitization of manufacturing: a review of literature and reflection on future challenges. *J Manuf Tech Manag* 2009;20(5):547–67.
- [18] Goedkoop MJ, van Halen CJG, te Riele HRM, Rommens PJM. Product service systems—ecological and economical basics [Internet]. Lisbon: Portal de Conhecimentos; [cited 2009 Mar 6]. Available from: <http://www.portaldeconhecimentos.org.br/index.php/por/Conteudo/Product-Service-Systems-Ecological-and-Economical-Basics>.
- [19] Baines TS, Lightfoot HW, Evans S, Neely A, Greenough R, Peppard J, et al. State-of-the-art in product-service systems. *Proc Inst Mech Eng, B J Eng Manuf* 2007;221(10):1543–52.
- [20] Beuren FH, Gomes Ferreira MG, Cauchick Miguel PA. Product-service systems: a literature review on integrated products and services. *J Clean Prod* 2013;47:222–31.
- [21] Sun L, Li G, Jiang Z, Zheng L, He Z. Service-embedded manufacturing: advanced manufacturing paradigm in 21st century. *China Mech Eng* 2007; 18(19):2307–12. Chinese.
- [22] Sun L, Gao J, Zhu C, Li G, He Z. Service-oriented manufacturing: a new product mode and manufacturing paradigm. *China Mech Eng* 2008;19:2600–4. Chinese.
- [23] Jiang ZZ, Feng G, Yi Z, Guo X. Service-oriented manufacturing: a literature review and future research directions. *Front Eng Manag.* (2021). <https://doi.org/10.1007/s42524-021-0171-3>
- [24] Lin W, Jiang H, Li N. A survey on the research of service-oriented manufacturing. *Ind Eng Manag* 2009;14:1–6.
- [25] Jiang Z, Li N, Wang L, Miao R. Operations management of service-oriented manufacturing. Beijing: Science Press; 2016.
- [26] Neely A. Exploring the financial consequences of the servitization of manufacturing. *Oper Manag Res* 2008;1(2):103–18.
- [27] Maloney WF. Construction product/service and customer satisfaction. *J Constr Eng Manag* 2002;128(6):522–9.
- [28] Alderman N, Ivory C, McLoughlin I, Vaughan R. Sense-making as a process within complex service-led projects. *Int J Proj Manag* 2005;23(5):380–5.
- [29] Hoezen M, van Rutten J, Voordijk H, Dewulf G. Towards better customized service-led contracts through the competitive dialogue procedure. *Construct Manag Econ* 2010;28(11):1177–86.
- [30] Razmdoost K, Mills G. Towards a service-led relationship in project-based firms. *Construct Manag Econ* 2016;34(4–5):317–34.
- [31] Straub AD. Competences of maintenance service suppliers servicing end-customers. *Construct Manag Econ* 2010;28(11):1187–95.
- [32] Jacobsson M, Roth P. Towards a shift in mindset: partnering projects as engagement platforms. *Construct Manag Econ* 2014;32(5):419–32.
- [33] Robinson W, Chan P. Servitization in construction: towards a focus on transitional routines. In: RaidenAB, Aboagye-NimoE, editors. Proceedings of the 30th Annual ARCOM Conference; 2014 Sep 1–3; Portsmouth, UK. Reading: Association of Researchers in Construction Management. 2014. p. 905–14.
- [34] Robinson WG, Chan PW, Lau T. Sensors and sensibility: examining the role of technological features in servitizing construction towards greater sustainability. *Construct Manag Econ* 2016;34(1):4–20.
- [35] Smyth H, Razmdoost K, Mills GRW. Service innovation through linking design, construction and asset management. *Built Env Proj Asset Manag* 2019; 9(1):80–6.
- [36] Smyth H, Duryan M, Kusuma I. Service design for marketing in construction: tactical implementation in the “business development management.” *Built Env Proj Asset Manag* 2019;9(1):87–99.
- [37] Fuentes MEG. Co-creation and co-destruction of experiential value: a service perspective in projects. *Built Env Proj Asset Manag* 2019;9(1):100–17.
- [38] Lusch RF, Vargo SL, O’Brien M. Competing through service: insights from service-dominant logic. *J Retailing* 2007;83(1):5–18.
- [39] Gao X, Pishdad-Bozorgi P. BIM-enabled facilities operation and maintenance: a review. *Adv Eng Inform* 2019;39:227–47.
- [40] Zhang W, Banerji S. Challenges of servitization: a systematic literature review. *Ind Mark Manage* 2017;65:217–27.
- [41] Baines T, Ziaee Bigdeli A, Sousa R, Schroeder A. Framing the servitization transformation process: a model to understand and facilitate the servitization journey. *Int J Prod Econ* 2020;221:107463.
- [42] Bowman C, Ambrosini V. Value creation versus value capture: towards a coherent definition of value in strategy. *Br J Manage* 2000;11(1):1–15.
- [43] Vargo SL, Maglio PP, Akaka MA. On value and value co-creation: a service systems and service logic perspective. *Eur Manage J* 2008;26(3):145–52.
- [44] Tao F, Qi Q. New IT driven service-oriented smart manufacturing: framework and characteristics. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst* 2019;49(1):81–91.
- [45] Albert H, Arnold M, Li F. Illuminating the dark spaces of healthcare with ambient intelligence. *Nature* 2020;585(7824):193–202.
- [46] Du M, Chen Q, Xiao J, Yang H, Ma X. Supply chain finance innovation using blockchain. *IEEE Trans Eng Manag* 2020;67(4):1045–58.
- [47] Lipper L, Thornton P, Campbell BM, Baedeker T, Braimah A, Bwalya M, et al. Climate-smart agriculture for food security. *Nat Clim Chang* 2014; 4(12): 1068–72.
- [48] Woodhead R, Stephenson P, Morrey D. Digital construction: from point solutions to IoT ecosystem. *Autom Construct* 2018;93:35–46.
- [49] Ding Z, Liu S, Liao L, Zhang L. A digital construction framework integrating building information modeling and reverse engineering technologies for renovation projects. *Autom Construct* 2019;102:45–58.
- [50] Klinec R, Turk Ž. Construction 4.0—digital transformation of one of the oldest industries. *Econ Bus Rev* 2019;21(3):393–410.
- [51] Lerch C, Gotsch M. Digitalized product-service systems in manufacturing firms: a case study analysis. *Res Technol Manag* 2015;58(5):45–52.
- [52] Grubic T. Remote monitoring technology and servitization: exploring the relationship. *Comput Ind* 2018;100:148–58.
- [53] Belvedere V, Grando A. ICT-enabled time performance: an investigation of value creation mechanisms. *Prod Plann Contr* 2016;28(1):75–88.
- [54] Coreynen W, Matthyssens P, Van Bockhaven W. Boosting servitization through digitization: pathways and dynamic resource configurations for manufacturers. *Ind Mark Manage* 2017;60:42–53.
- [55] Vendrell-Herrero F, Bustinza OF, Parry G, Georgantzis N. Servitization, digitization and supply chain interdependency. *Ind Mark Manage* 2017; 60: 69–81.
- [56] Paschou T, Rapaccini M, Adrodegari F, Saccani N. Digital servitization in manufacturing: a systematic literature review and research agenda. *Ind Mark Manage* 2020;89:278–92.
- [57] Wang K, Jiang Z, Peng B, Jing H. Servitization of manufacturing in the new ICTs era: a survey on operations management. *Front Eng Manag* 2021; 8(2): 223–35.
- [58] Sawhney A, Riley M, Irizarry J. Construction 4.0: introduction and overview. In: Sawhney A, Riley M, Irizarry J. *Construction 4.0*. London: Routledge; 2020. p. 3–22.
- [59] Deng T, Zhang K, Shen ZJ. A systematic review of a digital twin city: a new pattern of urban governance toward smart cities. *J Manag Sci Eng* 2021;6(2): 125–34.
- [60] Payne AF, Storbacka K, Frow P. Managing the co-creation of value. *J Acad Mark Sci* 2008;36(1):83–96.
- [61] Sjödin D, Parida V, Kohtamäki M, Wincent J. An agile co-creation process for digital servitization: a micro-service innovation approach. *J Bus Res* 2020;112: 478–91.
- [62] Lenka S, Parida V, Wincent J. Digitalization capabilities as enablers of value co-creation in servitizing firms. *Psychol Mark* 2017;34(1):92–100.
- [63] Azhar S. Building information modeling (BIM): trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. *Leadership Manage Eng* 2011;11(3):241–52.
- [64] Roupé M, Johansson M, Maftai L, Lundstedt R, Viklund-Tallgren M. Virtual collaborative design environment: supporting seamless integration of multitouch table and immersive VR. *J Constr Eng Manag* 2020; 146(12): 04020132.

- [65] Lin YC, Chen YP, Yien HW, Huang CY, Su YC. Integrated BIM, game engine and VR technologies for healthcare design: a case study in cancer hospital. *Adv Eng Inform* 2018;36:130–45.
- [66] Motamedi A, Wang Z, Yabuki N, Fukuda T, Michikawa T. Signage visibility analysis and optimization system using BIM-enabled virtual reality (VR) environments. *Adv Eng Inform* 2017;32:248–62.
- [67] Xu J, Lu W, Xue F, Chen K. ‘Cognitive facility management’: definition, system architecture, and example scenario. *Autom Construct* 2019;107:102922.
- [68] Tushar W, Wijerathne N, Li WT, Yuen C, Poor HV, Saha TK, et al. Internet of things for green building management: disruptive innovations through low-cost sensor technology and artificial intelligence. *IEEE Signal Process Mag* 2018; 35(5):100–10.
- [69] Balvedi BF, Ghisi E, Lamberts R. A review of occupant behaviour in residential buildings. *Energy Build* 2018;174:495–505.
- [70] Barthelmes VM, Li R, Andersen RK, Bahnfleth W, Corngati SP, Rode C. Profiling occupant behaviour in Danish dwellings using time use survey data. *Energy Build* 2018;177:329–40.
- [71] Furszyfer Del Rio DD, Sovacool BK, Bergman N, Makuch KE. Critically reviewing smart home technology applications and business models in Europe. *Energy Policy* 2020;144:111631.
- [72] Rachinger M, Rauter R, Müller C, Vorraber W, Schirgi E. Digitalization and its influence on business model innovation. *J Manuf Tech Manag* 2019; 30(8): 1143–60.
- [73] Kohtamäki M, Parida V, Oghazi P, Gebauer H, Baines T. Digital servitization business models in ecosystems: a theory of the firm. *J Bus Res* 2019; 104: 380–92.
- [74] Zhang S, Pan F, Wang C, Sun Y, Wang H. BIM-based collaboration platform for the management of EPC projects in hydropower engineering. *J Constr Eng Manage* 2017;143(12):04017087.
- [75] Yan H, Yang N, Peng Y, Ren Y. Data mining in the construction industry: present status, opportunities, and future trends. *Autom Construct* 2020; 119: 103331.
- [76] Pan Y, Zhang L. Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: a critical review and future trends. *Autom Construct* 2021; 122: 103517.
- [77] Al Qady M, Kandil A. Concept relation extraction from construction documents using natural language processing. *J Constr Eng Manage* 2010;136(3):294–302.
- [78] Ur-Rahman N, Harding JA. Textual data mining for industrial knowledge management and text classification: a business oriented approach. *Expert Syst Appl* 2012;39(5):4729–39.
- [79] Chen HM, Chang KC, Lin TH. A cloud-based system framework for performing online viewing, storage, and analysis on big data of massive BIMs. *Autom Construct* 2016;71:34–48.
- [80] Zheng J. Analysis of collaborative design and construction collaborative mechanism of cloud BIM platform construction project based on green computing technology. *J Intell Fuzzy Syst* 2018;34(2):819–29.
- [81] Bello SA, Oyedele LO, Akinade OO, Bilal M, Davila Delgado JM, Akanbi LA, et al. Cloud computing in construction industry: use cases, benefits and challenges. *Autom Construct* 2020;122:103441.
- [82] Du J, Shi Y, Zou Z, Zhao D. CoVR: cloud-based multiuser virtual reality headset system for project communication of remote users. *J Constr Eng Manage* 2018;144(2):04017109.
- [83] Allen BJ, Chandrasekaran D, Basuroy S. Design crowdsourcing: the impact on new product performance of sourcing design solutions from the “crowd”. *J Mark* 2018;82(2):106–23.
- [84] Shergadwala M, Forbes H, Schaefer D, Panchal JH. Challenges and research directions in crowdsourcing for engineering design: an interview study with industry professionals. *IEEE Trans Eng Manage* 2020 May:1–13.
- [85] El-Diraby T, Krijnen T, Papagelis M. BIM-based collaborative design and socio-technical analytics of green buildings. *Autom Construct* 2017;82:59–74.
- [86] Paolini A, Kollmannsberger S, Rank E. Additive manufacturing in construction: a review on processes, applications, and digital planning methods. *Addit Manuf* 2019;30:100894.
- [87] Delgado Camacho D, Clayton P, O’ Brien WJ, Seepersad C, Juenger M, Ferron R, et al. Applications of additive manufacturing in the construction industry—a forward-looking review. *Autom Construct* 2018;89:110–9.
- [88] Lim S, Buswell RA, Le TT, Austin SA, Gibb AGF, Thorpe T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Autom Construct* 2012;21: 262–8.
- [89] Davila Delgado JM, Oyedele L, Ajayi A, Akanbi L, Akinade O, Bilal M, et al. Robotics and automated systems in construction: understanding industry-specific challenges for adoption. *J Build Eng* 2019;26:100868.
- [90] Li H, Luo X, Skitmore M. Intelligent hoisting with car-like mobile robots. *J Constr Eng Manage* 2020;146(12):04020136.
- [91] Melenbrink N, Werfel J, Menges A. On-site autonomous construction robots: towards unsupervised building. *Autom Construct* 2020;119:103312.
- [92] Niu Y, Lu W, Chen K, Huang GG, Anumba C. Smart construction objects. *J Comput Civ Eng* 2016;30(4):04015070.
- [93] Kochovski P, Stankovski V. Supporting smart construction with dependable edge computing infrastructures and applications. *Autom Construct* 2018; 85: 182–92.
- [94] Tam VWY, Tam CM, Zeng SX, Ng WCY. Towards adoption of prefabrication in construction. *Build Environ* 2007;42(10):3642–54.
- [95] www.mckinsey.com [Internet]. Chicago: McKinsey & Company; 2019 [cited 2021 Sep 30]. Available from: <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/modular-construction-from-projects-to-products>.
- [96] Cheng JCP, Chen W, Chen K, Wang Q. Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms. *Autom Construct* 2020;112:103087.
- [97] Liu S, Schiavon S, Das HP, Jin M, Spanos CJ. Personal thermal comfort models with wearable sensors. *Build Environ* 2019;162:106281.
- [98] Li D, Menassa CC, Kamat VR. Non-intrusive interpretation of human thermal comfort through analysis of facial infrared thermography. *Energy Build* 2018; 176:246–61.
- [99] Jung W, Jazizadeh F. Human-in-the-loop HVAC operations: a quantitative review on occupancy, comfort, and energy-efficiency dimensions. *Appl Energy* 2019;239:1471–508.
- [100] Kim J, Zhou Y, Schiavon S, Raftery P, Brager G. Personal comfort models: predicting individuals’ thermal preference using occupant heating and cooling behavior and machine learning. *Build Environ* 2018;129:96–106.
- [101] Xu G, Li M, Chen CH, Wei Y. Cloud asset-enabled integrated IoT platform for lean prefabricated construction. *Autom Construct* 2018; 93:123–34.
- [102] Grilo A, Jardim-Goncalves R. Cloud-Marketplaces: Distributed e-procurement for the AEC sector. *Adv Eng Informatics* 2013; 27:160–72.
- [103] Jardim-Goncalves R, Grilo A. SOA4BIM: Putting the building and construction industry in the Single European Information Space. *Autom Constr* 2010; 19: 388–97.
- [104] Fan Y, Huang C, Wang Y, Zhang L. Architecture and operational mechanisms of networked manufacturing integrated platform. *Int J Prod Res* 2005;43(12): 2615–29.
- [105] Boje C, Guerriero A, Kubicki S, Rezguy Y. Towards a semantic construction digital twin: directions for future research. *Autom Construct* 2020; 114:103179.
- [106] Tao F, Qi Q. Make more digital twins. *Nature* 2019;573(7775):490–1.
- [107] Ma Z, Cai S, Mao N, Yang Q, Feng J, Wang P. Construction quality management based on a collaborative system using BIM and indoor positioning. *Autom Construct* 2018;92:35–45.
- [108] Xu Q, Chong HY, Liao PC. Collaborative information integration for construction safety monitoring. *Autom Construct* 2019;102:120–34.
- [109] Guofeng M, Jianyao J, Shan J, Zhijiang W. Incentives and contract design for knowledge sharing in construction joint ventures. *Autom Construct* 2020;119: 103343.
- [110] Liu Z, Wang H, Li H. Model of equipment sharing between contractors on construction projects. *J Constr Eng Manage* 2018;144(6):04018039.
- [111] McNeil P. Secure IoT deployment in the cement industry. In: AkhtarSS, KlineC, KlineJ, KeiserA, PoulsenK, FontaP, et al., editors. 2017 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference; 2017 May 21–25; Calgary, Canada. New York City: Curran Associates; 2017.
- [112] Rasmussen NV, Beliatis MJ. IoT based digitalization and servitization of construction equipment in concrete industry. In: Baldini G, Presser M, Skarmeta AF, Tropea G, Detti A, Nakazato H, et al. editors. 2019 Global IoT Summit (GIoTS); 2019 Jun 17–21; Aarhus, Denmark. New York City: Curran Associates; 2019.
- [113] Bilal M, Oyedele LO, Qadir J, Munir K, Ajayi SO, Akinade OO, et al. Big data in the construction industry: a review of present status, opportunities, and future trends. *Adv Eng Inform* 2016;30(3):500–21.
- [114] Fang W, Ding L, Love PED, Luo H, Li H, Peña-Mora F, et al. Computer vision applications in construction safety assurance. *Autom Construct* 2020; 110: 103013.
- [115] Buckman AH, Mayfield M, Beck SBM. What is a smart building? *Smart Sustain Built Environ* 2014;3(2):92–109.
- [116] Dong B, Prakash V, Feng F, O’Neill Z. A review of smart building sensing system for better indoor environment control. *Energy Build* 2019;199:29–46.