

# 中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 76 次

学部工作局学术与文化处 编报  
《中国科学》杂志社

2019 年 3 月 19 日

## “软件定义的制造业”科学与技术前沿论坛综述

### 一、国内外研究现状

当今世界，网络信息技术迅猛发展，通过跨界融合对科技与产业起到重要的支撑发展和创新引领作用，助推人类进入新时代。从基础设施视角来看，这是一个互联网+时代；从计算模式视角来看，这是一个云计算时代；从信息资源视角来看，这是一个大数据时代；从信息应用视角来看，这是一个智能化时代。但从根本的使能视角看，本质上是一个软件定义的时代。“软件定义”已经成为新时代发展的重要特征。

软件定义就是把过去的一体化硬件设施打破，实现“硬件资源的虚拟化”和“管理任务的可编程”，将传统的“一体式（monolithic）”硬件设施分解为“基础硬件虚拟化及其应用程序编程接口（API）+管控软件”两部分：基础硬件通过 API 提供标准化的基本功能，进而在其上新增一个软件层替换“一体式”硬件中实现管控的“硬”逻辑，为用户提供更开放、灵活的系统管控服务。通过软件定义，底层基础设施架构在抽象层次上就能趋于一致。换言之，对于上层应用而言不

再有异构的计算设备、存储设备、网络设备、安全设备导致的区别，应用开发者能根据需求更加方便、灵活地配置和使用这些资源，从而可以为云计算、大数据、移动互联网、物联网等信息应用按需“定义”出适用的基础资源架构。

软件定义的技术与理念不断泛化与延伸，正从信息世界走向物理世界乃至人类世界。软件不仅定义了传统计算机硬件的功能和性能，也体现在通过信息技术与传统的产品（系统）的嵌入和融合，构建产品的“数字孪生体”，并通过数据的实时采集、高效传输、优化决策、智能控制等过程，实现对广义硬件的功能、性能的定制和优化，极大地增强了产品（系统）的自动化、智能化程度，软件定义世界的时代已经开启。在以新一代信息技术与传统制造业的深度融合为特征的新一轮制造创新浪潮中，软件定义带动技术、产品、业态、模式等不断创新，加速制造业的转型升级。软件定义的制造业破茧而出，成为未来制造发展的重要趋势之一。

制造业是国民经济的主体，国际金融危机后，再次成为国际竞争的焦点，发达国家纷纷提出了“再工业化”战略，重新布局和抢占制造业的制高点。德国“工业 4.0”构建基于信息物理系统（CPS）的新型制造体系。这是一次现代信息和软件技术与传统工业生产相互作用的革命性转变。“工业 4.0”战略中的关键技术与理念处处可见软件的身影，其重要性上升，发展势头迅猛。以工业软件为主角的信息技术是产业变革的核心推动力，它可以实时感知、采集、监控生产过程中产生的大量数据，促进生产过程的无缝衔接和企业间的协同制造，实现生产系统的智能分析和决策优化，从而使生产方式向着智能制造、网络制造、柔性制造方向变革。

美国的“制造业创新国家网络”将软件提高到一个很重要的位置，并将“数字制造”与“智能制造”分成两条主线。作为“数字制造”的主导部门，数字制造与设计创新机构（DMDII）早在 2015 年 7 月就

启动了数字化制造的开源软件项目“数字制造平台（Digital Manufacturing Commons, DMC）”；作为智能制造的主导部门，智能制造领导联盟（SMLC）强调将采用开源的数字平台和技术集市的方式，将先进的工业软件、传感器、控制器、平台和建模技术集成到商业化的智能制造系统。与此同时，充分利用云计算技术和灵活的软件开发架构，提供实时分析工具、基础设施和各种工业应用，确保所有美国企业，不论是大企业还是中小企业，都将受益于制造业创新机构的平台成果。

软件技术正在构建智能化的生产模式和产业结构，支撑新一代信息技术和制造业深度融合，引发影响深远的产业变革，形成新的生产方式、产业形态和增长方式。各个国家提出的制造业发展战略都是在这样的背景下提出的。其目的就是借助新一代信息技术革命的制高点发展制造业，带动经济增长。各种先进制造理念都是通过软件再造业务流程，实现向数字化、网络化、智能化、服务化的方向发展。软件作为新一轮工业革命的核心竞争力正成为世界各国的共识。

## 二、论坛概况

2018年6月1~2日，由中国科学院学部主办，中国科学院信息技术科学部、技术科学部和学部学术与出版工作委员会承办，北京理工大学、华中科技大学、中国赛宝实验室和《中国科学》杂志社等单位协办，以“软件定义的制造业”为主题的第76次科学与技术前沿论坛在中国科学院学术会堂（北京）召开。

本次论坛由梅宏院士和丁汉院士担任执行主席。工业和信息化部信息化和软件服务业司谢少锋司长以及柳百成院士、郑南宁院士、陈纯院士、李伯虎院士、柴天佑院士等作了主题报告，10位知名专家做了指定发言，来自高校、科研机构和相关单位的专家学者约150人参加了论坛。

### 三、论坛的目的及重点关注的问题

经过近 40 年的快速发展，我国已成为世界第一制造大国，但仍存在创新能力弱、资源能源消耗高、基础零部件依赖进口等一系列问题。针对我国制造业存在的问题，尤其是随着我国资源环境的刚性约束不断强化，劳动力等生产要素成本正在加快上升，投资和出口增速放缓，主要依靠低成本要素投入实现规模扩张的粗放型增长模式已难以为继，调整结构、转型升级、提高质量和效益成为制造业发展的主要目标。为此，结合新兴信息技术带来的科技变革和产业革命大趋势，党中央、国务院部署并实施了《中国制造 2025》制造强国、“创新驱动发展”、“两化深度融合”、“智能制造与机器人”（2030）科技创新重大项目、“互联网+制造”、“大众创业万众创新”等一系列战略，积极推动智能制造科技创新和产业发展，加速推动产业升级，实现发展方式转变。

作为经济发展的新亮点，软件将服务于“互联网+”、“中国制造 2025”等国家重大战略，可以预见，软件将不断定义制造业的各类平台、数据甚至应用，从单一资源的按需管控走向全网资源的互联互通，软件驱动制造和软件定义制造，在带动产业创新发展、促进“两化”深度融合、支撑新一轮工业革命中将发挥核心作用。

本次论坛的目的是在我国制造业通过智能制造向制造强国转变的大背景下，结合软件定义世界的大趋势，探讨软件定义制造业的前沿理论、核心关键技术和应用前景等问题，为我国智能制造的发展和制造业转型升级提供参考。主要内容包括：（1）软件定义制造业的基础架构、参考模型、全生命周期数字孪生建模等前沿基础理论；（2）工业物联网、工业大数据、人工智能与过程控制、软件定义制造业的平台研发等核心关键技术；（3）软硬件接口标准规范、功能安全和信息安全技术等保障技术；（4）软件定义制造业的应用需求、智能制造业务模式和应用场景。

## 四、报告内容

### （一）谢少锋司长：软件产业发展情况

报告首先介绍了当前软件产业发展的新现象，包括全球知名企业创始人或合伙人均为软件开发人员、欧美发达国家均把软件教育纳入国民基础教育、国际领先工业企业软件化趋势凸显等。报告阐述了软件定义时代的特征及机遇。软件定义对传统物理世界基础设施和社会经济基础进行重构，呈现出“基础设施化”趋势，成为促进生产方式升级、生产关系变革、价值链提升的重要引擎。未来世界将万物皆可互联，一切均可编程，无处不在的软件正在定义整个世界。软件正在定义制造业，成为支撑引领制造业转型升级的新路径，软件技术已成为新一轮工业革命的核心竞争力。最后介绍了我国软件产业发展存在诸如核心关键软件受制于人等问题。

### （二）柳百成院士：加快研发设计与制造关键支撑软件

报告首先介绍了智能制造的背景。最近几年工业发达国家都在重振制造业，德国首先提出工业 4.0，聚焦在物联网+智能制造。美国的国家战略提出 Manufacturing USA。《中国制造 2025》提出 5 大工程，以智能制造为主攻方向。世界各国的发展规划都聚焦在智能制造。然后介绍了建模与仿真是智能制造的关键共性技术。《智能制造发展规划（2016~2020 年）》、美国智能制造创新研究院均将建模与仿真及相关支撑软件作为重要关键共性技术。智能制造概括起来可分为智能产品、智能装备、智能生产过程、智能生产模式。建模与仿真是智能制造的关键共性技术及科学基础，而设计与制造的建模与仿真及相应关键支撑软件是智能制造的技术支撑。要突破建模与仿真，最后要落实到相关的核心支撑软件，所以建模与仿真与相应软件是智能制造的重要方面。美国 DARPA 提出的计划与波音 777 的工程实践均证明了建模与仿真软件的重要意义及巨大价值。接下来介绍了国外设计与制造建模与仿真进展。波音 787 是数字化设计、研究开发、制造及全生命周期

(4D)，是创新虚拟飞机。波音 787 把数字化设计制造用到了极致，其中最重要的还是建模与仿真和相应的软件。波音研究 787 用了 8000 多种软件，其中 1000 多种是商业软件，另外 7000 多种是自己的软件。波音关于飞机设计、技术和知识经验等是工业制造的典范。国外经验研发全新发动机要 20 多年。GE 采用 ICME 技术研发航空发动机单晶叶片制造技术。航空发动机涡轮盘现在做到全流程，从铁砂熔铸、热处理、加工、服务整个流程模拟仿真。通过模拟仿真，从 2005 年研发 B767 进行的 77 次风洞实验，降到了研发 B787 只进行 11 次。

《中国制造 2025》将智能制造作为主攻方向，美、德、英等国均将智能制造作为发展趋势和主要研究领域。数字化设计与制造是智能制造过程关键共性技术，而建模与仿真是数字化设计与制造的科学基础。我们国家在设计与制造、建模与仿真领域研究已经具有较好的科学基础，要大力加强设计与制造、建模与仿真的研发及相关的支撑软件的研发与产业化。

### **（三）郑南宁院士：AI 混合计算架构与智能（计算）前移**

报告从传统的人工智能和深度学习的方法探讨了发展混合智能的必要性。传统人工智能的局限性：需要对问题本身抽象出一个精确数学意义上的解析式的数学模型，需要对已建立的数学模型设计出确定的算法，处理的结果无法表示现实世界问题所固有的测不准性和不完备性，图灵意义下的可计算问题都是可递归的，而可递归都是有序的，实际中面临的问题都是开放的、动态的。当前人工智能在许多领域已经取得了显著的成功，尤其是语音和图像识别以及复杂作业环境中机器人的行为决策与规划，这些成功主要归功于两大 AI 方法的发展：深度学习和强化学习。而深度学习过度依赖数据、缺乏对因果关系的描述、需要依赖于指令驱动或数据驱动。如何在这些进展的基础上实现具有高度自主学习能力的的人工智能系统，解决更为开放、动态和复杂环境下的人工智能问题，需要从脑认知机理和神经科学获得灵感和

启发，发展新的计算模型与架构，形成混合增强智能的形态，这种是人工智能或者机器智能可行的、重要的成长模式。混合增强智能可以分为两类基本形式，一类是人在回路的人机协同混合增强智能，另一类是受脑认知和神经科学启发混合增强智能。另外，一个高效的信息加工过程应该能够利用实际信息的因果关联，在最前端的数据层面提取感知数据的基本属性并与空间拓扑结构信息融合，将“数据驱动”变换为“事件驱动”，实现智能（计算）前移。

报告围绕混合模型 AI 计算架构的研究前沿，结合作者研究团队的工作，讨论如何实现基于选择性注意机制与事件驱动的认知计算引擎的基本框架，以及如何在这种计算框架中通过具有语义信息的图数据结构对场景进行表征和理解（如物体的属性、位置关系、因果及控制关系）。报告还介绍了基于认知计算框架的无人自动驾驶验证平台的构建，并讨论了如何使无人自动驾驶汽车具有记忆、推理和经验更新的认知机制，使其能够应对高动态和强随机性的场景变化。

#### （四）陈纯院士：大数据实时智能处理——从软件系统的角度

报告首先指出新型信息技术（特别是大数据和人工智能技术）与制造业深度融合发展，正在引领制造方式向智能化方向发展。结合大数据实时处理和人工智能的自主可控系统软件是智能制造的重要支撑。报告从数字化、网络化与智能化的关系引入，指出互联网与物联网的发展产生信息空间视为网络化，在网络化的基础上有了大数据的分析挖掘才产生智能化。如何基于软件系统对大数据进行实时处理是一个重要课题。

报告从数据分析处理技术的发展历程切入，指出大数据包括批式大数据和流式大数据，批式大数据类似于水库静态的水，流式大数据类似于正在流进水库的水。把批式大数据和流式大数据结合起来是非常重要的，目前 Apache 基金会发布了一个 Beam 项目，仅仅提供了一个编程框架，还没有很好地融合起来，迫切需要研发具有快速、高效

且自主可控特点的流式大数据（批式+流式）实时处理软件系统。从软件系统研发的角度探讨了大数据实时智能处理技术的挑战，主要包括基于分布式内存的并行计算、海量历史数据高性能分析（高速度、高复杂度）、流数据（实时+历史）复杂逻辑增量计算、不同维度的复杂事件的处理。

报告介绍了自主研发的“流立方”软件系统的关键技术特点和基于“流立方”的大数据实时智能处理技术体系。通过流式大数据实时处理+AI模型实现大数据实时智能处理（实时智能决策）。其中AI模型的建立通过AI学习的三种基本模式：符合逻辑表示下的推理（形式化方法）、挖掘数据的内在模式（统计方法）、从经验中进行自我提升（控制论方法）。该系统实现了批式大数据和流式大数据的融合处理，支持复杂统计指标、复杂事件序列识别等大数据实时分析功能，具备可执行规则模型和机器学习模型的“双核”实时智能决策引擎。系统很好地满足了各种数据驱动、实时分析、智能决策的复杂应用场景需求，已在多个相关行业得到广泛应用。

#### **（五）柴天佑院士：制造流程智能化对人工智能的挑战**

报告首先介绍了离散工业和流程工业的特点和目标。离散工业是零件加工与组装是可拆分的过程，产品加工过程可以数字化，难在总体设计。流程工业的特点是先有工艺设计，过程是不可拆分的物理化学过程，原材料、成品材料和物质转化过程难以数字化，主要问题是工艺设计的优化和制造全流程的优化。对于流程工业和离散工业，智能制造的目标是不同的，对于离散工业主要是个性定制高效化，流程工业主要是生产工艺的优化。

报告介绍了制造流程系统：人-信息-物理系统（HCPS）。人主要是作决策，制造流程决策指标主要包括企业目标、生产指标、工业参数、控制系统指令等；信息系统主要包括资源计划系统、制造执行系统、控制系统；物理系统实施整个制造流程。制造流程智能化是以企



业全局及生产经营全过程的高效化与绿色化为目标，以生产工艺智能优化和生产全流程整体智能优化为特征的制造模式。高效化和绿色化的关键是生产工艺优化和生产全流程的整体优化。对于离散工业智能制造，工业 4.0 的愿景是生产资源形成一个循环网络，生产资源将具有自主性、可调节性、可配置等特点，产品具有独特的可识别性，根据整个价值链自组织集成化生产设施，根据当前条件灵活制定生产工艺。技术基础是 CPS，分布式 CPS 通过嵌入式互联网技术相互协同。生产工艺靠人，智能决策还是靠人，人的作用变成软件来实现，智能化最终需要用软件实现。人在其中的作用至关重要，由人提出产品构思与设计、由人确定生产规则和参数、CPS 根据指令仿真对比各种生产选项、CPS 给出符合要求的“最佳”生产方式建议、由人选择最佳生产方式实现生产。

最后，报告介绍了对人工智能挑战的科学问题。操作工作自动化、管理与决策信息化推动第三次工业革命，知识自动化与智能化是实现智能制造的关键。复杂制造流程中面临的运行状况识别与决策现状及面临的挑战难题。大数据驱动的人工智能技术要解决“大数据小任务”问题，制造流程智能化要解决“小数据大任务”问题，只有将两类人工智能技术相结合，才能真正解决制造流程智能化中的挑战科学问题。

#### **（六）李伯虎院士：从智慧制造云的研究与实践谈“软件定义智能制造”**

报告首先对“新互联网+大数据+人工智能+”时代的内涵进行了简要解读，接着简介了制造业面临挑战与国内外的对策——“积极发展智能制造的技术、产业和应用”，实现“面向智能制造的新模式、新手段和新业态”。报告给出一种智能制造——智慧云制造的内涵及智能制造系统——智慧制造云的系统体系结构、典型技术特征、知识/技术体系总体框架、支撑知识/技术体系框架、系统的中国特色与效益及云制造技术、应用与产业的国内外现状及发展。

报告论述了智慧制造云是云计算在制造领域的落地和拓展，是一种“新互联网+大数据+人工智能+”时代的智能制造系统。还简介了本团队在近年开发并上线运行的航天（专有）云网、航天（公有）云网、航天（国际）云网等3个智慧制造云雏形及其实现范例。

报告阐述了智慧制造云中软件的技术体系及其关键作用，进而对“软件使能智能制造”的内涵、平台与应用提出几点思考。包括软件使能制造资源/能力/产品，软件使能智能制造的新模式、新手段和新业态，促使制造全系统及全生命周期活动中的人/组织、技术/设备、管理、数据、材料、资金（六要素）及人流、技术流、管理流、数据流、物流、资金流（六流）集成优化，进而高效、优质、节省、绿色、柔性地制造产品和服务用户，提高企业（或集团）的市场竞争能力。

最后，从技术、市场、应用三方面提出了建议。在技术方面，提出6个重视，一是要重视新制造技术、新信息通信科学技术、新一代人工智能技术及新制造应用领域技术等四类新技术的深度融合；二是要重视加强软件使能智能制造的设计、生产、管理、试验、保障服务等智能制造的新模式、新流程、新手段、新业态的研究；三是要重视数据库、算法库、模型库、大数据平台、计算能力等基础能力研究与建设；四是要重视符合“分享经济”的商业模式技术研究；五是要重视安全技术及相关标准和评估指标体系技术研究；六是要重视智能化感知、接入、互联层的技术研究。在产业方面，提出4个加强：加强软件使能智能制造的工具集和平台的产业；加强面向软件使能智能制造的智能产品的产业；加强软件使能智能制造的系统的构建和运行产业；加强软件使能智能制造的平台运营服务产业。在应用方面，提出4个突出：突出行业、企业特点；突出以问题为导向的制造模式、手段和业态的变革；突出系统的六要素、六流的综合集成化、优化和智慧化；突出系统工程的实施原则。

## 五、共识和建议

本次论坛除了 6 个主题报告以外，还邀请了中航工业集团宁振波研究员、北京航空航天大学陶飞教授、中国科学院软件研究所赵军锁研究员、中国兵器工业集团毛明研究员、e-works 数字化企业网黄培博士、北京航空航天大学刘继红教授、华中科技大学陈立平教授、走向智能研究院赵敏院长、中国赛宝实验室杨春晖研究员、北京索为系统技术有限公司李义章董事长等 10 位专家作了指定发言。

参加论坛的所有专家学者围绕论坛主题并结合自身所在的科学、工程及信息领域，针对软件定义的制造业相关前沿理论、核心关键技术和应用前景等问题，进行了热烈交流和深入讨论。

### （一）与会专家的共识

软件在支撑新一轮工业革命中将发挥核心作用，并且作用将随着软件技术与工业技术的融合不断增强，其中软件定义的制造业正成为软件技术与工业技术融合的必然趋势，而智能制造正是软件定义的制造业的重要形式。

随着新兴信息技术与制造业深度融合发展，以机器人、数字化制造、3D 打印、智能工厂、网络化制造等为代表的智能制造技术正在孕育着制造技术体系、制造模式、产业形态和价值链的巨大变革，智能制造已经成为制造业发展趋势。基于信息物理系统（Cyber-Physical System, CPS）的智能工厂正在引领制造方式向智能化方向发展；云制造、网络众包、异地协同设计、大规模个性化定制、精准供应链、电子商务等网络协同制造模式正在重塑产业价值链体系，使制造技术体系、制造模式、产业形态和价值链将发生巨大变革，其中软件发挥着此次巨变的核心作用之一。

软件定义的智能制造，通过实现“硬件”、知识和工艺流程的软件化，进而实现软件的平台化。具体体现在：**制造全过程数字化**，建立全生命周期的数字孪生体，支持智能决策和优化控制；**相关知识软件化**，在产品设计、仿真、加工、装配及服务过程中，技术与经验不

断通过软件固化、沉淀到平台，实现基于软件的知识复用和知识自动化；**制造平台定制化**，通过机器硬件的软件虚拟，实现机器硬件的灵活组合、通信互联和智能控制，面向特定领域或个性化生产任务实现软件定义的深度定制。特别是，当工业设备、产品和业务活动基于 CPS 而联成网络（工业互联网）时，软件以工业互联网平台的形式起到关键基础设施作用，为制造业提供一个设备高度互联、数据自动流动、要素优化配置的赋能环境，以工业软件形式定义制造业各个流程中的各种业务活动；在制造平台的基础上面向多样性需求，开展个性化定制生产，实现软件定义下的订单驱动型制造模式；基于工业大数据、人工智能技术和平台软件，支持企业经营管理、设计制造、供应链、销售、服务等业务的优化决策，实现软件定义下的全业务智能化模式。

## （二）主要见解

与会专家通过研讨，形成以下见解。

### 1. 软件定义制造

软件定义制造是用软件来描述、约束、仿真、集成、赋能、加速、放大、创新制造过程和诸要素的制造模式，是在环控制规则的软件指令对制造流程的精准控制与实现，它不受时空限制和人的约束。智能制造作为软件定义制造的重要形式，其本质是以“软件定义”形成数据的自动流动解决复杂系统的不确定性，提高资源配置效率。软件在其中扮演重要的角色，具体体现在软件定义的产品、软件定义的制造全过程、软件定义支撑制造模式转变、软件定义的实现方法等。

#### （1）软件定义的产品

伴随着“万物皆可互联，一切均可编程”的时代到来，产品由软件定义的程度不断提高。首先体现在产品的功能、灵活性、易扩展性、安全性和可管理性等正通过丰富多彩的软件来展现，具体表现为软件定义产品功能、软件增强产品效能和软件拓展产品边界。其次，软件对产品定义的能力正从传统的 IT 产品向工业产品拓展，推动工业产品

逐步向智能化发展，软件进入物理设备发挥“赋智”作用，形成智能产品。最后，软件构建新的产品结构，具体表现在软件重构功能结构、软件优化性能结构和软件再造价值结构。

## **(2) 软件定义的制造全过程**

**软件定义的设计。**信息技术与工业技术的深度融合，使设计技术在发生着深刻变化，其中软件定义对设计的作用显得尤为突出，无论设计对象、设计方法还是设计工具都体现出了软件定义的特征。一是对于设计对象（产品）来说，在设计过程中，产品都是由数据和模型来表达，即软件定义产品。二是对于设计方法来说，如 CAX 等设计方法、复杂系统的体系化设计方法等都是基于软件实现，即软件定义设计方法。三是对于设计工具来说，其中个体工具、组织工具和社会工具等都是依赖软件，即软件定义设计工具。

**软件定义的研发。**各种软件开发工具及研发管理工具的广泛普及，给企业研发带来了重大变革。企业研发将从以物理试验为手段的“试错法”向数字仿真手段演变。所谓数字仿真手段，就是在软件中写入各种算法和机理模型，模拟工业设备和产品的“形”和“态”，并通过优化逐步打造出对应的“数字孪生体”，并在数字孪生体上进行各种可能的应用场景仿真，事先消除各种潜在问题。例如中航工业在“飞豹”战斗机的研发设计中采用的数字化建模与仿真试验减少了 60% 的风洞实验，减少了大量的能耗，体现了数字化模型和仿真带来的价值。

**软件定义的生产。**软件定义的生产，即从实体生产向虚拟生产转变。软件为制造业建立了一套基于 CPS 的闭环赋能体系，实现了物质生产运行规律的模型化、代码化和软件化，进而创造一个与实体生产相对应的虚拟生产空间，使生产过程在虚拟世界实现快速迭代和持续优化，待产品优化成熟后，再进入物质世界完成生产，从而大幅度缩短研制周期、降低了生产以及交付的成本、提高生产的整体效率与准确率，由此形成生产的新方法。

**软件定义的质量控制。**制造发展的过程也是质量控制不断提升的过程，在设计、研发、生产等过程中加入软件，通过软件对生产设备和流程的控制实现制造过程的运维，提高整个过程的针对性、准确性、灵活性及高效性，最终实现质量上的实时管理和精密控制，最终生产出高质量的产品，提供高质量的服务。软件在这些过程中发挥了不可替代的作用，为质量控制、质量管理、质量预测、质量维护等提供了新工具和新手段，实现智能化运维。

### **(3) 软件定义支撑制造模式转变**

**制造模式从规模生产向定制生产转变。**批量定制将作为未来制造的主要生产模式。软件定义形成的柔性制造、个性化制造的管控能力将作为支撑。大规模定制能够高效率地为用户提供个性化定制产品，这是因为由软件定义构建了一个数据自动流动的生产体系，解决了生产定制化过程中的多样性和复杂性等问题。通过软件控制的智能设备解决了成本与效率之间的矛盾，达到了降低成本和提高效率的有机统一。个性化定制实质是随着市场更加开放和灵活，消费者的意志通过软件来实现，从而整个产业进入消费者定义市场的阶段，即一切服务都得从消费者的需求切入，这个趋势翻译成信息技术语言就是软件定义。

**制造模式从生产型向生产服务型延伸。**未来制造业，制造的价值正在不断向服务和软件迁移。企业向顾客提供的不再是单纯的产品，而是各种应用软件与硬件产品集成于一体的整体服务方案。通过内嵌于产品的软件，衍生出新的产品和服务模式。例如 GE 将传感器安在飞机发动机叶片上，通过软件建立了“健康保障系统”。对发动机叶片的数据进行分析，为可能出现的检修维护做准确预测，减少用户停产检修的次数。实现与装备的使用、维修维护、供应链、安全监管、应急处置等过程的高度融合。这样厂商不仅是制造产品，也是制造服务，实现价值链的延伸。

#### (4) 软件定义的实现方法

制造业中软件定义的方法需要形成模块化开放体系架构。首先通过软硬件解耦将系统分解为一系列标准化的软硬件模块；接着将工程技术以模块形式软件化，使产品研制过程像搭积木一样完成；然后对这些模块进行不断的升级和重组，逐步提升整个系统的效能。

采用模块化开放体系架构，不但便于引入新技术对其进行升级改造，也便于控制和降低成本。该架构具有以下典型特征：第一，需求可定义，即可根据需要重构整个系统，灵活响应多种不同的任务需求，满足多种应用场景；第二，硬件可重组，即采用开放系统架构，具有丰富的接口形式，支持即插即用，可以根据任务需求进行计算资源、交换资源、存储资源的重组；第三，软件可重配，即具有一致的程序执行环境，具有丰富的应用软件，可以根据任务需求动态配置和执行不同的 APP，完成不同的任务；第四，功能可重构，即通过接入不同的硬件部件、加载不同的软件组件，即可快速重构出不同的功能，这一理念与操作系统类似，目前已在提出“软件定义卫星”，并在卫星的设计研发中开展了实践。

#### 2. 软件使能制造

软件使能制造是借助新兴的制造科学技术、信息通信科学技术、智能科学技术及制造应用领域专业技术等 4 类技术深度融合所形成的数字化、网络化和智能化的技术工具，形成以用户为中心的软件使能制造资源/能力/产品，构建服务云（网），使用户通过智慧终端（软件）及智慧云制造服务平台（软件），随时随地按需获取智慧制造资源、产品与能力服务，形成一种基于泛在网络，用户为中心，人/机/物/环境/信息融合，互联化（协同化）、服务化、个性化（定制化）、柔性化、社会化、智能化的智慧制造新模式，实现“泛在互联、数据驱动、共享服务、跨界融合、自主智慧、万众创新”的新业态，进而实现高效、优质、节省、绿色、柔性地制造产品和服务用户，提高企业的市场竞

争能力。

### **(1) 体系架构**

软件使能制造系统的体系架构包括软件使能的智能资源/能力/产品层、软件使能的智能感知/接入/通讯层、软件使能的智能制造系统云服务平台层、软件使能的智能制造云服务应用层、软件使能的人/组织与各层新标准及软件使能的安全管理。

### **(2) 软件技术体系**

软件使能制造系统的软件技术体系包括系统软件技术、平台软件技术和应用软件技术。

系统软件技术包含智慧制造服务器操作系统技术、桌面操作系统技术、移动终端操作系统技术、嵌入式操作系统技术以及制造业编程语言技术等。

平台软件技术包含智慧资源/能力感知软件技术、物联软件技术；智慧资源/能力虚拟化/服务化软件技术；智慧虚拟化制造服务环境的构建/管理/运行/评估软件技术；智慧虚拟化制造可信服务软件技术；制造知识/模型/大数据管理、分析与挖掘软件技术以及普适人/机交互软件技术等。

应用软件技术包含智慧产品设计软件技术、生产软件技术、管理软件技术、仿真与实验软件技术及服务软件技术等。

### **(三) 建议**

与会专家经过研讨，认为软件技术与制造业的深度融合已经成为必然趋势，亟需各方的研究与实践，共同推动产业变革。具体建议有：

1. 加强基础科学研究：对数学、物理、信息科学等重点基础学科给予更多倾斜，聚焦未来可能产生变革性技术的基础科学领域，强化重大原创性研究和前沿交叉研究。

2. 加强软件技术研究：加强“软件定义”技术领域的研究与应用的结合，夯实软件基础理论与技术，探索互联网、大数据、人工智能



等新兴技术与制造业融合。

3. 推动工业技术软件化：强化工业机理、制造工艺等制造共性知识的挖掘与积累，加快工业软件研发，推动工业软件体系化发展和产业化应用，提升工业技术软件化的成熟度。

4. 实施工程实践试点：开展软件定义的制造业工程实践类项目，支持典型项目的建设和应用推广。

5. 鼓励协同创新发展：加强软件业与制造业的交流与合作，互相学习、各取所长、融合发展。整合各方资源，营造产业生态，创新软件定义的制造业的发展途径。

## 六、与国外相关研究的比较

目前，国外的研究机构和相关企业已经做了相关研究，并开展了相应的实践应用。美国国防高级预研局（DARPA）借助自适应运载器制造 AVM 项目挑战复杂产品制造模式进行了国家层面的实践，取得了良好的应用效果。与国外相比，我国在相关理论上做了一些研究，但在实践方面，国内还缺乏类似 AVM 项目这种规模性的实践应用。

本次论坛中，来自各个领域的专家对软件定义的制造业的相关概念、理论等也进行了大范围、跨领域的讨论，并提出了软件定义制造的相关体系性的论述，而国外在此领域成体系的研讨较少。

## 七、特色和创新

本次论坛的特点是多学科交叉、政产学研领域专家汇聚。来自信息与制造等领域的专家从各自背景出发畅所欲言、各抒己见，时有观点碰撞与辩论，高潮迭起。论坛近一半的时间用于自由发言和讨论，通过微信等方式现场实时收集听众意见与问题，形成良好的互动。演讲专家观点新颖、研讨氛围热烈活跃，特别符合中国科学院学部倡导的自由研讨、鼓励争论的理念，与会专家总结并凝练了该领域的现状，前瞻性地分析了该领域的发展趋势，并提出了相关建议，为未来的发

展明确了方向。

（作者：官琳，副教授，北京理工大学机械与车辆学院；杨春晖，研究员级高工，工业和信息化部电子第五研究所；谢克强，工程师，工业和信息化部电子第五研究所；陶波，教授，华中科技大学机械科学与工程学院）