

可计算制造白皮书 (2023 年)

中国科学院计算技术研究所

2023 年 7 月 26 日

一 前言	3
二 可计算制造的内涵	4
2.1 新型制造技术的现状和挑战	4
2.1.1 新型制造技术的现状	4
2.1.2 新型制造技术的挑战	5
2.2 可计算制造是制造的新范式	6
三 可计算制造的关键技术	9
3.1 可计算制造的硬件基础：工业智能计算机	9
3.2 可计算制造的网络架构：工业 5G 通信	12
3.3 可计算制造的数据体系：工业大数据	15
3.4 可计算制造的软件基础：工业操作系统	18
四 可计算制造的挑战与展望	21
五 参考文献	25

一 前言

数字经济浪潮席卷全球,政策层面,随着德国“工业 4.0”、美国先进制造、英国工业 2050、中国一带一路、中国制造 2025 等全球国家级战略部署, 驱动传统产业加快推动新一轮产业技术革命;技术层面,随着通用人工智能技术日渐成熟,边缘算力不断突破,工业各要素单位联网,形成以数据驱动、以模型推理、以软件定义、以算力保障、以网络为骨架的制造业 IT 和 OT 深度融合的技术趋势,有力推动制造业数字化转型,成为时代发展特色。

中国“十四五”规划纲要为制造业指明了方向:要加快补齐基础零部件及元器件、基础软件等瓶颈短板,推进制造业补链强链,改造提升传统产业,加快重点行业企业改造升级,深入实施智能、绿色制造工程,建设智能示范工厂,完善制造业标准体系,培育先进制造业集群,推动集成电路、航空航天、船舶与海洋工程装备、机器人、先进轨道交通装备、先进电力装备、工程机械、高端数控机床、医药及医疗设备等产业创新发展。

中国科学院计算技术研究所的智能计算机研究中心、网络技术中心、大数据中心、软件系统中心等部门的研究领域均为国家十四五战略规划中涉及的重点发展方向。中国科学院计算技术研究所国家战略规划为指导,依托中国制造业高地实践样本为基础,以 OODA (Observe 感知、Orient 判定、Decide 决策、Act 行动)为核心理念,以 IT (Information Technology 信息技术)与 OT (Operation Technology 操作技术)为技术路径,打造以计算为中心的产品全周期可计算制造解决方案,加快推动中国制造业算力化、数字化、网络化、智能化产业升级,推动建设可计算制造标杆与制造工厂,深入实施制造强国战略。

“可计算制造”是中国科学院计算技术研究所针对我国制造业产业升级提出的有效概念。“可计算制造”指出以 OODA 为核心思路,为制造业产品全生命周期提供数字化、智能化赋能。其中核心要素包含四个方面:

- (1) 通过算力底座为生产制造中的数据处理提供基础实时性、可靠性、稳定性保障;

- (2) 通过网络化实现数据互联、打破数据孤岛，信息全面共享；
- (3) 通过数字化将生产指标、生产流程可视化，保障数据结构统一，提供决策依据；
- (4) 通过智能化基于数据实现流程自主监督、自主决策，实现全流程综合优化，优化并加速企业决策进程。

本白皮书内容是所有编写团队在多年科研、实践工作中积累而成的，依托中国科学院计算技术研究所作为研究主体，撰写内容主要围绕三方面展开：

- 可计算制造技术方案：系统构建可计算制造，包含核心策略，技术路线，系统架构。
- 工业要素单元互连标准：构建可计算制造标准数据结构、设备通信标准
- 重点研发方向：指出可计算制造发展的 5 项关键技术

二 可计算制造的内涵

2.1 新型制造技术的现状和挑战

2.1.1 新型制造技术的现状

从全球自动化工厂到智能化工厂的转变过程中，主要有两个推动力：一个是柔性化生产的需求，例如消费升级带来多样化、小批量、快速迭代的生产需求；另外一个技术升级，智能化逐步扩展到各个行业和各个环节，在整个工业生产应用中，主要体现在利用智能化技术来改变“人机料法环”系统，打造智能化的工厂。

全球主要国家布局制造业升级。代表包括美国先进制造业国家战略计划，德国工业 4.0，法国“新工业法国”战略，日本制造业白皮书，英国制造 2050，中国智能制造 2025。欧美日韩等相对具备较好制造基础，较早开展了数字化、网络化、智能化落地。从未来发展看，智能化将引领制造业进入新阶段。

中国制造业从高速发展向高质量发展转型，我国目前仍处于“工业 2.0”后

期时代，质量基础相对薄弱，产业结构不平衡，资源利用率低，行业信息化水平低，劳动力成本上升，距离“工业 3.0”，即工业信息化还有待进一步普及。工业“4.0”（工业智能化）在示例化阶段，系统化解决方案仍在探索阶段。我国制造业细分领域众多，行业差别大，离散制造业比例较高（约 94%），重点体现在电子电器、工业装备、航空航天、汽车等，智能化升级需求巨大。目前我国大多数制造业水平仍处于较低阶段，表现为创新能力整体较弱，质量效益有待提高，制造业数字化、平台化、智能化、网络化渗透率较低。

目前，我国制造业 IT(Information Technology 信息技术)层与 OT(Operation Technology 操作技术)层间出现断层，出现控制为主、计算辅助的现状。且目前我国制造业已经落地的产业升级，主要集中在企业前端业务的数字化与网络化，即制造业 IT 化，对于数据的采集和管理，有一定基础。企业 IT 化已经落地工作主要围绕在产品设计、销售、企业管理等前端领域。然而，对于企业生产操作领域，基于数据的推理、计算、规划、以及终端的智能化控制，即 OT 化，仍处于早期阶段。目前的解决方案以离线编程的控制方式为主，生产端侧根据生产需求实时调整、规划能力较差。

综合上述，目前我国制造业整体智能化程度较低，呈现 IT 强 OT 弱的局面，停留在以控制为核心的传统制造形式。

2.1.2 新型制造技术的挑战

目前我中国制造业整体水平较低，主要存在以下技术挑战：

（1）尚未形成系统性指导方针，缺乏智造战略性规划与系统实施方案。多数企业尚未结合行业发展趋势和业务挑战考虑智能化能够为业务带来的价值以及如何系统规划以及切入。

（2）整体基础薄弱，创新研发体系不完善，核心技术对外依赖度高。与国外同行业制造业相比，我国企业在总体营业额、利润率、人均能效上均存在较大差距。部分单位信息化、数字化、智能化基础薄弱，创新力弱，关键技术与高端装备对海外依赖度高，创新体系不完善，研发投入营收比低，产品推陈出新乏力。

(3) 劳动密集型为主，一线员工占比高，高精尖复合人才少。我国制造业人口达 1.04 亿人，按 IFR 统计 1 机器人=3.3 个人计算，我国当前“机器换人”比例仅为 2.8%。大部分制造业，一线员工占大部分，缺少 IT 甚至 OT 的技术结合。此外，2025 年我国人工智能人才供需比达 1: 10，制造业人才储备匮乏。

(4) 数据结构、通讯协议、控制协议不统一。新型制造技术的快速发展导致技术标准和互操作性的缺乏。不同的技术供应商可能采用不同的标准和协议，导致通讯、控制冗余，成本上升。

(5) 进一步挖掘基于数据的决策、规划潜力。生产效率有待提升，周期性产能过剩多发，资产利用率低。众多传统企业想通过自动化或产线引入以提高生产效率的难度较大。企业数字化程度低，难以实现产能调控，优化生产计划。

(6) 信息孤岛有待打破，内外协同度低，评估和决策周期长。从销售预测到原材料采购、生产计划、生产状况反馈，尚未形成系统数字化、智能化平台或系统，生产评估后期长，决策以人工为主。

(7) 智能程度低。以机器人为代表自动化设备离线工作占比大。目前机器人以离线或示教方式部署，可高效完成单一重复任务，但智能化程度较低，当产品、生产计划调整，需企业停产，由专业工程师进行离线编程示教，调整机器人或自动化设备操作工艺，综合来看，成本高、门槛高、效率低、智能低。

2.2 可计算制造是制造的新范式

可计算制造是一种由数据、模型、网络、算力、软件共同组成的一体化智能系统，通过应用新一代信息技术、自动化技术、工业软件以及现代管理思想，实现制造企业全领域、全流程的系统化应用，推动制造业的智能化、高效化和灵活化。可计算制造的核心本质是实现 OODA (Observe 感知、Orient 判定、Decide 决策、Act 行动) 在产品全生命周期的全流程打通，实现端到端自动化、智能化。企业从市场调研、产品设计、压料采购、排产、生产、维护、监测、到交付本质是一个宏观的 OODA 环，即企业根据市场实时需求调整产品，根据产品变化实时调整生产流程，根据产品设计实时调整供应链配置。最终做到最小库存、最大

效率、最快响应。

实现可计算制造 OODA 环的核心思路是将 IT 和 OT 融合。依托计算，将数据、算法、数字化专家知识进行整合，实现从信息端到操作端全流程数字化、智能化，通过计算，精准把控产品全生命周期成本，如图 2.2.1 所示。

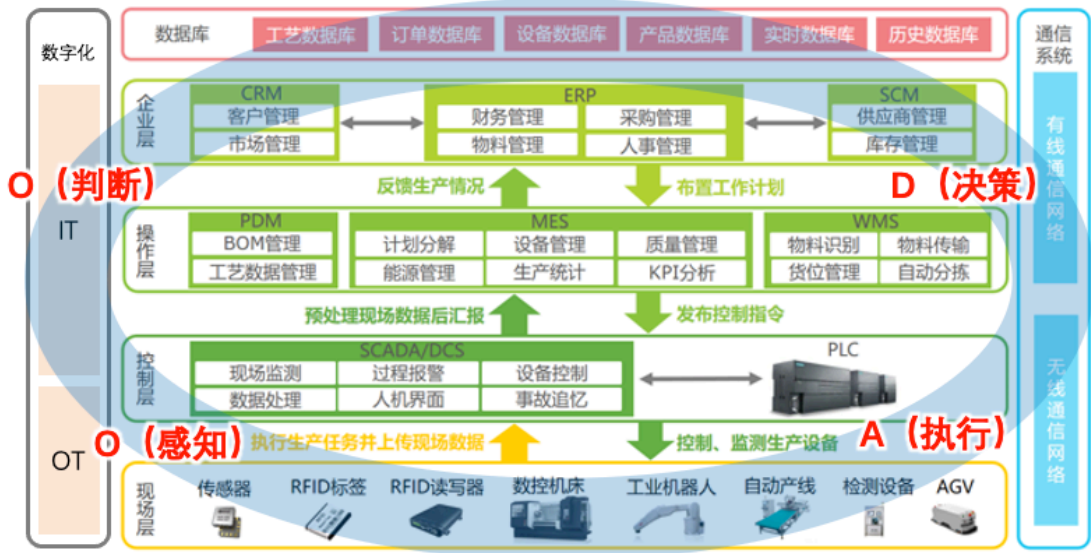


图 2.2.1 可计算制造的本质是 OODA 的打通，实现途径是 IT 与 OT 的融合

可计算制造的引入，将把以控制为核心传统制造方式，延伸到以计算为核心的新型制造范式中。当前制造业实现数字化的企业比例较小，此外，目前的制造业自动化更多处在“可看，不可用”信息流状态，SCADA、DCS 等具有非常好的采集和监控等功能，如何将信息端的数据采集、计算、分析决策映射到生产端侧自动化设备的具体操作，是目前制造业面临的核心难题。可计算制造将填补制造业 IT 与 OT 间的断层，实现 IT 与 OT 的融合，改变企业 IT 强、OT 弱的现状。可计算制造将使制造业实现市场分析、产品设计、销售、供应链管理、排产、生产、售后全流程可计算，打通信息流与操作流，实现感知、判断、决策、行动的智能生产闭环。以提高产品质量为核心，将生产效率、生产周期、生产成本、管理水平提升到新的水平。可计算制造将带来全新的制造范式。

（1）技术变革。当前制造业以控制为核心，即以 PLC、DCS、SCADA 为主的控制系统实现端侧设备控制。出现多样化品牌、多样化控制体系、单机单能的复杂控制架构，并且当前产品主要依赖国外技术和产品。通过引入工业智能计算机这一统一的计算底座和载体，在工业算力体系结构下，通过“计算定义工业”的“软

控制”技术路线实现一主多从、一机多能，将从技术底层进行替代，从而摆脱海外技术依赖性。

（2）组织变革。工业 5G 作为可计算制造的信息流管道，将对于多产线、多部门同步协调、优化。在于产品设计、生产、物流、销售、服务等业务环节实现互联互通，打破数据孤岛，充分显现数据价值，使生产资源得到最合理的配置和优化。对于生产设备进行全生命周期健康监测、预警，降低停机时间。对于计划变更，实时调整终端协同生产。

（3）生产变革。通过对数据的充分挖掘和工业操作系统，并指导生产计划将显著提升企业决策效率、准确性以及最大化资源利用率。对于生产，关键业务设备链接、数据采集、分析利用，并最终自动、高效、稳定的完成排产和生产执行；对于供应链，通过网络+数据+模型，在采购、仓储、物流、销售环节实现快速识别、精准获取、自动预警、精准营销，实现商流、信息流、物流、资金流的全过程、精细化、透明化管控。达到提升效率，降低成本，提高服务水平的智能决策。

（4）智能升级。传统机器人针对生产计划调整，需专业人员人工校准、示教、离线编程，企业需配合停产，出现机器人交互门槛高、成本高、高定制、智能低的局面。在算力、网络、数据、模型底层核心技术的驱动下，基于可计算制造端侧机器人及自动化设备将进一步提升智能程度。机器人将根据需求，通过数据查询、模型推理、算法分析实现柔性场景自主感知、规划、控制。基于 AI 的机器人将 7·24h 持续学习进化，应对新的场景、新的任务、新的工艺。

三 可计算制造的关键技术

3.1 可计算制造的硬件基础：工业智能计算机

2020 年国资委《关于加快推进国有企业数字化转型工作的通知》、2021 年国务院《“十四五”智能制造发展规划》明确提出工业智能是数字化到控制流的双向闭环，可计算制造要为 OODA 提供工业自动化现场的硬件算力平台与软件运行环境。按惯例，根据国际 IEC62264 标准，边缘数字化与自动化控制流均属于 L0-L2 层，包括了可编程逻辑控制器 PLC、运动控制器、工控机、DCS 控制柜、SCADA 服务器、工业网关和边缘服务器等硬件基础设施。按传统的产品定义，这些现场的基础硬件有三个特点：第一，本质上它们都属于运行单一控制程序的计算机；第二，性能较低，完成计算与控制需要多台计算机组成分体式的架构，例如，一台工控机+一台或多台 PLC/运动控制器；第三，长期被西门子、倍福、欧姆龙等国外厂商垄断，成本高，智能化升级受制约。

类似功能手机变成苹果智能手机、汽油车变成特斯拉智能汽车，工业自动化也朝着计算机化的方向发展。供给侧的变量在于新能源、智能制造、机器人等行业的应用计算更加密集复杂、机械精度更高，需求侧的变量在于类似手机和汽车，为支撑其繁荣的上层应用，必须要构建新一代的通用计算底座，覆盖了芯片、操作系统、编程环境等变革。而工业智能计算机（以下简称工智机）将计算面、控制面与硬件面解耦，通过国产商用芯片、双域操作系统和一型虚拟化技术，同时在一台计算机中实现了控制域的 PLC 控制、运动控制、DCS 控制、CNC 控制、机器人控制，和计算域的视觉、HMI、仿真、数据库、通信、AI 等桌面非实时应用。实现了 IT 与 OT 在基础设施层的融合，为 OODA 的感知、判定提供计算算力，为决策与执行提供控制算力，IT 与 OT 在工智机中融合为 OODA 环，使其代替 PLC、工控机、运动控制器、DCS、SCADA 等，“一机多用”成为可能，改变传统 IEC62264 金字塔架构。



图 3.1.1 工控机 SX20 与工控机 SX50

（以下图三为产品初代产品——工控机 CH20X 的图片和架构图，它对标德国倍福 CX2043 系列基于 PC 技术的嵌入式控制器，产品的差异化优势是“算控一体、全栈国产、硬实时、大算力”。NPU 采用中科寒武纪的思元 MLU220 人工智能芯片，16nm 工艺，4 卡并行，理论峰值提升至 32TOPS，它可以实现工业边缘端 AI 赋能；CPU 采用中科海光三号 C86 3331E 处理器，Zen 架构指令集，14nm FinFET COMS 工艺制造，最高主频达到 2.6GHz，4 核 8 线程并行；运动控制芯片采用中科院计算所智能机中心研制的大度 2.0 芯片，40nm 工艺，支持机器人逆运动学加速，支持 100 个自由度以上逆运动学求解，视觉感知帧率达到 Resnet18@60FPS；机器包含 BGA1515/DM1 芯片组、16GB 内存和 256GB CF 盘；包含丰富的 IO 接口 2*100/1000BASE-T (X)、VGA、4*USB3.0、1*RS232/422/485、1*CAN、1*CFast）

工控机是新一代工业现场的算力底座，实现了计算机化的自动化。第一，工控机支持工业逻辑控制和运动控制，IDE 开发环境集成了 Soft-motion、Basic(CAM)/CNC/Robotics 等控制库、OPCUA/DA 数据服务，支持主流工业总线 Modbus、EtherCAT、Profinet、Profibus DP、CANOpen、Ethernet/IP，运行时环境支持 soft-PLC 和 soft-motion；第二，工控机支持智能应用，包括 ONVIF、RTSP/RTMP 协议的视觉摄像头，支持自动学习、迁移学习、小样本学习、边云协同重训练，具备轻量化工具链 AI 加速；第三，工控机支持边缘计算技术，支持数据采集、数据存储等数据应用，可预装设备看护诊断系统 Instaguard、生产决策辅助系统 MesApps、视觉看护跟踪系统 SparkCV、机械臂模块感控系统 Octo 四款工业 APP，支持边缘微云。如图 3.1.2 所示，上世纪七十年代开始一直到本世纪初，OT 的计算机硬件呈现的趋势还是一机一用，分体架构，而工控机利用 OODA 融合的思路，打造 IT+OT 的算力底座，解决 IT 与 OT 融合难，互相干扰，成本高，可靠性等一系列关键问题。

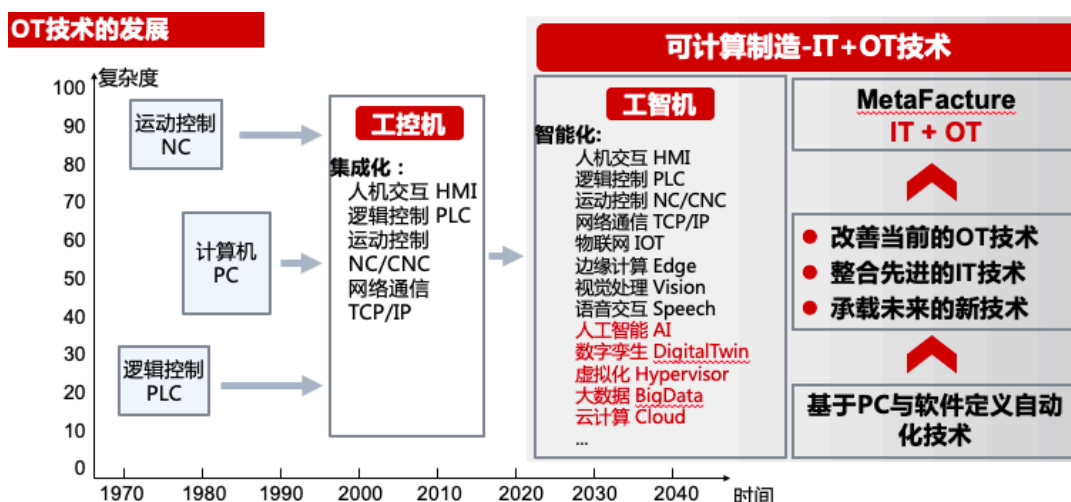


图 3.1.2 工业智能计算机将 IT 与 OT 融合

工业智能计算机的核心技术壁垒，除了异构国产芯片组和混合编程 IDE 外，最重要的是国产虚拟化与双域操作系统技术。团队首次提出国产工业虚拟化架构率分工业虚拟化技术，如图 3.1.3 所示，包括虚拟槽管理技术、细粒度容器引擎技术和基于共享内存的信道通信技术，运动控制周期性能可以达到 50us/cycle，低抖动延迟，优于传统架构两个数量级；一类应用绑定一个物理核心，通过共享内存通信，支持工业总线兼容性，实现快速总线数据交换彻底替代工业物理总线。虚拟化技术实现了工业智能计算机具备算控一体的能力，非实时操作系统可以执行人机交互 HMI、人工智能运算、Motion/DCS/SCADA 等数据服务和编程环境 IDE 等等桌面应用；实时操作系统可以同时运行多个软 PLC、软 DCS、软运动控制和软 CNC 程序，双系统充分隔离，既保证工业自动化硬实时又保证工业边缘计算算力需求。

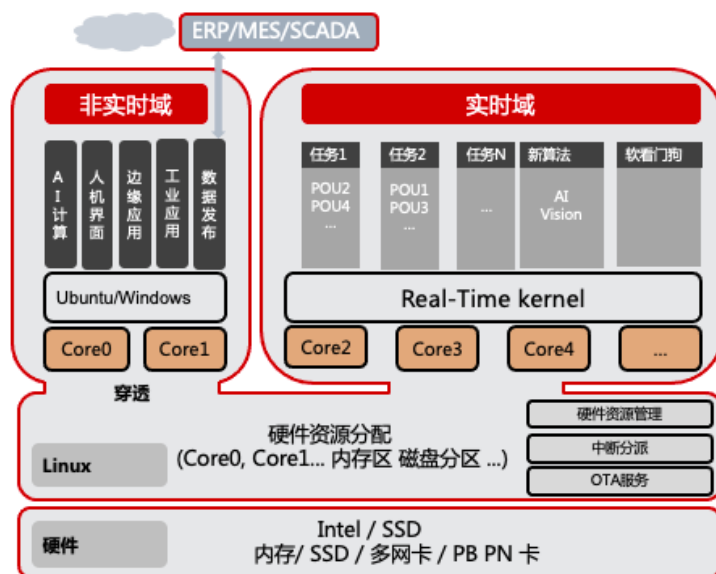


图 3.1.3 一型虚拟化与双域操作系统

3.2 可计算制造的网络架构：工业 5G 通信

为了实现对生产全过程的可计算控制管理，需要连接生产过程中人、机、料、法、环等各要素，构建全连接网络。一方面，需要融合 IT 和 OT，打破不同要素间的信息交互壁垒，为不同要素之间提供灵活可变连接，适配不同的制造操作或任务。另一方面，由于当前 OT 主要采用以太网等工业有线网络进行操作控制，灵活性差，需要引入工业无线技术来推动柔性制造，去除产线上各机器设备的有线束缚，灵活按需快速调整产线，满足个性化定制服务。

目前已经有多种无线通信技术用于工业无线网络中。例如，Wi-Fi 6 技术应用于小范围的工业场景，提供多设备同时连接和大带宽数据传输；蓝牙技术可为工业设备间的短距离低速率数据传输；Zigbee 技术可提供较大规模的传感器网络远距离通信。但是这些技术仅能应用于极小部分的工业场景，无法支持低时延高可靠的 OT 现场控制通信。而且这些技术共享非授权频段进行通信，其在复杂工业环境下的通信性能稳定性表现很差。随着 5G 技术的发展，5G 现可支持 1ms 的端到端时延和 99.999% 的可靠性，可用于工业运动控制场景。未来 5G 技术将继续演进，面向更严苛的工业应用需求，融合计算、感知、通信，提高低时延高可靠服务能力，以满足大多数的工业实时控制场景。而且，目前工信部已经发放 5G 专网频率许可，用于建设制造业等行业的专频专网。因此，工业 5G/B5G 技术广受关注。

由于 5G 技术可同时支持大带宽、大连接、低时延高可靠传输，工业 5G/B5G 被认为是实现可计算制造 IT 和 OT 融合，增强 OT 无线化和柔性化的关键技术。如图 3.2.1 所示，可基于工业 5G/B5G 构建面向可计算制造 IT/OT 的全连接网络。该网络架构是集中式与分布式相结合的。面向 IT 生产管理、企业办公、OT 车间级通信，可采用基于 5G/B5G 基站的集中式接入方式；面向工业制造现场控制，可采用基于 5G/B5G 基站或星闪短距的集中式接入与基于 5G/B5G 分布式设备直连（Device to device, D2D）混合接入方式。如上所述，IT 网络和 OT 网络都基于 5G/B5G 通信，与目前 IT/OT 网络协议标准林立不同，有望打破 IT/OT 互通壁垒，支持 IT/OT 融合演进。

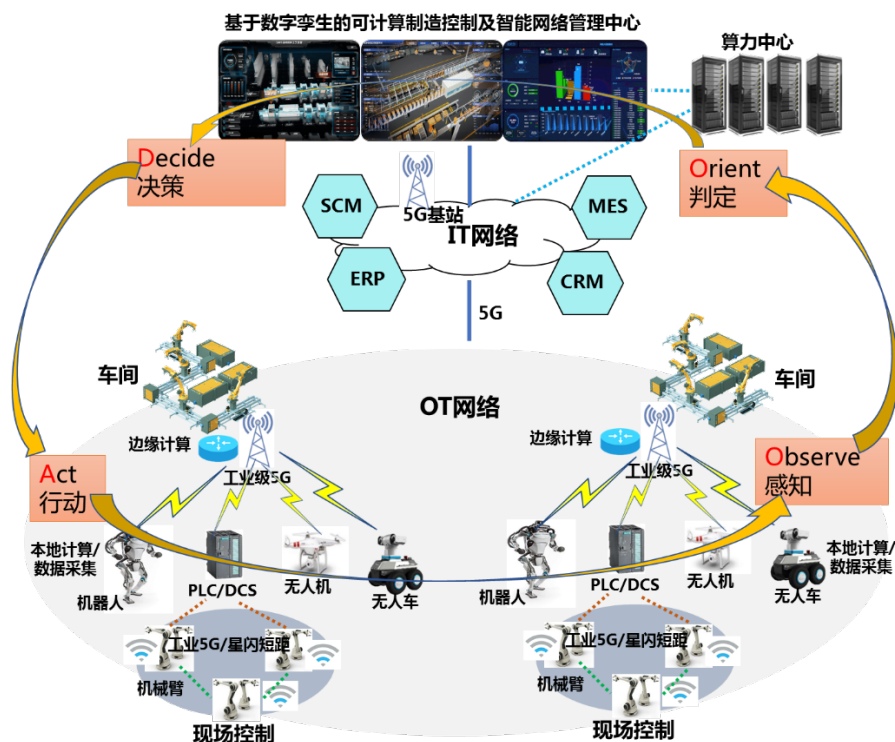


图 3.2.1 基于工业 5G/B5G 的可计算制造网络架构

为了满足可计算制造柔性生产引入的动态变化的通信需求，需构建基于数字孪生的可计算制造控制及智能网络管理中心（下面简称“数字孪生管控中心”），聚集全网可计算制造大数据，通过对可计算制造全过程的推演，动态管理生成所需无线网络，实现灵活组网与柔性连接。在信息互通的基础上，协同调配网络中的通信感知计算控制资源，为可计算制造 OODA 提供感知、边缘计算、云边缘计算协同、实时控制等能力。进一步地，协同工业 5G/B5G 中长距与星闪短距通信技术，为工业控制提供高可靠低时延通信（ultra-reliability and low latency communication, URLLC）传输，有效替代并去除有线束缚，支持生产要素的灵活调整。因此，面向可计算制造的工业 5G/B5G 网络，需要分别从智能网络、资源管理、URLLC 传输增强等三个方面关键技术展开研究：

（1）基于工业 5G/B5G 的可计算制造智能网络技术。面向可计算制造柔性生产，不同产线不同制造过程对通信网络连接和性能保障提出不同的需求。与面向消费的无线网络不同，可计算制造无线网络需要满足工业制造低时延、高可靠、大连接等严苛的通信需求。根据数字孪生管控中心对可计算制造的推演需求，需研究对各个工业制造过程的通信网络需求表征方法，如时延、可靠性、带宽等服务质量。然后，研究意图网络技术，将通信网络需求转译为网络架构连接策略，

并研究工业软件定义网络（software defined network, SDN）技术,实现在实时性、可靠性、大带宽等工业约束下的网络连接拓扑统一管理编排。进一步地,研究实时性、可靠性、大带宽等工业约束下的组网技术,包括频率资源规划、接入节点部署密度等,满足无线接入侧高并发通信传输需求。最后,研究业务无感的数字孪生智能网络运维管理技术,基于可计算制造大数据智能预测网络通信状态与通信能力变化,实时调整网络配置,保障工业制造网络的超高鲁棒性。

（2）OODA 感通算控资源协同技术。可计算制造将复杂异构的工业系统模块映射在数字空间,利用基于数字孪生的控制及智能网络管理中心对网络中的感通算控异构资源进行智能调配,实现产品制造过程的数字化运作及 OODA 闭环管理。然而,感知、通信、计算、控制各元素相互耦合与制约,且现有资源管理方法适应性差、资源利用率低,亟需高效的资源协同技术。因此,首先需要从时间尺度、存续形式等角度阐释感知、通信、计算、控制多元素特征及关键性能指标,揭示其内在协同机理;同时,依托大数据及人工智能技术,在控制及智能网络管理中心对工业系统中用户与业务需求、数据特征、网络状态等进行训练学习,掌握信息流的时空演化态势规律,进而指导生成高效的资源管理策略,提供灵活智能的控制决策能力,实现可计算制造 OODA 闭环管理。

（3）面向工业控制的增强 URLLC 无线传输技术。面向工业控制,可计算制造系统要求无线网络空口时延小于 $20\ \mu\text{s}$,端到端时延小于 1ms ,可靠性不低于 99.9999%。现有 5G URLLC 标准支持 1ms 空口时延和 99.999%的可靠性,星闪无线短距通信技术支持 $20\ \mu\text{s}$ 的极低空口时延和大于 99.999%的极高可靠性,但组网能力有待增强。因此,现有无线传输技术尚未能满足可计算制造的需求。未来可计算制造无线传输可深度融合 5G 中长距通信与星闪短距通信,结合 5G 高并发传输优势以及短距极低时延传输优势,增强 URLLC 传输能力,同时结合时间敏感网络（time-sensitive networking, TSN),提供精确同步、低时延抖动、确定性传输等能力。面向多样化的可计算制造场景和业务类型,增强 URLLC 将支持帧结构、双工方式、信息流优先级等参数的灵活配置,提供定制化的时延、同步精度和可靠性能力。

面向可计算制造的全连接通信网络将有效打通生产过程中各要素之间的信息壁垒,实现各生产要素之间的灵活组网与柔性连接;基于 5G 和星闪通信优势,

提供大带宽、低时延、高可靠等通信能力，突破传统方法适应性差、资源分配效率低等技术瓶颈，使得工业制造的全部流程均具备状态可预知性、通信可确定性和计算可控性，为工业系统的数字化运作及 OODA 闭环管理提供网络支撑。

3.3 可计算制造的数据体系：工业大数据

工业大数据是指在制造过程中产生的大量数据，包括来自传感器、设备、生产线、供应链等各个环节的数据，涵盖了生产过程中的各种参数、状态、性能、质量等信息。随着工业制造进入智能化新时代，工业大数据将成为推动制造业创新发展的重要基础：一方面，通过实现贯穿产品设计、生产、管理、仓储、销售、物流、服务等全部流程和环节的大数据采集、存储、管理和分析，对生产销售服务过程中的关键指标、设备状态、产品质量等方面实时监测和控制；另一方面，工业大数据可以通过应用数据挖掘、机器学习和人工智能等技术，挖掘隐藏在数据中的潜在规律和隐含价值，实现产品设计优化、生产过程优化调整以及供应链的优化协同等目标。

近年来，工业大数据相关技术在不断演进与发展，呈现出算法专业化、场景可视化、模型自动化等趋势。（1）分析算法的专业化：在大数据技术领域通用算法的基础上，不断构建工业领域专业的算法，满足企业对工业数据分析结果高置信度的要求。（2）数据工业场景的可视化：通过数据和 3D 工业场景的可视化呈现，将数据结果直观地展示给用户，增加工业数据的可使用度。（3）模型自动化：工业全链条的数字化建模和深化工业大数据分析，将各领域各环节的经验、工艺参数和模型数字化，形成全生产流程、全生命周期的数字镜像，并构造从经验到模型的机器学习系统，以实现从数据到模型的自动建模。总体来看，工业大数据将成为可计算制造体系的核心资源与引擎，深入挖掘大数据的建模及优化潜力，以专业算法为基石组件，以云边端协同为基础技术路线支撑的可计算制造技术体系，将使得工业智能的服务场景深入到各个领域并更加具体与实际。

在此过程中，工业大数据技术仍然面临一系列挑战性问题，需要以成本效益为前提进行开创性研究探索和优化。首先，工业大数据底层的数据采集汇聚阶段，

面向多种业务角色，数据来源多样，数据的质量、时效、格式差别明显，亟待研究工业数据体系的标准化、构件化，实现数据的自我表征和自主协作的同时，提升数据融合处理的质量和效率；其次，智能制造涉及的环节多、领域广，其中数据的全域关联完整性、互操作能力的灵活性决定了智能制造多环节的精准性，亟待数据标准化、构件化的基础上，研究智能制造各个领域多模态数据的全域关联、自发编织、灵活互操作技术，形成面向智能制造应用需求的完整灵活的数据支撑；最后，工业大模型可以为智能制造的各个环节提供精准高效的决策能力，工业大数据为大模型的适应性训练提供了丰富的高质量数据，亟待探索研究大模型与智能制造领域的迭代优化机制与能力。

针对上述挑战问题，面向可计算制造的工业大数据处理平台拟通过多元异质数据标准化表征、高质量的数据广谱关联以及高度自动化构建的数据智能服务，在可计算制造的生产过程自动化和生产管理智能化中发挥积极作用。总体框架如图 3.3.1 所示，主要通过以下三个关键技术实现制造业数字化转型、智能化升级：

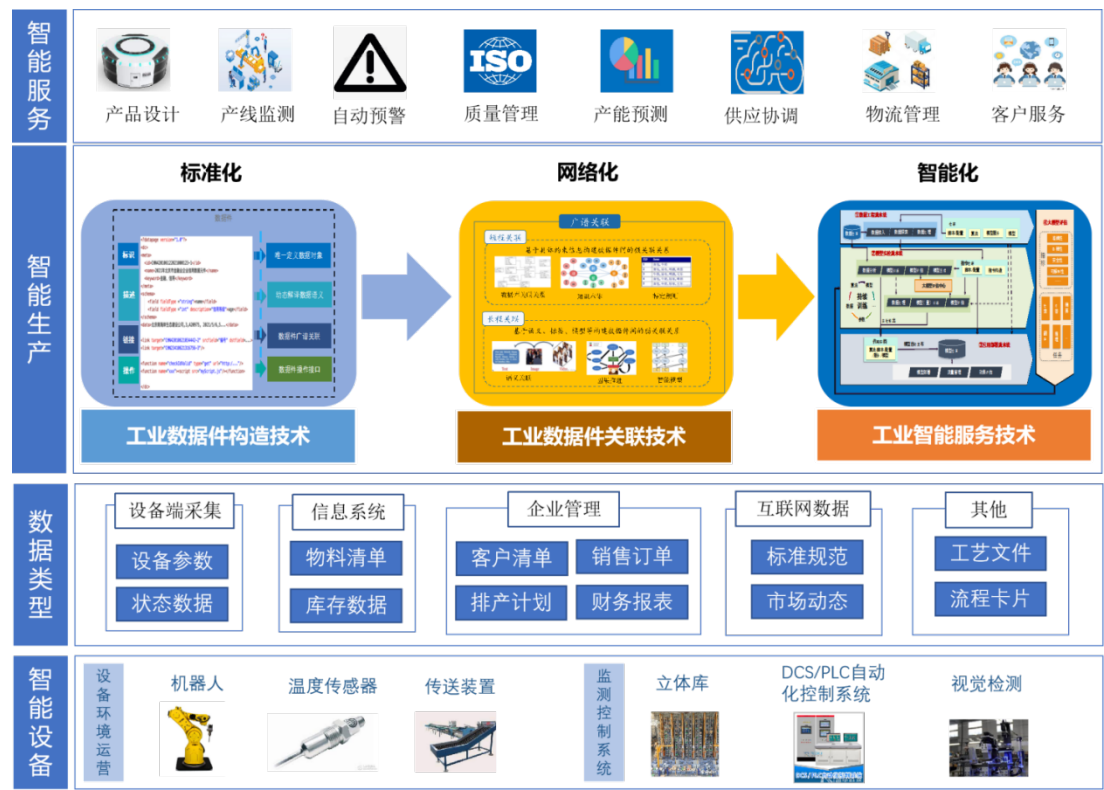


图 3.3.1 可计算制造中工业大数据处理平台总体框架

(1) 工业数据件构建技术：工业数据件是工业数据进行标准化封装的基本粒

子，是异质多源数据进行分享、加工及分析的基本单位。针对多元异质工业设备传输及解析协议多样，难以统一处理的问题，统一工业制造的数据要素，降低数据标准化成本。工业数据件构建技术是数据标准化的一种实现方式，其面向制造业生产链上下游数据资源多源异质的特点，针对来源广、类型多、格式不统一、传输协议多样导致难以快速共享、流转、高效融合处理的问题，通过将工业数据规范化、要素化、标准化形成可计算制造数据要素基础元件“数据件”的标准表征形态，实现数据接入与数据应用的解耦，方便数据的分享及流转。其中，通过数据件描述语言从标识、描述、关联关系以及接口等多维度实现数据件的标准形态的统一表征；通过数据件统一持久化语义标识方法实现数据的快速定位；通过多索引融合和增量数据存储技术，实现存储内容复用，减少磁盘占用，最终加速数据检索效率。

（2）工业数据件互联技术：针对制造数据孤岛，导致数据价值难以关联利用的问题，通过数据广谱关联、深度融合，使工业数据要素的价值得以放大和发挥。工业数据件互联技术针对数据价值分散，难以形成有效价值关联的问题，结合数据件所实现的统一接入能力，通过广谱关联及数据互操作技术，探索多维度、多类型数据关联及操作方法：分析同模态数据的属性特征，构建同模态数据的预处理、横向预关联预连接技术，形成分散数据的关联广度延伸能力；面向业务需求构建多模态、长时域属性数据间的自发纵向连接与编织技术，结合智能模型，建模多模态数据的纵向演化关系或纵向时域关系的动力学模型，形成全域横纵双向互联互通的数据关联组织体系。在此基础上，基于立体双向的数据编织网络，实现数据间直接或间接的互操作算子库，支撑多种跨域关联的数据分析服务。

（3）工业数据件智能服务技术：针对工业制造中数据、经验、知识沉淀并转化为应用的问题，基于工业大模型高效训练调优与部署应用技术，实现数据的智能化服务。工业智能服务技术针对数据、经验、知识难以快速转化为应用的问题，基于工业大模型开发运行平台，快速将生产、供应链、质量等领域数据转化成智能化服务：利用自动化指令构造技术，将原始数据快速重构成大模型训练所需的指令集，赋能制造业大模型的快速迭代优化；通过将工业智能模型敏捷部署成应

用服务，接入产线实时数据，可实现生产质量预测、设备健康评估、产能预测，辅助生产决策，快速产出价值；通过整合操作指导书和处理异常经验等信息，形成知识库，构建基于自然语言交互的大模型智能问答服务，提供工业领域的工程设计、员工培训、技术支持和客户服务等各维度专业知识。

通过以上关键技术，实现可计算制造数据的统一标准化，将多源异构数据接入与数据应用解耦；实现可计算制造数据的全域关联操作，为上层应用提供数据服务；利用由数据驱动的工业大模型，快速定制化应用服务以优化制造企业的生产经营流程。最终为可计算制造的生产制造、供应协调、物流管理、质量管理等生产经营阶段实现数字智能化，提高生产效率，辅助决策，为行业赋能。

3.4 可计算制造的软件基础：工业操作系统

随着制造业的快速发展，制造业结构更加复杂化，产品也越来越精细化和多样化，这种变化使得产线和设备产生了大量的信息流，制造过程与管理过程的信息量也急剧增加，现有的制造体系难以高效处理海量的信息，生产设备的交互、制造过程的管理出现困难，工业智能技术能够整合各类信息，实现生产过程的智能化、协调化，能够实时监测设备状态和生产情况，对生产过程进行预测和调整，从而提高生产的灵活性和适应性。而可计算制造是一种由数据、模型、网络、算力、软件共同组成的一体化智能系统，其目标是实现实现制造企业全领域、全流程的系统化应用，推动制造业高效灵活发展，因此，工业智能和可计算制造体系在不同层面上相互交织、互为支撑。工业智能作为可计算制造的核心技术，提供了必要的数据分析能力，使得可计算制造能够更好地理解和优化制造过程。

工业操作系统是随着信息技术和工业自动化的发展而逐步演进的。在过去的几十年中，工业自动化系统逐渐从传统的硬件控制逻辑转向以软件为核心的数字化控制，从而催生了工业操作系统的发展。现代工业操作系统是一种面向制造业的软件系统，其核心目标是实现对制造过程的全面控制和智能化管理。

在可计算制造体系中，工业操作系统扮演着关键角色。可计算制造强调以计算定义制造的思想，通过数字化技术和信息化手段实现制造全过程的数据采集、

分析、决策、执行。工业操作系统作为实现数字化智能化控制和管理的基础，为可计算制造提供了基础底座。工业操作系统的总体思路源于对制造过程的信息化需求，以及对生产效率和产品质量不断追求的动力。从可计算制造的角度来看，工业操作系统的总体思路是通过数字化和智能化技术实现制造环境中各个节点的连接，将制造过程转化为数据和信息的流动。

如图 3.4.1 所示，可计算制造体系下的工业操作系统整体上分为三层结构，首先利用可计算抽象，在信息空间抽象出生产设备、人力、加工材料等物理实体的抽象模型，作为可计算制造操作系统中的可计算实体。为了模拟物理实体的交互，需要对可计算实体定义工业制造中的通用属性和基础操作，动态构建生产制造过程的可计算模型，形成对整个制造流程的映射。其次内核层是整个系统的核心，承担调度中枢的职责。完成同一制造任务的可计算实体在系统内组成一个进程。物理实体的参数和动作被抽象成可计算实体的属性和函数。可计算实体在生产制造过程中对原材料进行加工制造的行为，在系统中被映射为进程对数据的计算过程。通过这种方式，将信息底座系统中的进程与生产制造过程进行对应，以操作系统管理和控制进程访问计算资源的方式，来控制和管理生产制造过程的制造行为。将异构系统的生产制造管理统一在可计算制造的框架下进行面向生产制造过程对进程定义控制指令、交互指令、计算指令等指令集，形成内核的进程控制、管理等模块。物理设备以类似驱动的方式对接系统，实现对具体设备的精确控制和感知的同时对上层应用屏蔽了底层物理设备的异构性。顶层负责数据协同与应用，基于抽象层与内核层对可计算实例进行管理。利用制造相关的数据训练面向控制、调度、预测等任务的制造业交互式预训练模型，并作为系统的接口，为企业提供更加智能的优化方案供企业进行调用。通过大数据分析、多任务训练等方法，实现从局部智能到全局智能的转变。

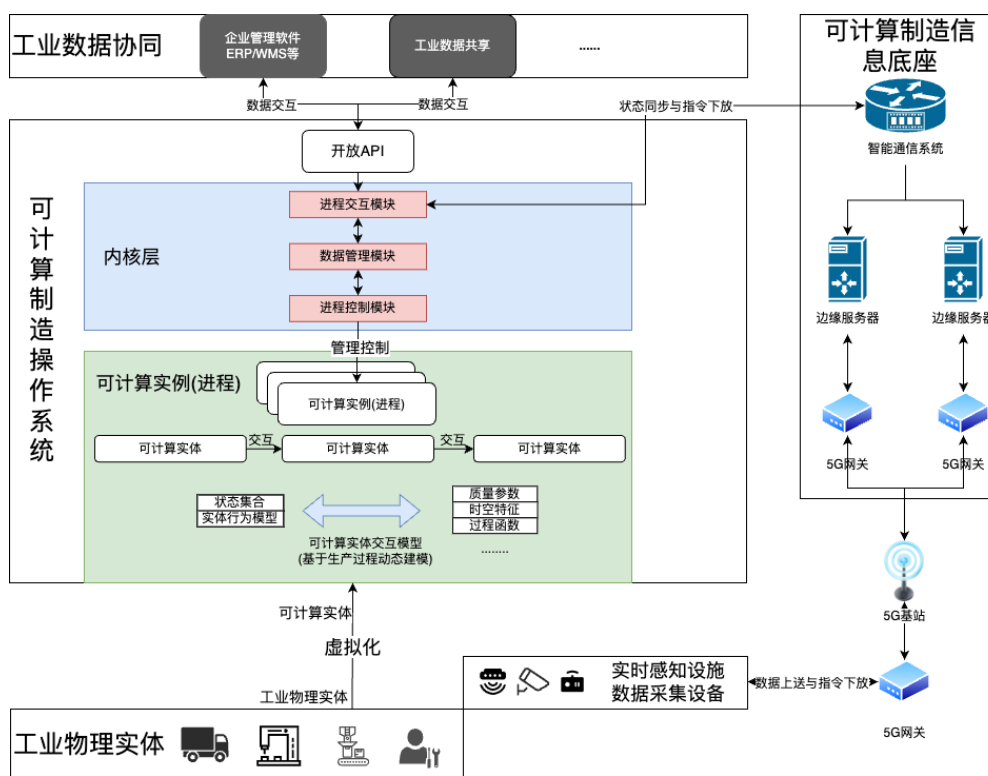


图 3.4.1 工业操作系统三层结构：实体抽象层，内核调度层，应用层

工业操作系统依赖于以下三项关键技术：

（1）可计算抽象建模：核心是通过计算的方式对生产制造过程进行抽象，将生产制造中产生的问题统一到计算的维度，屏蔽制造过程的复杂性。

（2）ITOT 融合：包括传感器技术、通信技术、实时调度等，实现对制造过程中的各类数据进行实时采集和传输。确保工业操作系统对制造过程的快速响应和实时控制。

（3）大规模人工智能：包括数据挖掘、人工智能算法等，逐步实现由局部的制造智能迈向全流程、全产业的通用制造智能。核心要领如下，a. 人工智能进行工业辅助决策，并提供人机交互接口，在利用人工智能在解决通用性问题的基础上，辅以工程师的灵活性。b. 通用性，可适应不同生产规模的智能调度算法。无论是根据市场信息制定生产计划，还是对生产流程排布。这是为了适应定制化，可重构的生产车间。c. 数字工业互联。一是利用市场其他工业的信息或新公布的高效生产方式，对本工业生产计划修改或改进生产流程。二是生产合作，在经过时间的检验后，才能指定新的工业生产标准。为了加速这一过程，利用现有的大模型技术和工业互联平台磨合不同工业体系下的产品，先构造抽象意义上的统一

生产生态环境，再逐步利用统一的工业生态占领市场。4. 智能系统的可解释性与可监督性。可解释性意味着安全性，可交互性，对于靠近实际生产的流程尤为重要。可监督性是为了人为控制，并且将非机密信息公开化。5. 可扩展性。这要求构建公开的工业知识图谱，可自主学习的决策系统，调度系统。

工业操作系统通过数字化、抽象化、模型化生产关系，将最终能够改善生产效率和产品质量。通过 ITOT 融合的方式，实时数据采集和分析，生产过程中的异常情况可以得到及时发现和处理，降低了生产故障率，提高了生产效率。同时，工业操作系统的智能决策和优化能力，使得制造过程更加灵活和可靠，提高了产品的一致性和质量。此外，工业操作系统能够推动制造业向可计算制造的转型，加速数字化制造的普及和推广。整体而言，工业操作系统在可计算制造中的定位不仅是提供数字化控制和管理的基础底座，更是推动制造业实现智能化和高质量发展的重要驱动力。

四 可计算制造的挑战与展望

可计算制造是指在制造业中应用信息技术和计算机科学方法来优化生产过程、提高生产效率和产品质量的新兴制造模式。然而，当前可计算制造在实践中还存在一些关键问题。本文将对可计算制造落地中存在的问题进行详细分析，并探讨其原因。

1、缺乏体系化的产品分层

可计算制造的核心是基于 OODA 建立计算定义制造的生产体系，通过数字化和智能化技术实现全生命周期的产品设计、制造和维护，然而很多企业在实践中存在缺乏体系化的产品分层。这导致产品的设计、制造和维护各个阶段之间缺乏有效的信息共享和交流，影响了制造过程的整体优化效果。这一问题的原因主要包括以下几点：

（1）组织结构分隔：很多企业在传统的制造模式下形成了划分明确的部门和岗位，各个部门之间存在信息壁垒，导致信息难以跨部门传递和共享。

（2）数据标准化不足：缺乏统一的数据标准，导致不同部门或系统间的数据

格式和语义不一致，进而影响了信息的集成和分析。

(3) 技术架构不匹配：现有的信息系统可能是根据传统制造模式设计的，难以满足可计算制造的需求，导致信息无法有效地进行跨系统集成和流动。

针对这一问题，未来需要企业建立完善的产品数据管理体系，实现产品全生命周期的数字化管理。推动企业组织架构向扁平化和跨职能合作转变，建立信息共享的文化。制定统一的数据标准和交互协议，促进数据的一致性和互操作性。更新信息技术架构，引入可计算制造所需的信息系统和工具，实现信息的全面集成和共享。

2、缺乏互连互通的标准

在可计算制造中，涉及到各种设备、系统和软件的互联互通，但由于缺乏统一的标准，不同厂商生产的设备和系统之间往往无法实现无缝连接，导致信息孤岛和数据孤立问题。主要原因包括：

(1) 标准缺失：在新兴技术发展的初期，还没有形成统一的行业标准，导致不同厂商采用各自的技术和协议，难以实现互联互通。

(2) 技术更新换代快：新的技术层出不穷，标准化跟不上技术的发展，导致标准失效或难以适应新技术。

未来要通过加强行业组织和政府主导，推动建立统一的标准体系。鼓励厂商参与标准的制定和推广，采取激励措施促使企业遵循标准。建立开放式的技术交流平台，促进不同技术间的合作与整合。同时，加强标准的动态更新，确保其能够适应技术的快速变化。

3、缺乏实验性基础设施比如中试线进行验证

在可计算制造落地的过程中，很多企业缺乏实验性基础设施来对新的技术和流程进行验证和优化。这导致很多先进的可计算制造理念难以得到验证和推广。从企业的角度来说，原因有以下几点：

(1) 缺乏体系化的理论指导：缺乏深入的理论指导，难以确定如何建立和操作中试线，以及如何有效地进行验证。

(2) 技术不成熟：在可计算制造初期阶段，很多技术还处于探索和发展阶段，

缺乏成熟的技术和经验支撑。

未来要加大对可计算制造发展的支持力度，鼓励企业开展科技创新和试点项目，提供资金和政策支持。推动行业联合建设共享实验基地，降低企业单独建设的成本压力。同时，加强与高校和研究院所的合作，充分利用现有的科研资源和实验设施，促进可计算制造技术的验证和推广。

尽管可计算制造在实践中面临一些问题，但随着信息技术和计算机科学的不断进步，可计算制造仍然具有广阔的发展前景。

可计算制造的未来的发展方向包括：

（1）协议融合设计：面向可计算柔性制造，未来主要需要增强工业 5G/B5G 在可计算制造 OT 系统中的应用，统一 IT/OT 网络技术，实现 IT/OT 真正的融合。对此，需要不断增强工业 5G/B5G 的 URLLC 能力。URLLC 能力在实际系统中的实现，不仅仅取决于物理层点对点传输技术的创新，仍需结合通信协议接入网的媒体接入层、资源管理层，以及核心网信令控制、数据流管理进行跨层融合设计，在系统层面上实现端到端的低时延高可靠。

（2）多任务优先级调度：面向可计算制造的工业现场控制，各任务对低时延高可靠的需求具有差异性。针对高并发多优先级任务，在有限的网络通感算资源约束下，设计简化的多任务优先级队列与调度策略，精简控制交互，保障高并发的关键性控制任务性能。

（3）基于工业数据互联的协同制造：工业产品设计、生产、物流、销售、服务过程中的各种传感器、设备和信息系统产生大量数据。基于工业数据件技术将各厂商的异构数据进行标准化，并通过广谱关联技术将供应链上的企业和合作伙伴的数据进行关联分析，使生产资源得到合理配置与柔性调度，帮助企业自动优化生产流程，在增强制造企业灵活性和应变能力上发挥重要价值。

（4）基于大模型技术的工业智能体：基于大模型技术构造工业智能体，使其具有更高的自身技能认知能力和复杂任务执行能力。接入供应链、订单、设备、产品的实时与历史数据，构建覆盖现场层、控制层、操作层与企业层的数字网络。形成产品设计、产线监测、质量评估、产能预测等一系列工具模型，提高产品全

生命周期的感知分析、规划优化和执行控制能力，推动智能制造产业升级。

（5）认知工业智能： 认知工业智能是指赋予工业系统更强大的认知能力，使其能够理解、分析和适应不同环境和情境。涉及更先进的人工智能技术，如自然语言处理、情感分析和情境感知等。通过将人工智能引入到制造过程中，系统能够更准确地理解操作员的指令、分析设备的状态和预测生产的需求。这种智能能力将促使工业系统更灵活、更自主地响应变化，从而实现更高效的生产计划和资源分配，进而实现柔性制造。

五 参考文献

- [1] 《中国制造 2025》 发行者：国务院 发行年份:2015 年
- [2] 《“十四五”智能制造发展规划》发行者：工信部 发行年份：2021 年
- [3] 《中国智能制造产业发展报告》发行者：中国高科技产业化研究会 发行年份：2023 年
- [4] 《“十四五”机器人产业发展规划》发行者：工信部 发行年份：2021 年
- [5] 《2022-2023 年中国工业互联网市场研究年度报告》发行者：赛迪顾问 发行年份：2023 年
- [6] Kusiak, A., 2023. Smart manufacturing. In *Springer Handbook of Automation* (pp. 973-985). Cham: Springer International Publishing.
- [7] Leng, J., Wang, D., Shen, W., Li, X., Liu, Q. and Chen, X., 2021. Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. *Journal of manufacturing systems*, 60, pp.119-137.
- [8] Lu, Y., Xu, X. and Wang, L., 2020. Smart manufacturing process and system automation—a critical review of the standards and envisioned scenarios. *Journal of Manufacturing Systems*, 56, pp.312-325.
- [9] Mittal, S., Khan, M.A., Romero, D. and Wuest, T., 2019. Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 233(5), pp.1342-1361.
- [10] 单子丹, 邹映 and 李雲竹, 2019. 基于云计算的服务型制造网络流程优化与决策模型. *计算机集成制造系统*, 25(12), p.3139.
- [11] 宋纯贺, 曾鹏 and 于海斌, 2019. 工业互联网智能制造边缘计算: 现状与挑战. *中兴通讯技术*, 25(3), p.50.

- [12]刘强, 2020. [制造前沿] 智能制造理论体系架构研究. 中国机械工程, 31(01), p.24.
- [13]Li, X., Wan, J., Dai, H.N., Imran, M., Xia, M. and Celesti, A., 2019. A hybrid computing solution and resource scheduling strategy for edge computing in smart manufacturing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(7), pp.4225-4234.
- [14]Rai, R., Tiwari, M.K., Ivanov, D. and Dolgui, A., 2021. Machine learning in manufacturing and industry 4.0 applications. *International Journal of Production Research*, 59(16), pp.4773-4778.
- [15]Lin, C.C., Deng, D.J., Chih, Y.L. and Chiu, H.T., 2019. Smart manufacturing scheduling with edge computing using multiclass deep Q network. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(7), pp.4276-4284.
- [16]工业互联网产业联盟. 5G 全连接工厂建设白皮书. 2022 年 10 月.
- [17]Y. Qi, Y. Zhou, Y.F. Liu, L. Liu, and Z.G. Pan, “Traffic-Aware Task Offloading Based on Convergence of Communication and Sensing in Vehicular Edge Computing”, *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 24, pp. 17762-17777, Dec. 2021.
- [18]Y. Qi, L. Tian, Y. Zhou, and J. Yuan, “Mobile Edge Computing-Assisted Admission Control in Vehicular Networks: The Convergence of Communication and Computation,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 1, pp. 37-44, Mar. 2019.
- [19]Q. Cai, Y. Zhou, L. Liu, Y. Qi, and Z. Pan, “Collaboration of Heterogeneous Edge Computing Paradigms: How to Fill the Gap between Theory and Practice,” *IEEE Wireless Communications*, 2023, early access.
- [20]Y. Zhou, L. Tian, L. Liu, and Y.L. Qi, “Fog Computing Enabled Future Mobile Communication Networks: A Convergence of Communication and Computing”, *IEEE Communication Magazine*, vol. 57, no. 5, pp. 20-27, May 2019.
- [21]杨静雅, 唐晓刚, 周一青, 刘玲, 意图抽象与知识联合驱动的 6G 内生智能网络架构[J], 通信学报, 2023.

- [22] L. Liu, Y. Zhou, W. Zhuang, J. Yuan and L. Tian, "Tractable Coverage Analysis for Hexagonal Macrocell-Based Heterogeneous UDNs with Adaptive Interference Aware CoMP", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 1, pp. 503-517, Jan. 2019.
- [23] Y. Zhou, L. Liu, L. Wang, N. Hui, X. Cui, J. Wu, Y. Peng and Y. Qi, "Service Aware 6G: An Intelligent and Open Network Based on Convergence of Communication, Computing and Caching", *Digital Communication Networks*, vol. 6, no. 3, pp. 253-260, Aug. 2020.
- [24] Y. Peng, X. G. Tang, Y. Zhou, J. T. Li, Y. Qi, L. Liu and H. Lin, "Computing and Communication Cost-Aware Service Migration Enabled by Transfer Reinforcement Learning for Dynamic Vehicular Edge Computing Networks", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, pp. 1-12, Early Access, Nov. 2022.
- [25] 星闪联盟. 星闪 1.0 空口技术性能评估报告. 2021 年 4 月.
- [26] 3GPP. System architecture for the 5G system (5GS): 3GPP TS 23.501 v17.3.0 [S]. 2021.
- [27] 吕铁, 韩娜. 智能制造: 全球趋势与中国战略[J]. 学术前沿, 2015(11): 4-17.
- [28] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.
- [29] Wang, Yizhong, et al. "Self-instruct: Aligning language model with self generated instructions." *arXiv preprint arXiv:2212.10560* (2022).
- [30] Mangrulkar, Sourab, et al. "PEFT: State-of-the-art Parameter-Efficient Fine-Tuning methods"
- [31] Josh Tobin. 2023. LLMOps: Deployment and Learning in Production. <https://www.youtube.com/watch?v=Fquj2u7ay40>
- [32] Li J Q, Yu F R, Deng G, et al. Industrial Internet: A Survey on the Enabling Technologies, Applications, and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(3): 1504-1526.

- [33] Qiu T, Chi J, Zhou X, et al. Edge Computing in Industrial Internet of Things: Architecture, Advances and Challenges. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(4): 2462-2488.
- [34] Hu P. A System Architecture for Software-defined Industrial Internet of Things. 2015 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB). IEEE, 2015: 1-5.
- [35] 余晓晖, 刘默, 蒋昕昊, 等. 工业互联网体系架构 2.0. 计算机集成制造系统, 2019, 25(12): 2983-2996.
- [36] Yu X H, Liu M, Jiang X H, et al. Industrial Internet Architecture 2.0. Computer Integrated Manufacturing Systems. 2019, 25(12):2983-2996. (in Chinese)
- [37] 亓晋, 王微, 陈孟玺, 等. 工业互联网的概念、体系架构及关键技术. 物联网学报, 2022, 6(02):38-49.
- [38] Wang K, Wang Y, Sun Y, et al. Green Industrial Internet of Things Architecture: An Energy-efficient Perspective. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(12): 48-54.
- [39] 徐志伟, 王一帆, 赵永威, 等. 算礼:探索计算系统的可分析抽象. 计算机研究与发展, 2020, 57(05):897-905.
- [40] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest R L, et al. Introduction to Algorithms. 3rd. MIT press, 2009.