

先进制造业的典型生产模式对于建筑设计平台架构的启示

The Enlightenment of the Typical Production Mode of Advanced Manufacturing to the Framework of Architectural Design Platform

项星玮 | XIANG Xingwei 林再国 | LIN Zaiguo 张 烨 | ZHANG Ye
王浩楠 | WANG Haonan 刘 翠 | LIU Cui

摘要: 建筑设计行业对于自身转型升级的需求催生了在行业中建立建筑设计平台的诉求。建立建筑设计平台的核心任务是实现建筑设计平台架构,这种平台架构可以将制造业平台作为参照主体,将先进制造业的生产模式作为参照内容。本文围绕建筑设计平台架构这一主题,以先进制造业的生产模式为借鉴对象,通过解析先进制造业的四种典型生产模式,从数字化思维、设计资源信息化、设计流程再造、模型虚拟仿真等方面探讨了这四种模式对于建筑设计平台架构的启示,为建筑设计平台的架构以及建筑设计行业的转型升级提供关于先进制造业的跨学科思路和视野。

关键词: 建筑设计平台、数字化思维、信息化、信息流协同、数字孪生

Abstract: The demand of architectural design industry for its own transformation and upgrading has given rise to the demand for establishing architectural design platform in this industry. The core task of establishing design platform is to realize the framework of architectural design platform, which can take the manufacturing platform as the main body of reference and the production mode of advanced manufacturing as the reference content. Focusing on the theme of the framework of architectural design platform, this paper takes the production mode of advanced manufacturing as the reference object, analyzes four typical production modes of advanced manufacturing, and discusses the enlightenment of these four modes for the framework of architectural design platform from digital thinking, design resource informatization, design process reengineering, and model simulation, so as to provide interdisciplinary ideas and perspectives related to the advanced manufacturing for the framework of the architectural design platform and the transformation and upgrading of the architectural design industry.

Keywords: Architectural design platform, Digital thinking, Informatization, Information flow coordination, Digital twin technology

作者:

项星玮, 浙江大学机械工程学院, 浙江大学平衡建筑研究中心, 浙江省先进制造技术重点研究实验室(浙江大学), 流体动力与机电系统国家重点实验室(浙江大学), 博士后;

林再国, 浙江大学建筑设计研究院有限公司;

张烨(通讯作者), 天津大学建筑学院, 副教授;

王浩楠, 浙江大学机械工程学院, 工业工程研究所, 硕士研究生;

刘翠, 浙江大学建筑工程学院, 副教授。

浙江省博士后科研项目(ZJ2020136); 天津市自然科青年项目(19JCQJC07300); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51508497); 浙江省自然科学基金面上项目(LY15E080004)

DOI: 10.12285/jzs.20210401004

一、引言

随着信息技术、互联网技术应用的深入, 建筑业产业链中的多个行业出现了生产方式、生产资料组织方式、服务方式的创新和变革。这些创新和变革直接或间接地对建筑设计行业现有的建筑设计模式提出了挑战, 从建筑设计行业的外部引发了优化、改善现有的建筑设计模式的需求。而建筑设计行业面临的建筑设计项目完成度不

高、建筑设计与建造相分离、建筑设计与建造衔接较弱等问题, 则从建筑设计行业的内部凸显了上述需求存在的合理性以及解决上述需求的必要性。由于信息技术、互联网技术应用所带来的建筑业变化本质上与生产力的发展、生产资料的配置相关, 因此, 有助于提高生产效率、最大程度发挥资源集聚效应且能够积极影响产业链、供应链、价值链重塑的平台载体(platform)成为解决上述需求的一种可行选择。与之相对应的平台形

式即为建筑设计平台。事实上，在平台经济的带动下，在现有的建筑设计模式存在诸多发展瓶颈的制约下，建立建筑设计平台已经成为一些设计院寻求自身转型升级的诉求。

建立建筑设计平台的核心任务是实现建筑设计平台架构，而建筑设计平台架构首先要解决的是选取合适的参照主体。由于建筑设计平台以建筑设计者（生产者）为用户，以相关建筑设计活动（生产活动）为应用场景，强调对建筑设计方式、建筑设计流程等的改造，因此它区别于消费型互联网主导下的平台形式（例如以电子信息或服务信息作为商品配置的服务平台），更接近于产业型互联网主导下的具有物质生产性质的平台形式。对于这种平台形式，其平台架构的参照主体可选取制造业平台。考虑到传统制造业正在向以智能制造为代表的先进制造业^[1]转型升级，因此更准确地说，平台架构的参照主体应为具有先进制造业特征的制造业平台。选

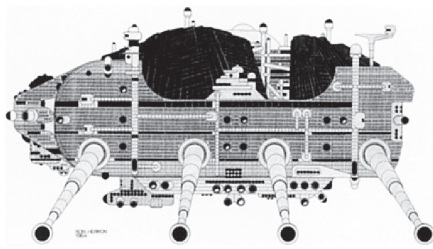


图1：电讯派提出的可变动的“机器”：行走城市设计方案



图2：新陈代谢派的更可更新的“机器”：东京湾规划模型，1960年

取这种平台形式的主要原因概述如下：一是考虑参考对象的同源关系，这是指基于建筑设计、建造、智能制造三者的相互联系，将智能建造发展的参考对象也作为建筑设计行业发展的参考对象；二是基于建筑设计行业与制造业的学科渊源，这是指不同历史时期，建筑设计行业对于制造业思想、方法、技术等学习和借鉴，典型实例包括柯布西耶的“机器美学”、建筑电讯派（Archigram）的可变动的“机器”（图1）、新陈代谢派（Metabolism）的可更新的“机器”（图2）；三是制造业平台更为成熟，这是指相较于智能建造平台，制造业平台不但在建立平台的理论、方法、技术方面更加完善，而且在平台的实践应用方面更具深度。

二、先进制造业的典型生产模式解析

为了获得建筑设计平台架构更为具体的参考，需要细化出参照主体——具有先进制造业特征的制造业平台——的参照内容。考虑到先进制造业的生产模式是构成参照主体的重要因素，笔者将参照内容细分到先进制造业的生产模式的维度。在此基础上，结合建筑设计行业的建筑设计模式特征，综合考虑建筑设计行业与先进制造业的生产模式的相关性，选取先进制造业的四种典型生产模式加以分析。这四种典型生产模式分别为信息化生产模式、协同化生产模式、数字孪生生产模式、平台化生产模式。

1. 信息化生产模式

第三次工业革命之后，制造业开始与信息技术紧密结合。生产制造时所用的机器将不只是加工制造的终端，也可以是储存、输出、感知信息的设施，或是传递信息的媒介。这种变化既增强了制造业处理复杂生产问题的能力，也为实体形态的流水线增添了看不见的信息流，从而使整个生产制造呈现为信息化的样式。

信息化生产模式强调生产制造全流程信息化，涵盖设计、制造、采购、销售在内的所有环节。由于本文的论述主题集中于建筑设计领域，因此主要阐述设计环节的信息化。设计环节是产品生产制造的上游环节，信息化生产模式以该环节的信息化为起点。在设计环节，为满足制造环节的精度、效率要求，数字化模型不止需要提供较低层次的几何信息，还需要提供加工工艺、材料性能、加工物料等较高层次的信息。如果设计环节可以充分满足制造环节的各种信息需求，那么设计和制造就有可能形成一体，从而有效提高产品质量，提升设计和制造的效率，节省生产、制造成本。除了模型之外，设计、制造用到的文本（例如规范）、图纸（例如零件图）、经验、案例等知识也是重要的信息化内容，需要将其梳理、整合并转化成不同类型的数据库，方便知识的查询、检索、重用，以提升设计环节的整体信息化水平。

2. 协同化生产模式

当代，制造业的协同是一种伴随着高度信息化的协同，涉及各个生产制造环节以及产业链与供应链的联动，关联设计、制造、装配、物料、人力、物流等生产制造事项。制造业协同化生产的实施依赖于具有协同功能的系统的建立以及系统与系统之间的高效交互。这里所指的系统主要为影响制造业协同化生产的三个重要系统，即 PDM（Product Data Management）系统、ERP（Enterprise Resource Planning）系统、MES（Manufacturing Execution System）系统。

PDM 系统（表1）以管理者的身份对各种工程数据和流程进行管理（图3），包括 CAD 文件、工程变更文件（例如修改后的设计模型）、审批文件、工作流程等。其中，工作流程涉及在正常状态下的运行、维护、控制以及在异常状态下的响应和反馈。PDM 系统有助于促成设计部门组织内部的协同。例如，当设计图纸、模型等出现变更时，PDM 系统会及时将变更信息通知所有设计人员，避免产生多余的工

作量, 保证产品信息的一致性; 当需要不同专业的设计人员参与设计时, PDM 系统能够基于可视化的工作流程, 及时提醒设计人员参与设计, 避免设计工作的延误。除了查询、检索、维护、管理产品信息之外, PDM 系统还可以输出零件族信息、产品结构信息 (例如 BOM^[2])、产品配置信息。在产品结构信息方面, 通过对产品结构信息中的 BOM 进行导入、转换等操作, 可以实现 PDM 系统与 ERP 系统的集成。

ERP 系统 (表 1) 关注产品生产过程中的信息, 现已成为企业信息化不可或缺的组成部分。ERP 系统可以向 PDM 提供客户设计需求、设计任务书、变更请求、设备状态等信息, 为产品设计提供设计之外的业务管理信息。PDM 系统与 ERP 系统的集成有助于实现设计信息与工艺信息的相互转换和传递, 减少设计与制造的冲突, 提升设计方案的可制造性, 加快产品的设计、生产进度, 从而促进组织外部 (设计部门与管理部门、制造部门) 的协同。

ERP 系统产生的物料清单、产品图样等信息将传递给 MES 系统, 以实现产品在车间现场的生产制造。MES 系统 (表 1) 处理的信息主要为各种生产制造设备使用过程中产生的信息 (例如物料加工信息、设备状态信息、零件质量信息) 以及设备与设备之间传输的信息。得益于设备的自

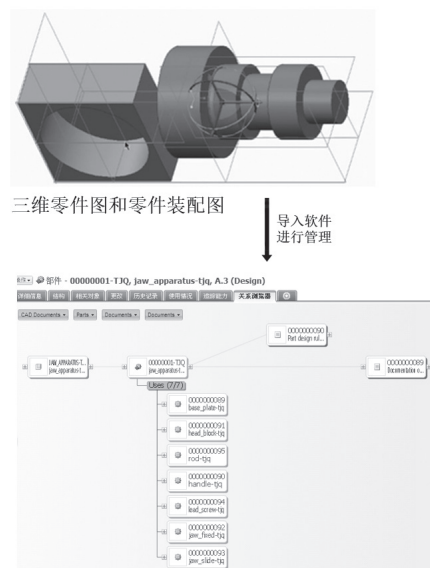


图 3: 通过 PDM 软件 WindChill 管理工程数据

动化、工业互联网技术的发展以及物联网技术的应用, MES 系统实现了各种生产数据的自动采集和实时化的监控、传输、反馈。这不仅使得信息化进入到了制造业的底层, 也使得产品的设计、业务管理、制造执行三者形成可联动、可追溯的关联机制, 为产品外观、功能、质量等的持续改进提供依据和动力。

当上述三个系统彼此打通时, 制造行业内的信息流传递将变得通畅、有序, 设计、管理、制造时出现的变更, 制造时出现的异常等, 都能够获得迅速响应和解决, 协同化生产模式将得以实现 (图 4)。

3. 数字孪生生产模式

在信息技术的支撑下, 制造业中的设备、车间、人员、环境等都可以有一个与之特征、行为、性能等完全对应和一致的数字虚体。这种数字虚体称为“数字孪生体” (Digital Twin), 它不仅具备现实世

界中物理实体的几何特性 (例如形状、尺寸), 也具备物理实体的多种物理特性 (例如材料弹性、设备动力学、设备热力学、设备性能衰减) 和监测数据能力 (通过实时传感获取), 并与物理实体存在数据和信息连接。与数字孪生体相对应的技术、过程和方法称为“数字孪生” (Digital Twin Technology)。近年来, 数字孪生的研究和应用逐步扩展到包括产品设计、设备、车间、工艺规划、物流、装配等在内的制造业的各个方面。

数字孪生的实施需要使用相应的虚拟仿真模型, 例如产品设计方面的产品模型、设备方面的虚拟样机模型、车间方面的整线仿真模型。构建虚拟仿真模型的第一个步骤通常为建立几何信息模型, 一般由具备 MBD 技术的 3D 建模软件 (例如 SolidWorks、UG、CATIA) 完成。几何信息模型创建完成之后, 需要加入非几何信息 (表 2), 以提升虚拟仿真模型的拟实度。为了确保虚拟仿真模型具有对物理实体的

PDM、ERP、MES 三个系统的概况

表 1

英文简称	中文名称	系统来源	面向的部门	主要用途	作用
PDM	产品数据管理	1980 年代的工程设计	制造企业的设计部门	管理产品各个零部件从材料到成品的过程中的设计数据和制造数据	将产品设计方案变得合理化和可实施
ERP	企业资源计划系统	1960 年代的制造计划	制造企业的管理部门	管理企业的物流、采购、财务等	为产品的生产制造提供业务管理方面的信息保障
MES	制造执行系统	1990 年代初美国先进制造研究协会 (Advanced Manufacturing Research) 提出的概念	制造企业的生产制造车间	管理产品的整个生产现场作业, 包括制造任务派发、生产执行状况监视、产品质量控制等	为产品的生产制造提供底层的控制和管理体系

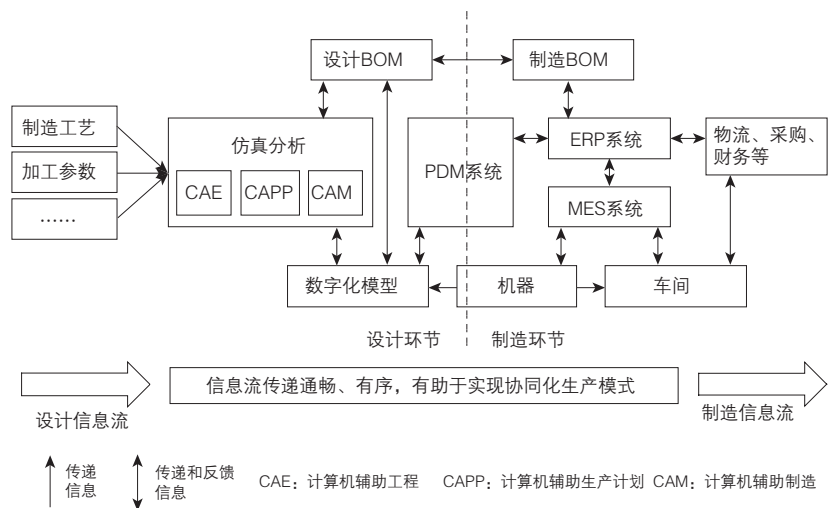


图 4: 适应协同化生产模式的三个系统架构关系示意图

超高拟实度，在加入非几何信息的过程中，可以采用循环迭代的方式逐一完善模型的各个细节。加入非几何信息之后，需要检验模型的精度。以制造设备为例，其常见的检验方法为：对现实中的设备进行实际运行实验；对照实验结果，修改模型并调整相关参数。为了实现虚拟仿真模型与物理实体的虚实映射，需要使虚拟仿真模型获得物理实体运行时的场景数据，包括来自MES系统的生产制造数据、来自传感器的设备状态数据等。在此基础上，通过选择相关算法，虚拟仿真模型可以实现与数据的匹配和融合，并进一步实现虚拟仿真模型对于物理实体的控制。^[3]

数字孪生提供了预测物理实体未来发展状况的场景和途径，增加了制造业不同要素、不同环节在虚拟空间中进行整合的可能性（图5），为制造业带来了诸多新的转变。当前，数字孪生在飞行器的设计和制造、工厂设备的智能健康管理等方面都有了具体应用案例。

4. 平台化生产模式

商业领域与社会组织中出现的各种平台（platform）使得“平台化”（Platformization）逐渐成为术语。平台化被视为一种类似于泰勒制、福特制的组织原则，具有特定的结构，基于一定的规则运作，能够集聚、扩展、引导和协调多种元素。制造业的平台化生产模式反映了制造业按照平台的架构方式进行资源配置的逻辑和方法。当前，随着信息技术的发展，制造业的平台化生产模式趋于整合制造企业内外的所有资源，包括生产性活动、基础设施、人力资源等，形成一种系统化的全方位开放性的平台生态系统。

随着制造业的平台化，制造业出现了诸多变革。以平台生态系统为例，其常见的架构如图所示（图6）。通过相应的平台架构逻辑和信息技术的支撑，这种平台化生产模式能够将前述所提的信息化生产模式、协同化生产模式、数字孪生生产模式、

从原先零散分布的“点”“线”整合成有层次的“面”，即一个有序的整体，并由统一的信息平台终端负责指挥调度。由于信息流在平台生态系统中的快速流转，前述三种生产模式中的各种要素将从原来的线性联系转变为环环相扣的网状联系；而前述三种生产模式在各自对应的制造业领域实现的量变和局部的质变，也将转变为制造业相关领域整体的质变。总体来看，这种平台化生产模式不仅能够实现制造业内外各个要素纵向、横向的一体化集成，也能够实现设计—制造—服务的一体化运作。在实践层面，典型的平台生态系统包括海尔的卡奥斯、西门子的MindSphere等。

三、源于典型生产模式的平台架构启示

作为构成参照主体——具有先进制造业特征的制造业平台——的重要因素，先进制造业的上述四种典型生产模式既连接着制造业的过去，也指向制造业的当下和未来。由于学科差异，上述四种典型生产模式虽然难以直接用于建筑设计平台架构，但是可以为提供有益的启示。从某种程度上说，这些启示可以视为对先进制造业的理论、方法等的一种“建筑化”转译和诠释。

1. 重视基于“机器”的数字化思维方式

先进制造业的典型生产模式得以实现的基础不只在于制造业的理论、方法、技术，还包括制造业的思维方式。这种思维方式是一种基于“机器”的数字化思维方式，贯穿于典型生产模式运行的始终。

对于建筑设计平台架构而言，需要从平台架构的全局层面重视基于“机器”的数字化思维方式。基于“机器”的数字化思维方式是随着信息技术在制造业的应用以及包括设备、系统在内的各类机器对制造者的行为形成限制、辅助、协作等关系的过程中而产生的。这种思维方式的根本特征由“机器”这种制造业开展生产制造

几何信息模型创建后需要加入的非几何信息 表 2

类别	加入的非几何信息
产品设计方面	产品制造信息（例如材料明细）、产品工艺信息（例如工艺BOM）、产品制造过程信息（例如制造BOM）、产品报废/回收信息等
设备方面	设备的动力学信息（例如阻尼、弹性形变）、设备性能衰减信息等
车间方面	设备信息、生产线加工运动信息、产能信息、人员分布信息等

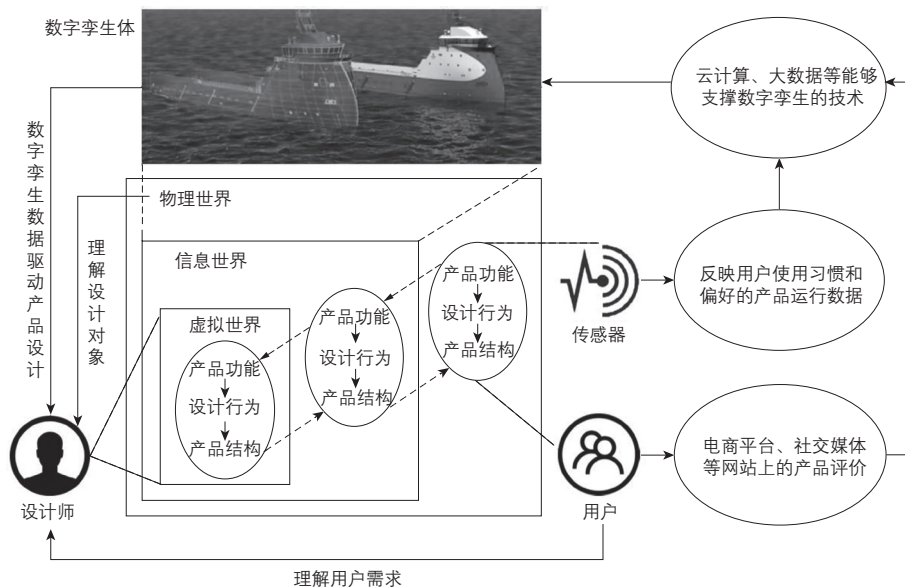


图5：数字孪生在产品中的作用

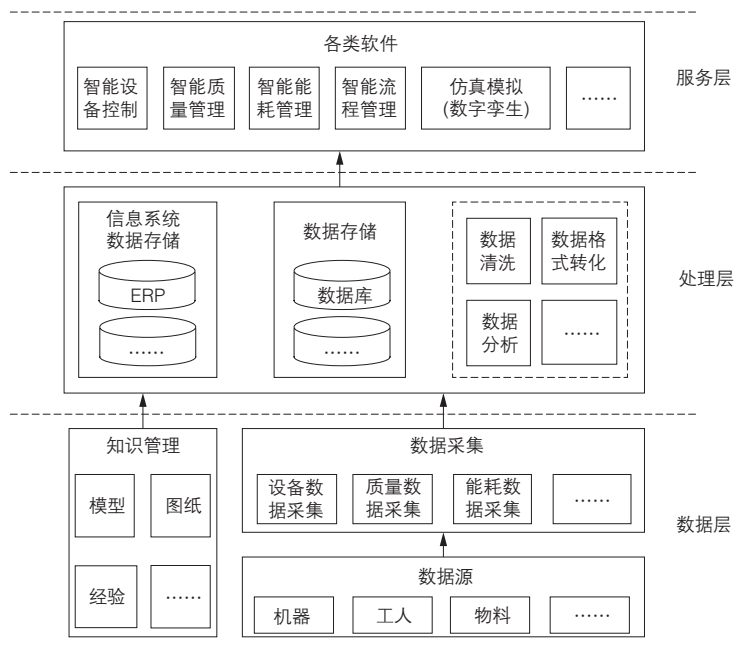


图6: 制造业的平台生态系统常见的架构

所不可或缺的要害决定，思维方式中蕴含了一整套用于制造业信息流处理的较为明确的成熟的方法、技术，体现为生产制造过程中不同环节之间信息流传递的流畅性、清晰性、完备性。而建筑设计行业的数字化思维方式，虽然也是随着信息技术的应用而产生，但是由于设计者的设计行为较少受限于建造设备等各类机器，加上建筑本身具有自由的人文艺术属性，因此这种数字化思维方式的整个运转过程显得较为模糊，缺少方法、技术以及各种细节要素的支撑，体现为设计与建造之间的信息传递不够流畅、不够完备，容易出现信息流被阻断或信息失真的情况。考虑到建筑设计平台不只由软件系统组成，还关联设计平台外部群体中的用于构件生产、结构建造的硬件设备，在设计平台具备信息高效、精确传递能力的同时，也对设计者的设计行为提出了“适应”各类机器的潜在要求、对设计成果提出质量、标准等方面的“限定”，因而在实现平台架构的过程中有必要转变或者在一定程度上摒弃建筑业的数字化思维方式，转而重视基于“机器”的数字化思维方式，并使之成为支撑平台架构的基本思维方式和基本思维逻辑。

2. 从多个层面实现建筑设计环节的信息化

信息化生产模式涉及制造业宏观、中观、微观三个层面的信息化。宏观层面的信息化主要为制造业产业链、供应链的信息化；中观层面的信息化主要为生产制造流程的信息化；微观层面的信息化主要为设计、制造、采购、物流等不同环节的信息化，包括不同环节所包含的各种要素的信息化。总体上看，信息化生产模式并不着眼于制造业某个局部的信息化，而是考虑制造业信息化的整体性，注重将微观层面的信息化与中观层面、宏观层面的信息化相互关联，相互交融，形成一个“点、线、面”相互作用的信息整体。

由于建筑设计平台的架构围绕建筑设计环节进行，因此建筑设计平台的信息化以建筑设计环节的信息化为核心。对于建筑设计平台架构而言，建筑设计环节不应只是关注某种方法或技术所带来的某个设计阶段的信息化，而是需要像信息化生产模式那样具备行业信息化的整体性视野，从多个层面实现建筑设计环节的信息化。在微观层面，建筑设计环节可以借鉴制造业设计环节的信息化方式，不仅以设计模

型为对象，对其运用软件方面的信息化方法和技术，也以文本、图纸、经验、设计案例等为对象，对其运用知识方面的信息化方法（例如知识工程方法）和技术（例如本体技术），从纵向（建筑设计环节的內部）丰富信息化方法和技术运用种类，促成更多建筑设计要素的信息化。在中观层面，建筑设计环节可以考虑将对接构件生产、建造、运维等环节所用到的数据、知识、经验、文档等进行信息化，从横向（建筑设计环节的外部）加强建筑设计环节与其他环节之间的联系和管理，以利于“设计-建造”“设计-运维”等流程的高效运转。在宏观层面，建筑设计环节需要将自身的信息化水平与建筑业产业链中其他行业的信息化水平相协调，相适应，相平衡，以增强建筑设计平台与产业链、供应链的协作，并促进其与产业链、供应链中相关平台（例如智能建造平台、智能制造平台）的对接。

建筑设计环节的信息化是建筑设计平台架构的基本前提，增加这一环节运用信息化方法和技术种类，扩大这一环节信息化的涉及层面，能够从平台架构的底层推动设计与建造的整合以及建筑设计行业的转型升级。

3. 以流程再造为基础实现信息流协同

PDM、ERP、MES 作为影响制造业协同化生产的三个重要系统，均与信息流的储存、传递紧密联系。在建筑设计平台的架构中，虽然可以运用类似的系统，在一定程度上加深现行建筑设计流程的信息流协同程度，但是现行流程存在诸如各专业的工作相互割裂、工程信息流失等问题，由于信息流协同以良好的业务流程为基础，因此，现行流程会对其信息流协同程度的提升造成限制。对于建筑设计平台架构而言，从有效提升建筑设计流程的信息流协同程度考虑，需要在运用类似于 PDM、ERP 这样的系统之前，对建筑设计进行流程再造。

实际上，在协同化生产模式中存

在着流程再造的“基础”。这个“基础”一方面来自制造业的发展历程：制造业在采用协同化生产模式之前，曾在1990年代流行过并行工程（Concurrent Engineering），相当于经历了一个流程再造的阶段；另一方面来自PDM、ERP、MES三个系统对于流程再造的作用：这些系统也可以作为流程再造的方法（属于信息化方法）。在进行建筑设计流程再造时，可以综合采用多种流程再造的方式，包括：①简化和合并设计流程，以减少信息流传递的层级；②集成多个业务流程，包括借助平台系统（例如建筑设计平台）跨专业、跨部门、跨行业地汇集、组织、处理不同设计阶段的业务流程，以缩短设计周期，实现多个业务流程在整个设计阶段的系统性集成；③改变设计流程间的逻辑关系，主要指跨专业、跨部门、跨行业地梳理业务流程，以调整和优化设计流程的先后顺序，使原本串行的“长”流程变为并行的“短”流程；④实现设计流程中部分过程的自动化，主要指运用多种信息化的方法和技术（例如数据管理技术、知识工程领域的本体技术），对设计流程中的部分过程进行自动化改造，以提高设计流程的运行效率和质量，减少由于设计变动等带来的工作内容冗余和错误，降低人力、物力等方面的成本。

在明确设计流程的组织之后，便可以进行信息流协同。需要强调的是，流程再造与信息流协同之间存在着相辅相成的作用关系：流程再造的过程应充分考虑实现信息流协同的因素，使流程再造后所形成的设计流程合理有效，以利于实现信息流协同；信息流协同的过程可以反过来验证流程再造的合理性，为流程的优化和完善提供依据。

4. 融入基于数字孪生的建筑设计优化方法

在建筑设计领域，或许是由于数字建造需要使用机器人、数控机床等硬件设备的缘故，数字孪生表现出与之更强的亲和力。然而，参考数字孪生在产品设计方面的应用情况，可以发现设计模式上与之相似的以CAD、BIM为代表的数字化建筑设计仍然具备与数字孪生结合的巨大潜力。相较于仿真模型，数字孪生体的突出特征在于具备与现实世界实时交互数据的能力，因此上述这种结合将使建筑设计在概念方案阶段便能够

整合来自现实世界的一系列数据，并由此获得区别于经验、规范的设计依据和设计参数，促成设计方案在设计过程中不断优化迭代，进而形成基于数字孪生的建筑设计优化方法。

对于建筑设计平台架构而言，可以在平台架构中融入基于数字孪生的建筑设计优化方法。这种设计优化方法的建立需要着重关注以下几点：①关注建筑设计的驱动方式，注重从基于建筑师经验、知识的驱动方式转变为依靠孪生数据的实证主义式的驱动方式；②关注数据对于建筑空间设计、功能设计等的指导作用，注重从数据中（例如人的行为数据）挖掘使用者的隐性设计需求（包括使用者自己未发觉的需求），主动地进行设计改进、优化和创新；③关注建筑设计方案的合理性验证，注重通过虚拟仿真从功能、性能、建造等方面检测设计方案的合理性；④关注建筑设计载体转变对于建筑设计流程的改变和信息交互的影响，包括物理与虚拟相融合的数字孪生体在不同设计阶段对于跨专业、跨部门、跨行业的业务流程的改变，以及对于业务流程中的信息流协同方式、协同机制的影响。

总体来看，在建筑设计平台架构中融入基于数字孪生的建筑设计优化方法，不仅有助于解决建筑设计面临的设计目标日趋多元、建筑功能日趋复合、建造要求日趋精细等问题，也可以为设计平台系统性地融合数据、实体信息、模型、服务以及推动设计质量的改进、设计精度的提升、设计创新的产生等提供可行的方法。

5. 从顶层构建系统化的平台运行逻辑

作为赢得竞争、提升核心竞争力、获得终极利益的选择，平台化生产模式成为制造业的一个相对永恒的话题。平台化生产模式带来的是制造业过去、当下以及面向未来的行业顶层思维方式，反映了生产制造活动以系统化的集成整合为状态、以平台这种特定形态的组织模式为载体进行其流程构建的运行逻辑。

对于建筑设计平台架构而言，需要借鉴制造业的平台化生产模式，围绕建筑设计环节，从顶层构建系统化的平台运行逻辑。这种运行逻辑强调以整体性、全局性的视角考量平台架构的前提基础、技术支撑和层级组织。在平台架构的前提方面，首先应当明确平台架构在思维方面的前提

基础，例如将基于“机器”的数字化思维方式作为前提基础；而后，应当明确平台架构在信息资源方面的前提基础，可以将建筑设计环节在宏观、中观、微观三个层面的信息化作为前提基础，涵盖数据源选取、数据采集种类选取、信息化对象选取等内容。在平台架构的技术支撑方面，首先需要从建筑设计行业的整体层面，围绕建筑设计环节内、外流程关系的组织，明确技术的应用目的、作用对象、作用范围；在此基础上，综合需求、成本、技术成熟度、技术趋势等选取具体的技术类型，包括选取适宜的文本信息化技术、信息流协同技术、数字孪生建模技术等，使平台架构具备可行的“物质”基础。在平台架构的层级组织方面，有必要对建筑业产业链、供应链的上、中、下游行业进行整合，使经由建筑设计平台连接起不同行业中的环节、要素相互协调配合，同时明确包括数据库、信息技术、数字孪生体在内的平台各组成要素的层级位置，并通过平台的统筹在平台架构中合理、有序地集成设计、建造、构件生产、运维等环节的多个业务流程，以进一步实现这些流程的一体化流程设计。

从顶层构建系统化的平台运行逻辑，既能够作用于建筑设计环节内部纵向的资源配置逻辑和方法，也能够影响建筑设计环节外部横向的资源配置逻辑和方法，是建筑设计平台架构得以成形的关键。

四、关于平台应用所提供的可能性

通过借鉴先进制造业的典型生产模式所获得的建筑设计平台架构，其落地实施将有助于构建出兼具智能制造特征和智能建造特征的建筑设计平台。这种平台的应用可以对建筑设计行业未来发展提供多方面的可能性。

可能性之一在于打通建筑设计平台与智能建造平台、智能制造平台的联系，并更大范围地促成建筑设计行业的资源配置。这是来自宏观层面的可能性，指的是在建筑设计行业的外部——即在一

个更大的范围上——借助设计平台对于产业链上中下游的集聚效应改进相关设计、生产、建造资源的资源配置形式，充分实现这些资源的合理配置。可能性之二在于促成建筑设计对建造的深度融合。这是来自中观层面的可能性，指的是建筑设计过程、工厂生产过程、建造过程的高度集成，包括方案设计环节、构件生产环节、现场建造（组装）环节三者的紧密联系和高效对接。可能性之三在于促成建筑设计的精益化。这是来自微观层面的可能性，指的是在精益生产要求下以及在建筑设计多目标耦合考虑下的设计要素优化和设计方式优化，包括设计效率提升、设计质量提升、设计成本降低、数据驱动设计能力提升、人机协同设计能力提升等。

目前，建筑设计行业已经有建筑设计平台初步应用的案例，但是更为成熟的、可供建筑设计行业借鉴的平台架构应用案例则来自先进制造业。平台架构的典型应用案例来自航天制造业。国外的波音公司、空客公司先后建立了飞机数字化设计平台。这种平台由两个重要的子系统组成，分别为全球数字化协同研制平台、协同设计支撑平台（图7）。前者能够实现合作设计单位、合作供应商等的异地协同，促成企业外部更大范围的资源配置以及产业

链上、中、下游不同行业的集聚，有助于在飞机的设计、制造过程中实现数据源的统一以及数据源有序、安全、可控的存储和调用；后者能够将飞机的设计、制造作为一个整体进行集成，使设计流程、制造流程获得整合和并行，并提升飞机设计方案的可制造性和可装配性，从而促成设计更改的减少、研发周期的缩短、设计成本的降低、装配问题的减少等。国内的航天科工集团面向航天产品的智能制造构建了工业互联网平台 INDICS (INDustrial Internet Cloud Space)。在企业业务方面，该平台提供了设计孪生、制造孪生、产品生命周期管理 (PLM)、ERP 系统、MES 系统的集成架构方式 (图8)，可实现产品制造信息结构化管理、虚拟化制造仿真、BOM 管理等功能，并促进设计、制造等环节的数据利用、信息流传递以及企业资源的优化配置。除了航天制造业，汽车、电机、家具、服装等制造业也有相应的平台架构应用案例。其中，较为典型的应用案例为海尔的卡奥斯平台。该平台的最初形式为企业级的互联网工厂，通过引领并带动利益相关者及与自身相关的其他行业的发展，这个工厂逐步演变为能够为汽车、建筑、机械等15个行业提供设计、生产、制造等服务的“跨行业的平台级工厂”。它的发展突出地反映了平台在更大范围内

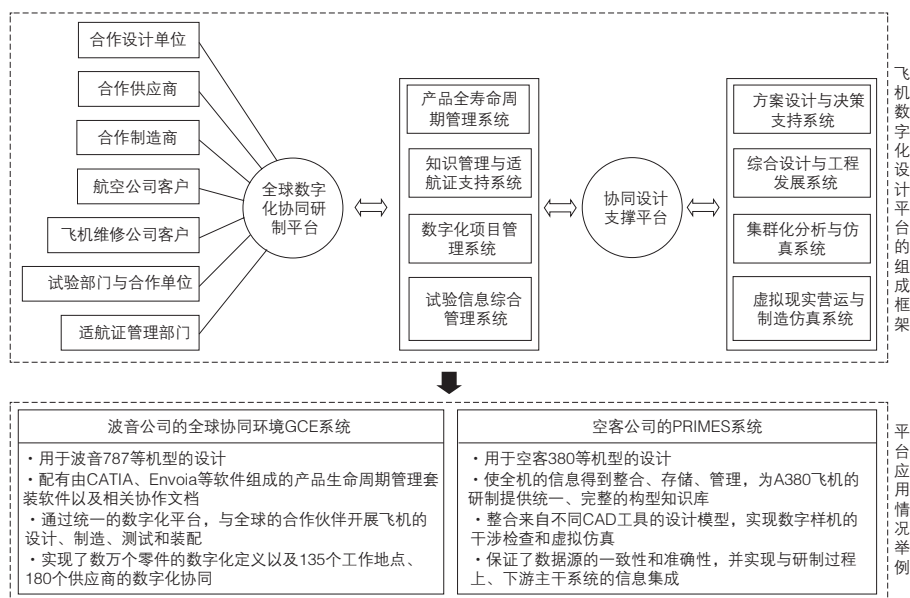


图7 飞机数字化设计平台的组成框架和平台应用情况举例

实现资源配置优化的优势和特征。在这个过程中，卡奥斯平台不断完善自身架构，形成了模式层、应用层、平台层（平台的技术核心）、资源层（集成和整合软硬件等资源）四个层级（图9），为不同行业实现设计、制造、服务三者的深度整合以及三者流程、效率、成本等的优化提供多方面的支撑。

五、结语

建筑设计平台架构并不是对单个建筑设计环节的平台化，而是以建筑设计环节为主体，与建筑业的产业链、供应链进行协作，对建造、构件生产、运维等多个环节进行整合的平台化。建筑设计平台架构可以从先进制造业的典型生产模式

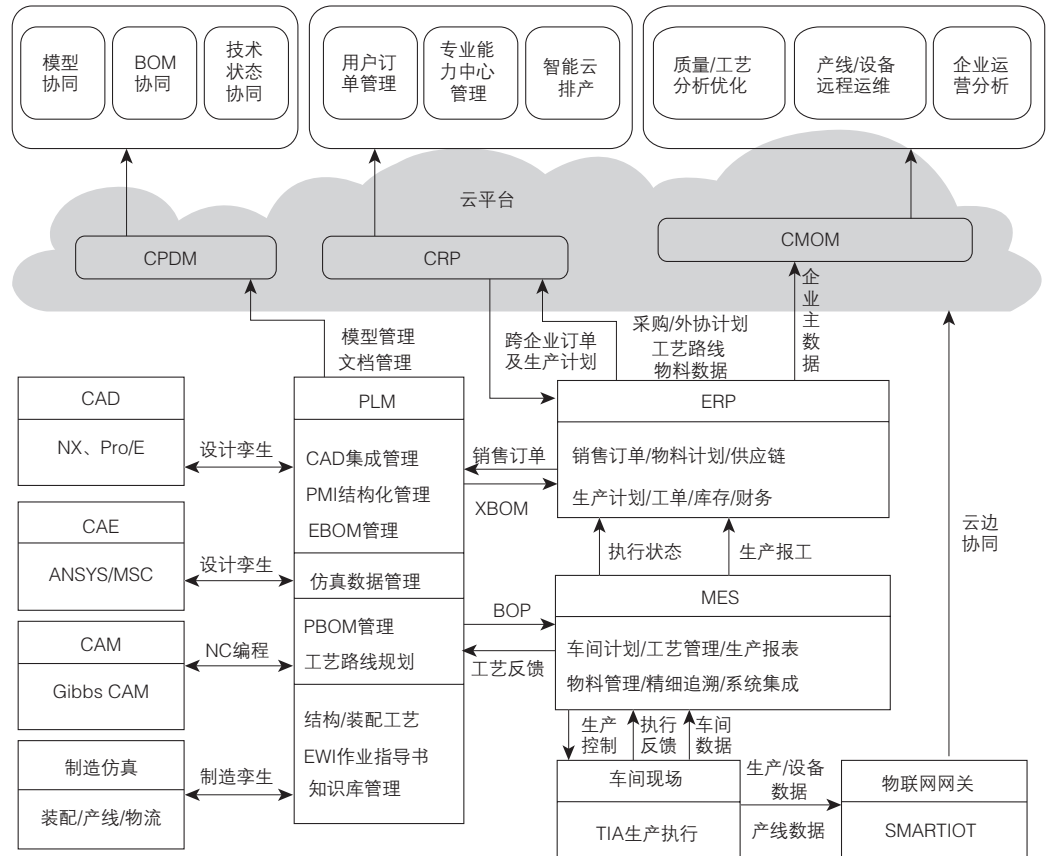


图8: INDICS 针对企业业务提供的各系统集成架构方式

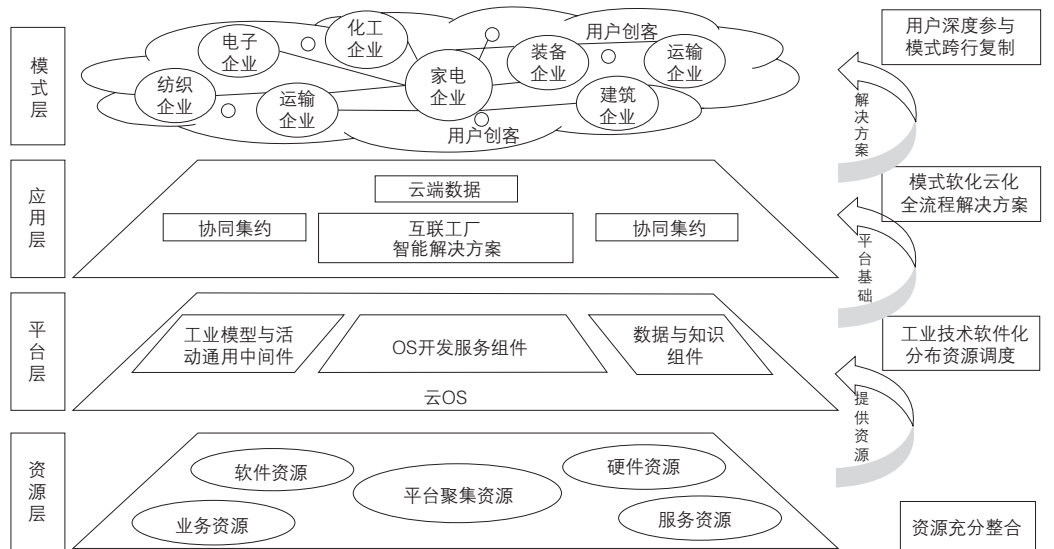


图9: 海尔卡奥斯平台的业务架构

中获得与数字化设计思维、设计资源信息化、设计流程再造、模型虚拟仿真等有关的启示，这不仅为建筑设计平台的架构提供了新思路、新方法，也为设计院以及建筑设计行业的转型升级带来了新视野、新途径。

注释

- [1] 先进制造业尚无统一的定义，但是存在如下共识：先进制造业以传统制造业为基础，但区别于传统制造业；先进制造业强调信息技术与产品生产制造的全过程融合，涉及制造模式、生产组织方式、产业服务功能等方面的变革。
- [2] BOM (Bill of Material) 名为物料清单，包括设计BOM以及在设计BOM基础上转换得到的工艺BOM、制造BOM。BOM是物料项所有子项的列表，用于描述产品设计、工艺、制造方面的信息，是PDM系统和ERP系统中最重要的数据信息之一。
- [3] 数字虚体对实体的实时控制依赖于信息物理系统(Cyber Physical Systems, CPS) 技术，数字孪生是建设信息物理系统的基础。

参考文献

- [1] 黄烨菁.何为“先进制造业”?——对一个模糊概念的学术梳理[J].学术月刊, 2010, 42 (7) : 87-93.
- [2] Le Corbusier. Towards a New Architecture[M].New York: Dover Publications, 1986.
- [3] 杨健.勒·柯布西耶建筑理论中的理性与修辞[J].建筑师, 2009 (4) : 43-50+4.
- [4] 童明.机器, 建筑——柯布西耶是如何思考建筑的?[J].建筑师, 2007 (6) : 15-22.
- [5] 杨晓龙.现代主义建筑的起源[M].北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [6] 欧雄全, 吴国欣.明日畅想——建筑电讯派思想对未来城市建筑空间设计发展导向的影响[J].新建筑, 2018 (3) : 126-129.
- [7] Reyner Banham. Theory and Design in the First Machine Age[M].Cambridge: The MIT Press, 1980.
- [8] 丁力扬, 林中杰.探析新陈代谢运动及其对当代中国的启示[J].城市建筑, 2010 (2) : 89-92.
- [9] 张文文.精益工艺生产信息系统的研究与设计[D].廊坊: 北华航天工业学院, 2020.
- [10] 徐鹤轩.基于PDM技术的协同设计系统的研究与实现[D].沈阳: 东北大学, 2008.
- [11] 项星玮, 王晖, 黄童乐, 等.培养具有“信息协同”意识的建筑设计数字化思维——机械工程学科工业工程专业相关课程教学对于数字化建筑设计教学的启示[A].数智营造: 2020年全

国建筑院系建筑数字技术教学与研究学术研讨会论文集[C].北京: 中国建筑工业出版社, 2020: 359-366.

- [12] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等.产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J].计算机集成制造系统, 2017, 23 (04) : 753-768.
- [13] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等.数字孪生及其应用探索[J].计算机集成制造系统, 2018, 24 (01) : 1-18.
- [14] Fei Tao, Fangyuan Sui, Ang Liu, et al. Digital Twin-driven Product Design Framework[J].International Journal of Production Research, 2018,57 (12) : 3935-3953.
- [15] 项星玮.建筑设计的新商业模式[M].杭州: 浙江教育出版社, 2017.
- [16] 蒋鑫.制造业平台化转型研究[D].北京: 中国社会科学院研究生院, 2020.
- [17] Jonas Andersson Schwarz. Platform Logic: An Interdisciplinary Approach to the Platform-Based Economy[J].Policy & Internet, 2017, 9 (4) : 374-394.
- [18] 刘念雄, 张竞予, 刘依明, 韩玥君.建筑师视野的碳排放与建筑设计[J].建筑学报, 2021 (2) : 50-55.
- [19] 梁可.数字化协同制造平台在C919研制过程中的应用研究[D].哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [20] 王永栓, 王晓丽, 向颖, 梁雪梅.航空工业数字化协同现状与发展[J].航空制造技术, 2009 (11) : 62-65.
- [21] 王艳广, 宿春慧, 高方方, 郑杨.基于工业互联网平台的航天产品智能制造应用[J].制造业自动化, 2020, 42 (12) : 1-5+11.
- [22] 田锋.制造业知识工程[M].北京: 清华大学出版社, 2019.
- [23] 吕文晶, 陈劲, 刘进.工业互联网的智能制造模式与企业平台建设——基于海尔集团的案例研究[J].中国软科学,2019(7): 1-13.
- [24] 辛国斌, 田世宏.智能制造标准案例集[M].北京: 电子工业出版社, 2016.

图表来源

- 图1: 参考文献[8]
- 图2: Hyunjung Cho. Kenzō Tange's A Plan for Tokyo, 1960: a plan for urban mobility[J].arq: Architectural Research Quarterly, 2018,22 (2) : 139-150.
- 图3: 浙江大学机械工程学院王昊、陶家琦提供
- 图4: 作者自绘
- 图5: 根据文献[14]中的图5 (Figure 5. Understanding of digital twin in the FBS framework.) 绘制
- 图6: 根据浙江大学机械工程学院工业工程研究所提供的资料绘制
- 图7: 根据文献[20]中的图2修改绘制
- 图8: 参考文献[21]
- 图9: 参考文献[23]
- 表1: 作者自绘
- 表2: 作者自绘