



# 面向工业智能化时代的 新一代工业控制体系架构

## ◀◀◀ 白皮书



# CONTENTS

## 目录

---

<b>01</b>	<b>前言</b>	<b>01</b>
<b>02</b>	<b>工业发展演进的四个时代</b>	<b>02</b>
<b>03</b>	<b>工业自动化时代的工业控制体系架构</b>	<b>03</b>
	3.1. ISA-95工业生产体系架构	03
	3.2. 工业控制系统面临的挑战与机遇	04
	3.2.1. 自动化时代面临的挑战	
	3.2.2. 智能化时代的机遇	
<b>04</b>	<b>工业智能化时代的新一代工业控制体系架构</b>	<b>09</b>
	4.1. 工业智能化时代的愿景目标	09
	4.2. 工业智能化时代的OICT融合的生产体系架构	10
	4.3. 工业智能化时代的新一代工业控制体系架构	11
	4.3.1. 开放化的工控架构	
	4.3.2. 网联化的工控架构	
	4.3.3. 协作化的工控架构	
	4.3.4. 智能化的工控架构	
<b>05</b>	<b>未来展望</b>	<b>17</b>
<b>06</b>	<b>参考文献</b>	<b>19</b>

# 01 前言

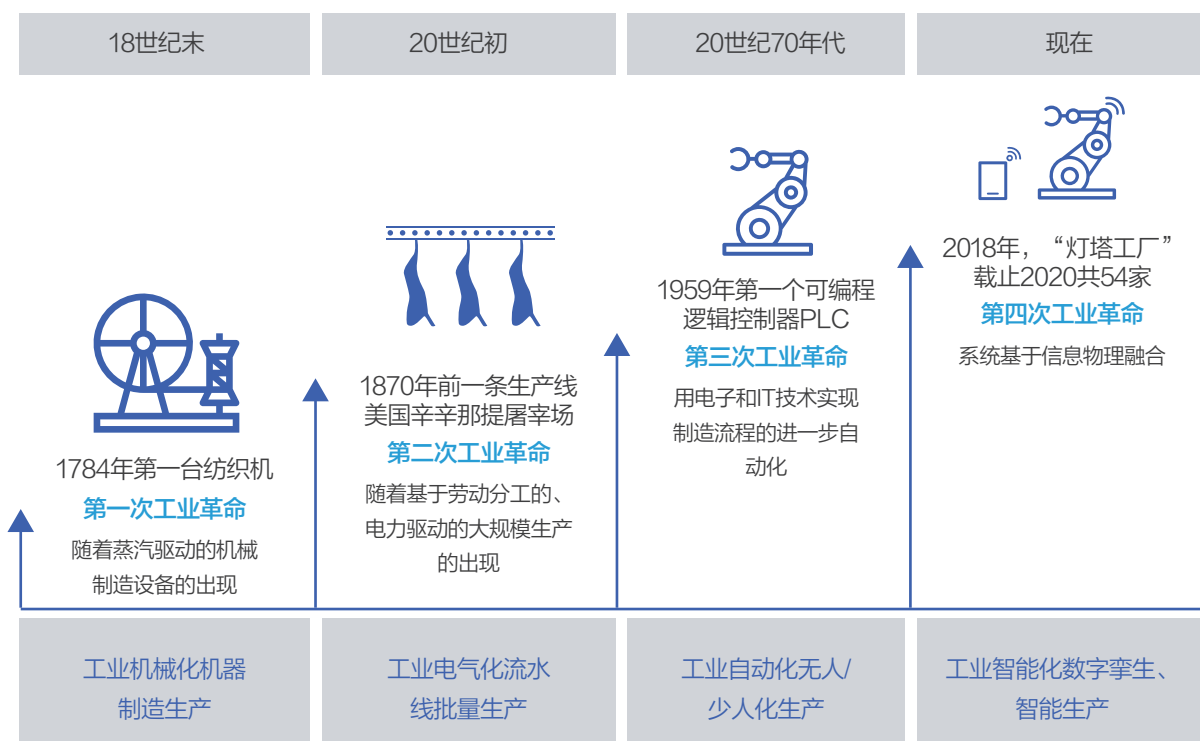
当前，新一轮科技革命和产业变革蓬勃兴起，新一代的信息技术与工业经济深度融合形成了新业态和应用模式，在网络协同制造、大规模个性化定制、远程运维服务等场景上涌现出各种各样的解决方案，比如：围绕制造业供应链协同、企业的柔性制造、重大装备远程运维、生产过程的节能减排等。

作为工业4.0的核心，工业领域的智能化变革却面临诸多挑战。一方面，在企业内，生产运营仍然存在诸多问题，例如：1、如何进一步将AI技术、大数据技术等应用到生产过程中，从而大幅度地提高生产效率、降低生产和建设成本；2、如何应对老龄化，确保老一代工人所掌握的控制、运营和维护方面的知识得以传承，以及如何适应新一代工人知识结构体系变化；3、如何快速响应外部环境变化，实现柔性化生产制造；4、如何摆脱传统控制器厂家的制约，保障生产者的Know-how知识产权得以保护。另一方面，针对生产现场的智能化改造，1、如何打通信息孤岛，实现不同厂家专有系统之间的互联、互通、互操作；2、如何将智能融入到工业生产的过程控制中，实现生产效率质的提升。这些问题仍处于探索当中。

工业生产企业的管理者们希望新的技术能够帮助他们应对这些挑战，传统工业控制架构也需要与时俱进，拥抱AI、大数据分析、物联网等新技术，面向工业智能时代建立新的工业控制体系架构，充分发挥新一代信息技术的赋能效应，提升制造业高端化、智能化、绿色化发展水平，实现企业的业务增长和发展。

# 02 工业发展演进的四个时代

随着蒸汽机的发明，工业生产从手工作坊进入了机器规模化生产的阶段，工业生产的发展也经历了4个阶段：



**第一阶段：工业机械化时代。**18世纪60年代，资本主义国家基本上完成了农业革命，对工业用品的需求日益扩大，传统手工业生产已经不能满足市场需求。1784年，随着第一台蒸汽驱动的纺织机出现，标志着工业革命的开始，工业生产正式进入机械化时代。

**第二阶段：工业电气化时代。**19世纪后半期至20世纪初，在劳动分工的基础上，采用电力驱动的制造装备迅速普及，让工业生产以流水线的方式实现产品的规模化批量生产，称为第二次工业革命。

**第三阶段：工业自动化时代。**自20世纪70年代一直到现在，电子与信息技术的广泛应用，使得制造过程不断实现自动化，通过自动化的产线、装备实现按计划的、规模化的产品生产，这是第三次工业革命。

**第四阶段：工业智能化时代。**以智能制造为主导的第四次工业革命，融合了更多的信息技术（IT）、人工智能（AI），和大数据技术（BigData）。新一代的工业生产，不是以“产品”为中心，而是转变为以“客户”为中心。这需要更加智能化的生产过程，传统的面向单一产品大批量重复生产的自动化无法满足这样的诉求。

# 03 工业自动化时代的工业控制体系架构

## 3.1. ISA-95工业生产体系架构

从工业自动化时代开始，工业控制系统在工业领域得到广泛的应用，为了规范工业生产体系的建设，2005年，ISA发布了一套标准，即ANSI/ISA-95.00.03-2005，企业系统与控制系统集成国际标准（the International Standard for the Integration of Enterprise and Control Systems），通常称作ISA-95，同时也是IEC 62264的国际标准。该标准描述了一个从工厂车间现场连接到企业顶层应用的框架，标准的目标是降低在企业系统和制造系统集成过程中的风险，成本和错误。

ISA-95标准定义了企业商业计划（比如SAP、CRM等）和生产控制系统（SCADA/DCS、HMI/PLC等）之间的集成，它主要包括5个层次（Level0 ~ Level4），每一层代表了从工厂车间到集团计划的不同生产层次。



在工业自动化时代，企业生产是以产品为中心，以生产计划指导产线生产，ISA-95的5层架构很好地解决了企业运营所需要的从全局运营到车间生产的集成问题。它囊括了对ERP系统的需求，解决了运营绩效数据的搜集问题，并将这一方案快速地落实到生产的实施上；以及如何访问工厂车间的运营信息来更好地预测财务绩效，原材料水平以及其他资产计划日程。

在ISA-95的工业生产控制体系架构中，信息流都是围绕DCS/PLC展开，这样DCS/PLC就成了整个ISA-95工业控制体系架构中的关键节点，因为它控制了生产现场和上层企业信息系统的数据库信息流的流转。

## 3.2. 工业控制系统面临的挑战与机遇

### 3.2.1. 自动化时代面临的挑战

与IT领域技术发展日新月异相比，OT领域技术更新周期较长。然而，近年来在智能制造/工业4.0牵引下，OT技术发展较过去二十年相比在速度、广度和深度上都有着较大的发展，但是面临的挑战也更加尖锐。

#### 3.2.1.1. 挑战一：工业通信协议七国八制，产生大量信息孤岛

进入工业自动化时代，西方的一些行业先行者依托自身的行业优势，开发了不同的工业通信协议，并逐渐发展成为一个个烟囱式的生态圈，后来者只能遵从这些协议标准。工业界也曾经试图打破这样的壁垒，但是树大根深，在传统的工控体系架构下，这样的壁垒基本没有被打破的可能。据国际电工委员会（IEC）的统计，目前工业通信协议超过5000种，已经在IEC61158标准组织通过，成为被认可的国际标准就超过30种，很难有统一的标准。

主流工业通信标准EtherCAT、PROFINET、POWERLINK等协议虽然是IEC认可的标准协议，但没有完全开放，仍然对用户形成了一定壁垒。

### 七国八制, 烟囱林立

1980s	工业现场总线	2000s	工业以太网 <sup>1)</sup>
PROFIBUS 总线	西门子等 1987 年推出	ProfiNet	西门子 2001 年推出
Modbus 总线	施耐德 1979 年推出	ModbusTCP/IP	由 Modbus 演进而来 (1996)
CC-Link 总线 INTERBUS 总线	三菱电机 1996 年推出 菲尼克斯 1984 年推出	CC-Link IE	三菱电机等 2008 年推出 ODVA 与 CNI <sup>2)</sup> 两大工业组织推出 (2000)
CAN 总线	BOSCH 公司 1986 年推出	Ethernet/IP	
DeviceNet	Allen Bradlev 1994 年推出	Powerlink	贝加莱公司 2001 年推出
		EtherCAT	Beckoff 公司 2003 年推出
<ul style="list-style-type: none"> <li>实现双向串行、多点连接, 但存在带宽低、距离短、抗干扰能力较差等问题</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>拥有低成本、高效通信及灵活的网络拓扑扩展能力, 但链路层和应用层采用技术不同, 互联互通性差</li> </ul>	

30+

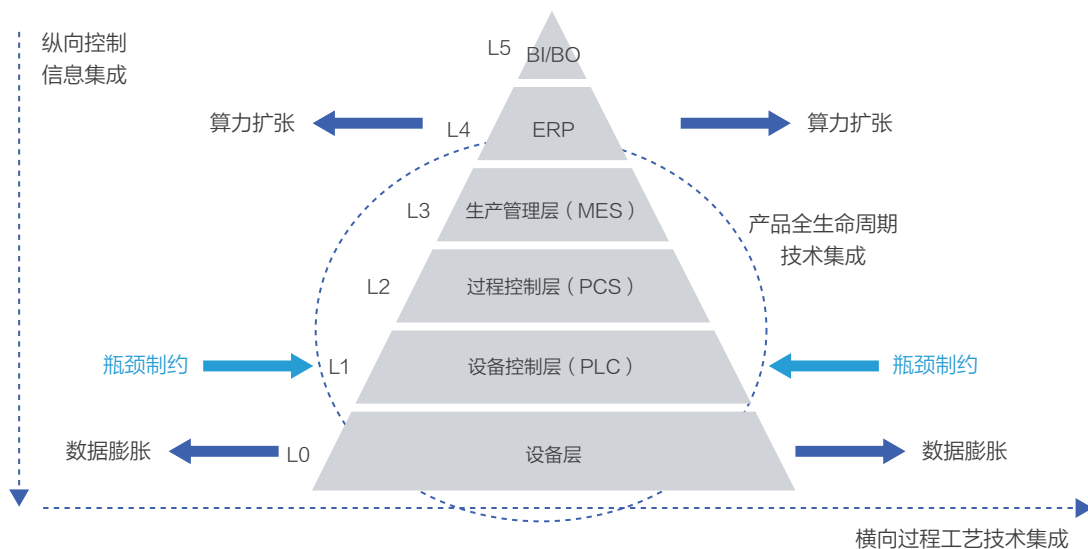
总线协议

兼容性不足, 互联互通性差的问题一直存在

90年代末，随着以太网技术日趋成熟，传统的这些通信协议提供者通过在IEEE 802.3标准以太网上修改MAC层或在MAC层之上增加一些特定协议机制（如时间调度、通信优先级、时钟同步等），以满足工业现场应用所需的实时性和确定性通信要求。传统的工业总线升级到工业以太网，但工业通信生态的壁垒依旧如故。

### 3.2.1.2. 挑战二：PLC亟需加快升级

自从进入工业自动化时代以来，近半个世纪，PLC控制器不管是PLC的硬件架构还是软件体系，都没有发生本质的变化。但是从ISA-95的5层架构体系的角度看，这个世界也发生了巨大的变化，工业领域也正在变革之中。



在金字塔的顶部，企业资源层、生产管理，随着云计算、云平台的发展，传统的OA系统、ERP系统，包括MES系统开始逐渐云化，不再以垂直的烟囱体系存在，而是立足于大数据湖，基于统一的数据做分析，生产计划制定等。智能制造的发展，正在驱动上层的算力扩张。

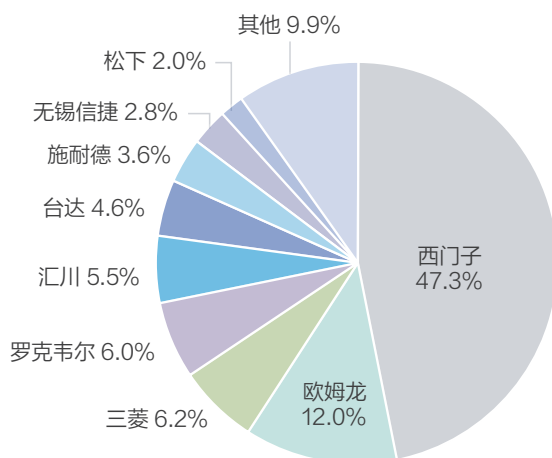
在生产现场，根据摩尔定律的发展，芯片、存储器等技术得到了飞速的进步；芯片集成度越来越高，功能越来越强大，存储器的容量也越来越大，但是功耗越来越小。这些技术的进步都给装备/终端的智能化带来了可能，并且事实上也出现了很多融合机器视觉、融合AI能力的装备/终端。数字孪生在生产线精益运营方面的应用，带来工业现场数据量的快速膨胀。

随着智能化应用场景越来越丰富，对于通信、控制都提出了更多的需求，算力、数据已经成为新的工业控制体系架构下信息流转的核心，现行ISA-95架构中的PLC控制层近半个世纪的架构，已经难以满足“算力下得来，数据上得去”的需求。

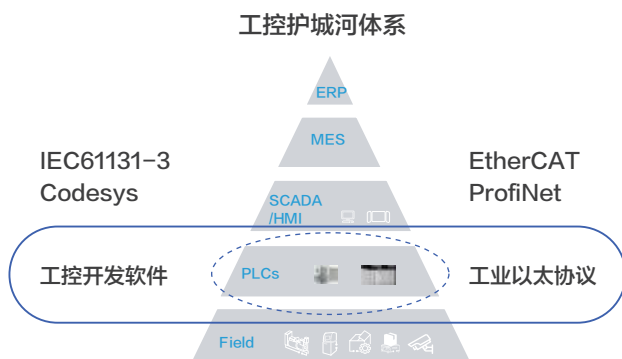
### 3.2.1.3. 挑战三：工业控制体系的自主可控

工信部发布《“十四五”软件和信息技术服务业发展规划》，明确指出要大力发展PLC产业，加快在重点行业的集成应用。据立鼎产业研究网的数据，2022年我国PLC市场规模超过166亿[20]。但是国产品牌的PLC在国内PLC市场份额所占比例很小，一直没有形成产业化规模。

2022 年我国 PLC 市场的竞争格局



目前我国PLC自主可控还有非常重要的一环有待突破：以PLC工控开发软件和工业通信协议为核心的工控软件体系。传统欧美的工控厂家利用了工业化起步早的优势，在工业领域形成了封闭的生态圈，比如：西门子的PROFIBUS/PROFINET、罗克韦尔的EtherNet/IP、施耐德的Modbus等等。这些协议虽然是IEC认可的标准协议，但没有完全开放，仍然对用户形成了一定壁垒。



在工控开发软件方面，德国的Codesys占据了市场的主流份额，国内很多工业自动化领域的企业还未能实现工控开发软件的完全自主可控。

### 3.2.2. 智能化时代的机遇

随着物联网、大数据、AI等技术的发展，工业发展也进入一个新赛道。中国是制造业大国，越来越多的企业开始重视工业现场的数字化、智能化改造，期望在时代变革的时候，能够持续提升生产率，实现自身的商业诉求。

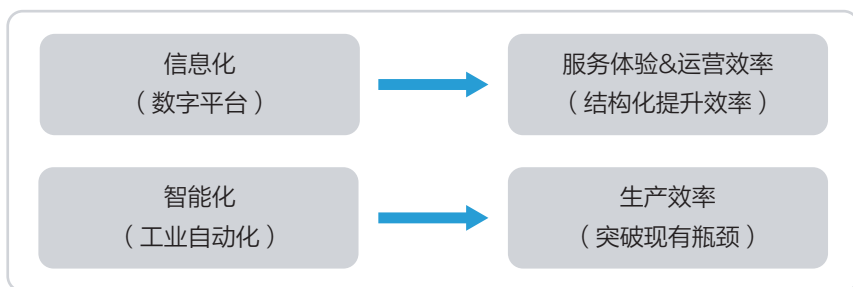
#### 3.2.2.1. 机遇一：工业生产者希望能持续提升数字化转型收益

工业数字化转型应该包括两个方面，一方面要从运营层面打通横向的数据流，结构化地提升运营效率，提升服务体验；另一方面要从生产层面打通纵向数据流，使能生产流程的智能化，让数据服务于生产过程，提升生产效率。



近年来很多生产企业建立了自己的数字化平台，这些平台打通了产业的上下游，打通了企业的内部、外部的运营节点，对提升企业的服务体验和运营效率发挥了重大的作用。

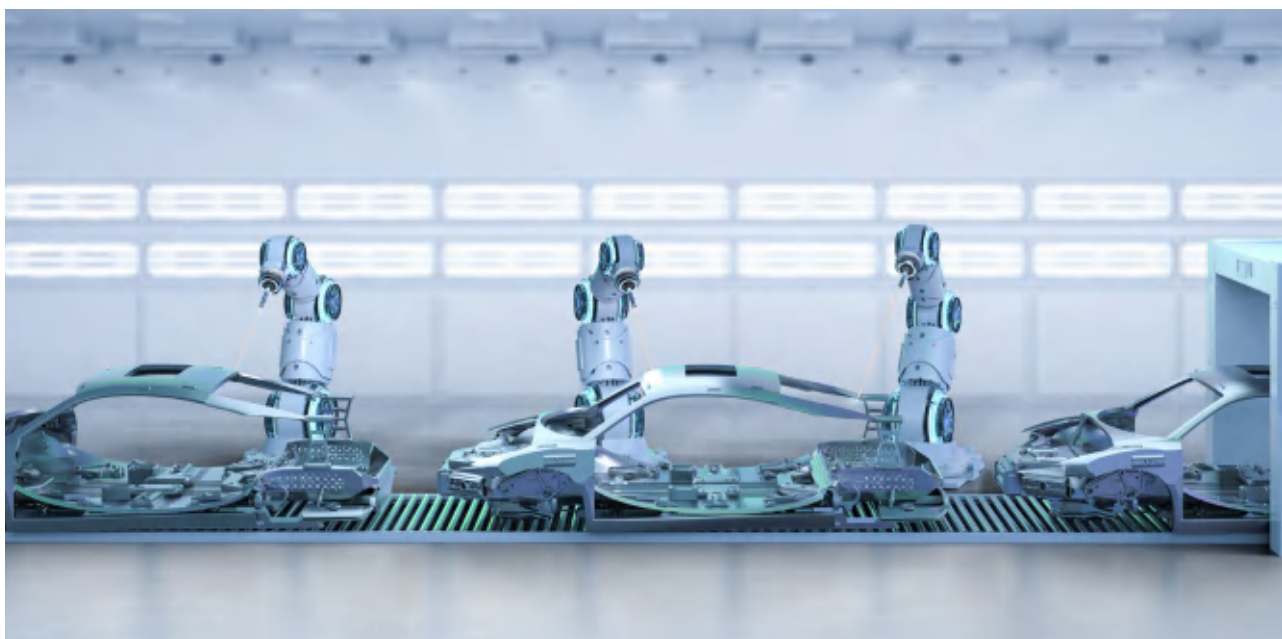
但是这些工作对生产车间的本身涉及不多，工控架构也仍然是基于ISA-95的传统架构，虽然打通了上面的二层（ERP&MES）企业功能层面的数据流，但处于下面三层的控制功能层面却没有变化，传统的数据流转的瓶颈仍然存在，虽然在运营效率上有所提升，但是生产效率改变不明显。



根据《2020中国制造业痛点分析报告》，我国工业企业设备数字化率只有50%，其中设备联网率仅为23.0%。有超过半数的企业认为自身的工业设备终端的连接率低，数字化程度低。可见我国的大部分企业在工业生产智能化方面的准备度还非常不足。其背后的原因就是传统的控制体系架构无法满足未来智能工厂的海量数据流转、处理的需求，人工智能、大数据等新一代信息技术难以引入到生产现场。

### 3.2.2.2. 机遇二：制造业高质量发展对工业数字化/智能化的诉求

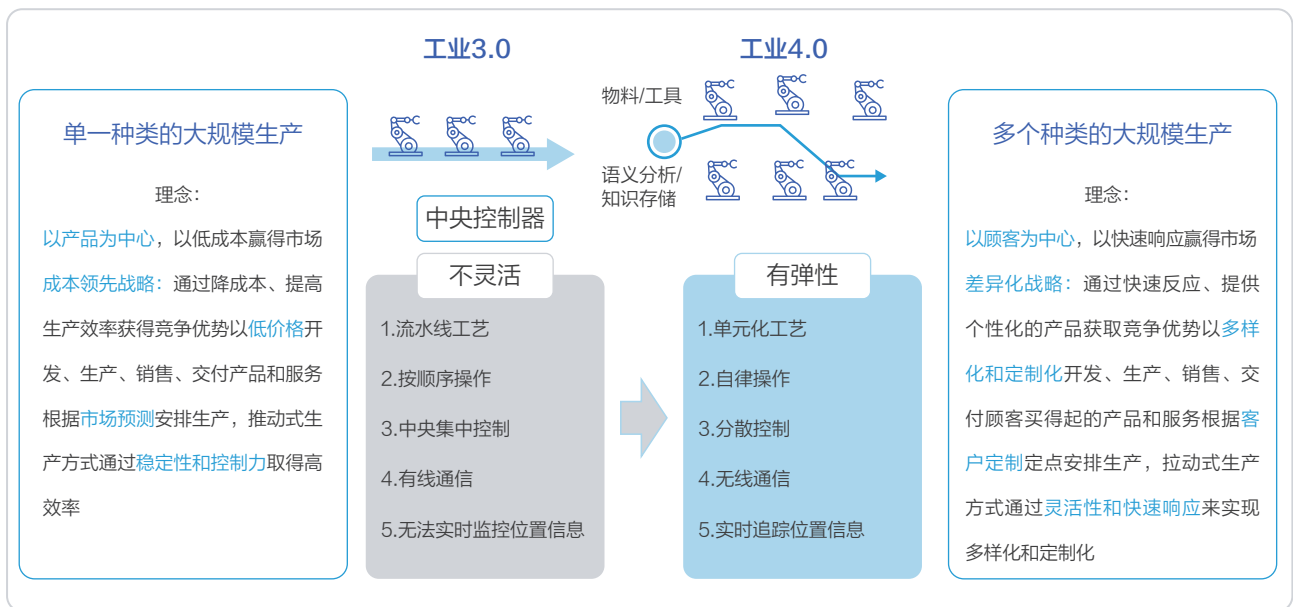
智能化为制造业高质量发展提供了技术路径，推进制造业智能化转型能够实现技术路径再造、竞争优势转换，释放更多效率和品质提升空间。制造业的发展方式正在发生转变，发挥大数据、人工智能等新技术的作用，加速推广智能制造模式，深化技术工艺流程再造，提高生产制造精益化柔性化水平，加快产品功能迭代升级。



中国宝武集团提出以“四个一律”推进智慧制造，即“制造环节操作室一律集中并搬离现场、人工体力操作岗位一律机器人、设备运维一律远程、服务一律上线”。通过推行操作室集中形成一批集控中心优秀实践，打破传统工厂管理架构，使高度集约化管理成为可能；通过推进现场少人少人化，加快工业机器人、自动行车、人工智能等新技术应用，宝武上海基地全球率先实现“一键炼钢出钢”；通过推进设备运维一律远程，体系联动开展多基地设备远程运维布局，推动公司设备管理体系转型升级；推动“服务一律上线”，推进各子公司网上采购和钢铁产品网上销售。人工智能、大数据、云计算、区块链、5G、仿真、AR等技术大量应用于智能工厂。

### 3.2.2.3. 机遇三：以客户为中心而产生的柔性制造需求

柔性制造的需求较为广泛，其核心是以消费者需求为导向的定制化生产，这种以需定产的方式和传统大规模量产的生产模式不同。传统的工业生产是以产品为中心，根据市场预测来制定生产计划，并按照既定的生产计划来生产，其生产方式较为单一，现有的工业自动化能很好满足这种需求。而随着社会的发展，客户的需求日益多样化，客户更多地需要个性化的产品。



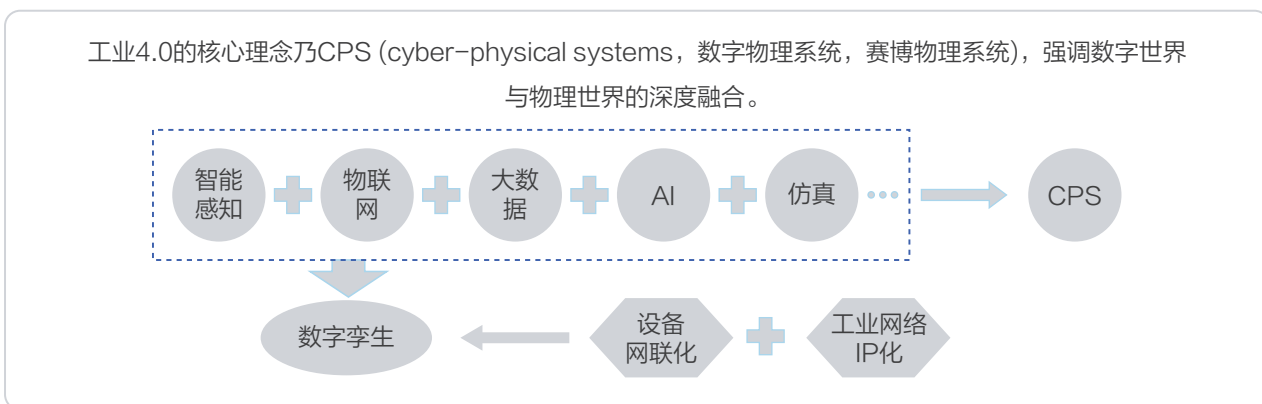
柔性制造考验的是生产线和供应链的反应速度。比如在电子商务领域兴起的“C2B”“C2P2B”等模式体现的正是柔性制造。在柔性制造中，生产的指令完全是由消费者触发，其价值链展现为“人—财—产—物—销”这种完全定向的具有明确个性特征的活动。在这个过程中不仅对传统的供应链体系提出了重大的挑战，也对工业生产现场的架构体系提出了新的要求。

某汽车生产企业对未来工业产线形态的思考认为，未来生产线上的机器人与现场控制都应该以资源池形态存在，每个工作单元都应该是全局可配置、可编排的。所以企业的生产者认为未来生产线的控制与计算功能应该是基于云来定义的，他们目标是把产线上95%的控制与计算功能迁移到园区私有云，实现工业软件和生产装备硬件解耦。通过产线的控制解耦实现在不更新终端及生产设备的情况下的灵活创新，他们称之为“Brown Innovation”。

# 04 工业智能化时代的新一代工业控制体系架构

## 4.1. 工业智能化时代的愿景目标

智能技术业智能化变革的重要推手，而智能离不开大数据的支撑，李培根院士指出工业4.0的核心理念是CPS（Cyber Physical Systems）系统，本质就是数字孪生，强调数字世界与物理世界的深度融合。



李培根院士认为，数字孪生系统是多种新一代技术的融合，包括智能感知技术、物联网技术、大数据技术、AI技术，也包括数据建模，以及模型仿真技术等，其核心是基于大数据的智能化技术。[12]

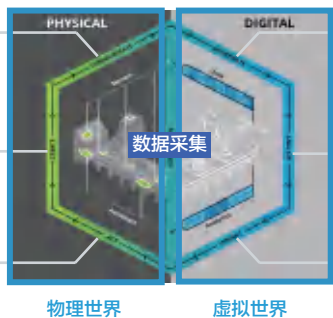
数字孪生不仅驱动了数字世界和物理世界的变革，也驱动着工业生产的控制体系架构不断演进。数字孪生是物理世界和数字世界的融合，在工业生产实现自动化的基础之上，基于大数据技术对物理世界的建模、数据分析、预测、生产决策，最终实现工业生产的“全自动驾驶”。

### Digital Twin(数字孪生): 工业4.0的智慧之道

通过Sensors实时采集物理世界数据并传递给数字世界

物理世界启动工作流程

控制器进行操作优化改进, 闭环改进点



来源: 德勤《Industry 4.0 and the digital twin》

数字世界统一汇聚来自物理世界的的数据, 构建物理世界的Digital-Twin

分析器对Digital-Twin进行数据分析、建模

根据分析结果洞察、识别物理世界的待改进点并反馈给物理世界的控制器

智能阶段分类		分类描述
L1	自动化	以PLC控制为标志的工业生产自动化
L2	过程监控	可视化: 数字孪生的初级阶段, 实现对生产全过程的数字化监控, 实现生产设备/装备的全联网, 消除信息化孤岛。
L3	支持决策	可分析: 过程数据在预设模型下, 做推理, 实现人工低级数据分析工作的解放。数据分析结果可以提供经营者做辅助决策
L4	辅助决策	可预测: AI的应用, 实现数据的机器学习, 寻找过程最优解, 向经营者推荐方案, 供经营者选择。
L5	自主决策	全自动: 生产过程全自动驾驶, 自动选择, 自调整

如果我们把工业自动化作为智能化的起点，那么工业智能化的发展可以分为四个阶段：

- 可视化：数字孪生的初级阶段，实现对生产全过程的数字化监控，实现生产设备/装备的全联网，消除信息化孤岛。
- 可分析：数据分析正在从人工分析走向基于预设模型的数据推理，数据分析越来越高效，为运营优化决策提供至关重要的支撑作用。
- 可预测：通过AI应用实现数据的机器学习，寻找过程最优解，并向经营者推荐方案，供经营者选择。
- 全自动：实现生产过程的“全自动驾驶”，具备自适应、自优化、自决策等功能。

数据的采集和流转是实现数字孪生的关键能力，所以生产现场的网联化和工业网络的连接能力是数字孪生系统中的关键因素。

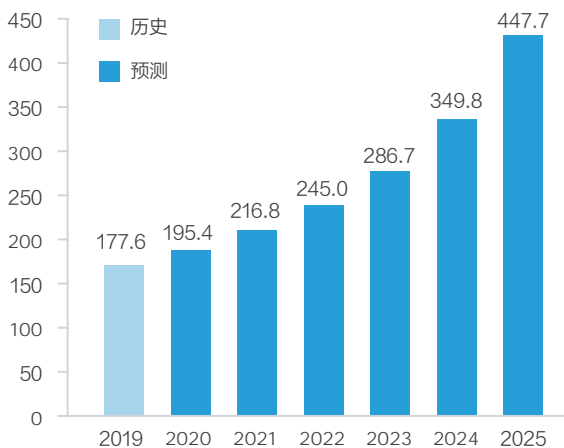
## 4.2. 工业智能化时代的OICT融合的生产体系架构

随着云计算、大数据等新一代信息技术与工业领域的深度融合，ISA-95的生产体系架构也在发生变化。基于ISA-95架构的企业管理功能系统软件（ERP、MES等）呈现出从原来的单机系统架构向云化架构演变趋势，目前部分大型企业已经构建了企业的工业云平台，将ERP、MES等应用向云端迁移，并且依托云平台、大数据等技术开发出更为丰富的智能化应用。

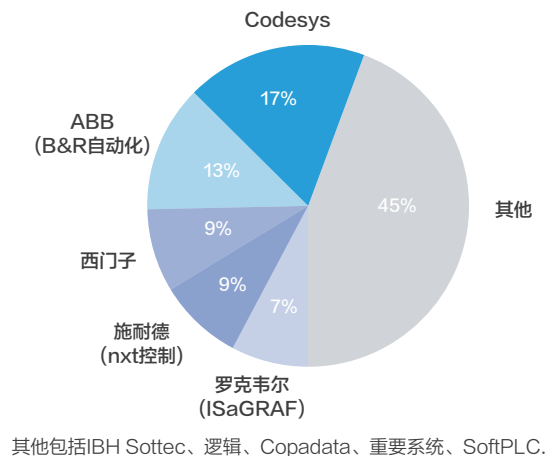
边缘计算已经成为重要的技术趋势。在智能制造时代，继续构建一个个垂直的烟囱体系已经不合时宜，融合智能的边

缘网关成为未来的发展方向。而边缘网关对于传统的工业自动化时代的工控架构同样适用。随着计算技术的高速发展，采用软硬件解耦的架构，PLC功能软件化，部署在通用计算架构上应用的落地场景越发广泛。IA咨询公司报告显示，工控设备行业“SoftPLC”新架构的技术准备度已经相当高，预计2025年市场规模可达到4.5亿美元。但是当前SoftPLC的主要应用区域在欧美市场，中国市场对SoftPLC的应用仍处于探索起步阶段，未来拓展潜力和前景较好。从供应商角度看，CodeSys占据了SoftPLC市场的首位。[7]

全球软PLC市场规模 (百万美元)

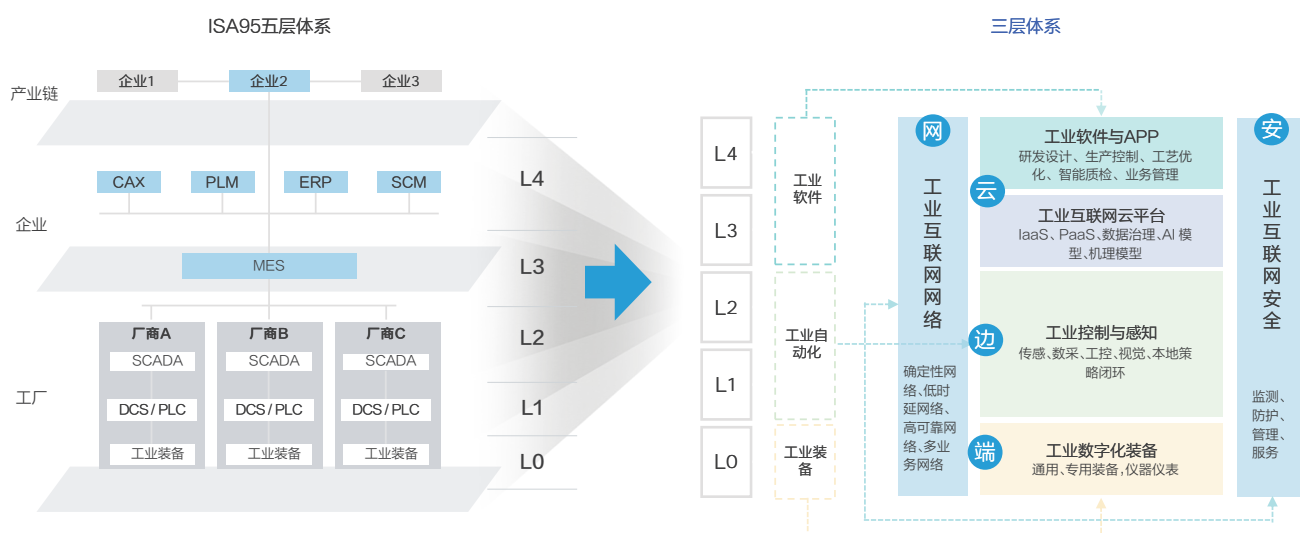


2019年全球软PLC市场份额



同样在工业现场侧，装备的数字化、终端的智能化将得到广泛的应用。基于传感器、执行器和无线通信模块的相关技术研发进展十分迅速，如 IEEE 802.15.4、低功耗 Wi-Fi、电力载波通信等。技术的快速成熟降低了数据收集、处理、存储等硬件应用成本。在软件系统方面，小型化、轻量级的实时操作系统、IP 协议栈已经可以实现对资源的低占用，它们只需要几 Kbyte 的存储器，可有效降低系统能耗。

随着智能机器的发展和智能分析的集中，工业生产体系架构进一步扁平化，传统的垂直体系逐步向水平架构转变，从传统的ISA-95的五层金字塔架构演变成成为以“计算”为中心的云/边/端三层体系架构。



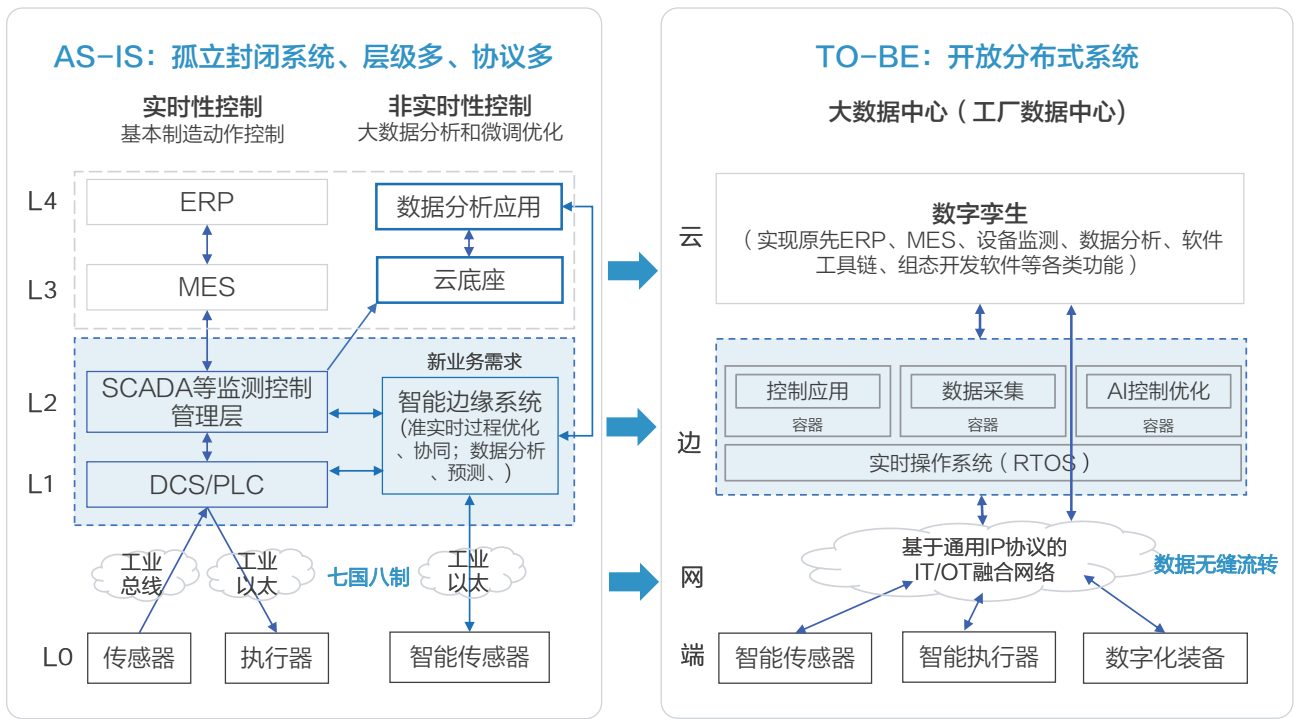
在新的生产体系架构下，L3/L4的软件系统都将云化，变成基于工业云平台的工业软件APP。未来依托云平台，可能会衍生出更多的、更为丰富的工业应用，包括研发设计、生产控制、工艺优化、智能质检、企业管理等。SCADA系统也可能进一步裂变，一部分向上融合到数字孪生的可视化系统，一部分在边缘融合边缘算力，及数据采集、生产过程的全局优化等能力，形成工业控制边缘层。而工业现场的装备、终端等，随着芯片技术、智能技术的发展，逐渐向智能化的终端演进。

### 4.3. 工业智能化时代的新一代工业控制体系架构

在ISA-95的架构中，制造与生产企业的控制系统大多采用专用的、封闭的体系结构，其构成系统的硬件按照各自的标准量身定制，且局限于专用的生态环境，编程软件与控制器等硬件设备是“绑定”的，不同供应商的产品互不兼容。无论是DCS，PLC还是FCS，虽具有结构简单、技术成熟、产品批量大等优点，但相对日新月异的生产要求，也逐渐暴露出其固有的缺点。在很多情况下，当用户要想进行功能上的扩展或变化时，都必须求助于系统提供商；但是由于控制系统具有专有性，不能有效满足用户的个性化需求。再者，由于采用了专用的控制系统，如制造厂家想在生产现场转化为另一种控制系统也将变得极为困难。诸如此类，无形中不仅增加了制造企业的成本，也成为控制系统升级换代的“瓶颈”。

在新的工业生产的三层体系架构中，传统的ISA-95工业控制功能部分发生了新的变化。新一代工控体系架构是以“计算”为核心、为“数据流转”服务的。从工业现场的海量数据的采集，到工业边缘层的数据预处理，多维数据信息融合，到云端数

据的智能化应用,数据的无缝流转将成为整体系统架构的显性特征。



新一代工控体系的目标架构致力于解决工业自动化时代的遗留问题,同时为工业智能化奠定基础架构,为此,它具备以下几个特征:

- **开放化:** 工控体系要从传统的封闭态走向开放态,突破现有的七国八制的工业协议“壁垒”。开放化要求工业领域必须能够基于一套开放、开源的工业通信协议,让所有的产业链上的企业加入到开放开源的生态中,大家共享生态开放的红利。
- **网联化:** 传统OT的孤岛系统,在IT/OT融合的状态下将不复存在,任何脱离整个架构体系的信息孤岛都无法独立存在,因为业务层面的数据是统一的,是不允许存在孤立的数据孤岛。网联化对面向工业智能化的先进工业网络提出了诉求。
- **协作化:** 传统的单元自动化控制系统向全流程、多工序协同优化控制系统发展,以实现高效的个性化定制、全局的实时动态优化。依托于新工控架构,在通用的硬件计算平台之上,工业生产的企业单位可以根据自己的工艺流程、智能算法、Know-how知识,积累自己的知识产权,构建自己的产品优势,以实现在行业竞争中的不败之地。
- **智能化:** 随着计算能力的发展,控制功能不断随着算力下沉,越来越“接近”现场;未来端侧的智能化,装备的数字化,将直接有能力形成自我控制的自闭环。工业自动化时代的典型产品形态PLC控制器将会升级为智能化的设备形态,该新设备形态将是基于通用的计算平台架构,能支持多种应用功能的融合,智能算法的部署等功能;同时也是一个开放平台,企业单位可以自行开发自己的APP应用,以构筑自身产品的竞争力和知识产权资产。

### 4.3.1. 开放化的工控架构

开放式控制系统的概念在80年代就已出现。早在1981年，美国为了减少装备制造对日本控制系统的依赖性，开始了名为“下一代控制器（NGC）”的计划，并成立了“美国国家制造科学中心（NCMS）”，主要目的是拟订并推进关于新一代开放式控制系统的分析与规范。其后有很多相关的研究计划在世界各国相继启动，其中影响较大的有美国的OMAC、欧洲的OSACA和日本的OSEC等计划。由于传统工控厂商认识尚不统一，参与积极性仍有待提高，相关计划推进效果还未较好体现。

2021年10月21日，机械工业仪器仪表综合技术经济研究所联合施耐德电气（中国）有限公司等发布了《开放自动化白皮书》[19]。白皮书认为开放的自动化系统应具备如下特征：

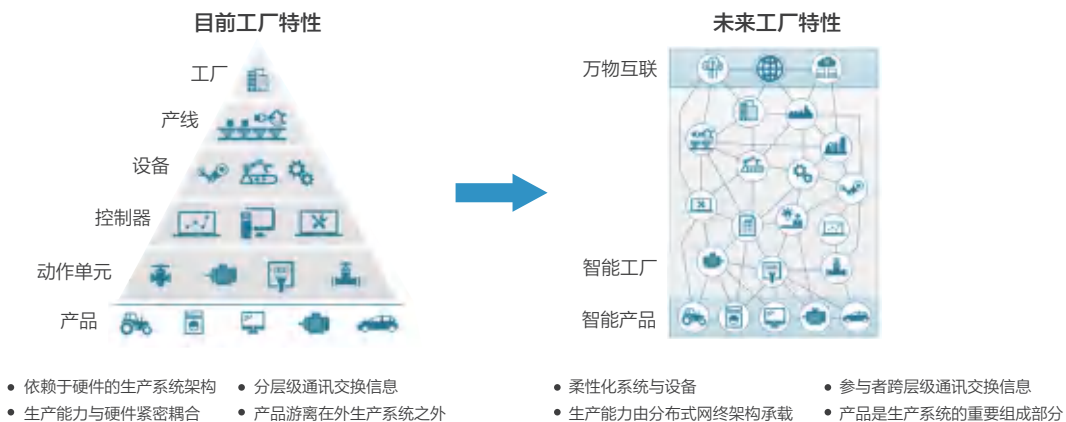
- 可复用：系统设计时定义可重复使用的模块化组件，并且模块之间可以高效集成；
- 可移植：应用程序可以跨平台部署和执行；
- 可重构：在不影响系统运行和保障安全的情况下软硬件即插即用；
- 可互操作：任意设备之间可以实现语义级交互以及共同执行分布式应用所需的功能。

新一代的工业控制体系架构不仅仅需要具备这四个开放的特征，还需要一套标准的、开放的工业协议栈，能够解决当前的七国八制、协议标准碎片化、互通困难的问题，实现工业现场的互联互通。

### 4.3.2. 网联化的工控架构

随着智能制造的快速发展，制造企业为了提升生产质量和生产效率，逐渐引入新的制造技术和制造装备，有大量设备都要联网，包括机器人、移动AGV，机床及其它自动化设备，让网络连接诉求变得极其重要。工厂需要一种易于部署、易于管理和易于使用的网络连接解决方案，以实现现场设备快速、稳定的相互通信。这些业务变化会带来对网络带宽、智能化等方面的更高诉求，IT网络将进一步下移，IT网络和OT网络之间的鸿沟正在逐步消失，最终IT网络与OT网络走向融合。

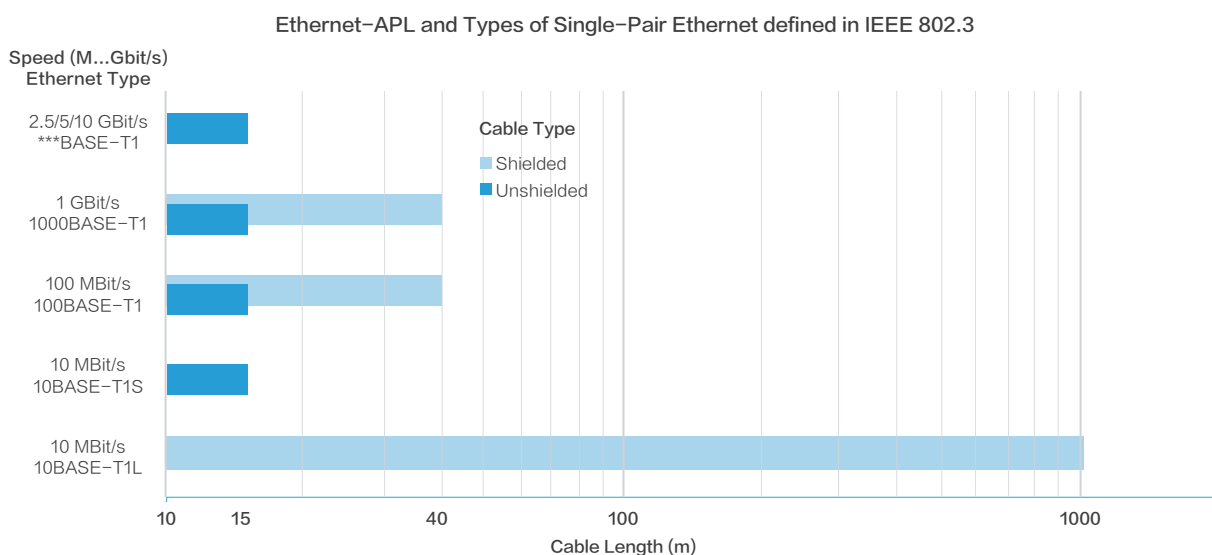
新的工控架构在数据流转方面，不再是垂直体系内部的数据传送，控制器不再是数据流转的瓶颈。原有的分层分级体系架构打破之后，智能机器之间将逐渐实现直接的横向互联，新的工业网络将是一张全互联的网状网络。柔性化的系统及设备、功能分布于整个网络，跨层级的协作模式、网络化的沟通协同、智能化产品都将是网络的组成部分。[9]



新的工业网络不同于传统的工业网络，也不同于传统的IT网络；虽然新的工业网络在网络规模，业务承载的多样性，多模态的接入方式都会有较大的变化，但针对工业现场的生产业务的高可靠性、高安全性诉求也是不容妥协的。

工业网络的确定性需求是工业生产不可或缺的，它是业务本身的诉求决定的。目前业界对确定性的网络技术也有较多的研究，比如：DetNet、TSN、DIP等。另外在工业现场越来越多的机台装备以无线的方式接入到整个生产体系，这也是一个很重要的变化；这对工业场景下的无线空口技术也提出了新的要求。随着生产流程走向全局优化控制，工业控制的可靠性更加依赖系统整体的可靠性。工业网络连接作为其中重要的一环，其高可靠性要求也远高于传统的办公信息化网络。此外，在网络规模扩大、联网装备增多以后，对网络的智能化保障、智能化运维也提出了要求。

工业现场业务场景的多样性，对工业网络的带宽诉求也是非常明确的。传统的工业总线正在向工业以太网演进，近来，传统二线制基础之上的高速率传输技术发展很快，2019年11月，IEEE802.3cg标准APL（Advanced Physical Layer）发布，采用单对线缆承载Ethernet/IP标准，可以在1000米的长度上提供10Mbps的带宽，是对现场工业总线的革命性变革。2021年，IEC TS 60079-47标准发布，支持增强的POE能力，满足工业现场的本质安全要求。这意味着基于传统的工业现场总线也可以实现从窄带到宽带的升级。



Ethernet-APL技术优势显著，对于用户而言主要具有几点好处：

- 1)实现全工厂范围内的“一网到底”。从最底层的仪表到最高层的管理信息网，所有通信设备都支持以太网协议，无需协议转换网关，从而简化工厂控制系统的设计。
- 2)降低建网成本。成熟的以太网软硬件供应能够提高仪表和控制系统的开放性，进一步降低工业仪表、工业设备成本。
- 3)提升工厂自动化水平。Ethernet-APL具有高带宽优势，可将更多的仪表数据传输到控制系统，有效提高工厂的自动化水平。
- 4)实现多传感器仪表。未来一台以太网仪表将能接入多个传感器，实现多个过程参数测量，并将数据用以太网形式传输到控制系统。[23]



### 4.3.3. 协作化的工控架构

工业生产技术的发展，将实现产品全生命周期制造流程全优化，使生产线工艺参数可以根据原材料供应、个性化定制需求、生产经营目标等关键变量的变化进行智能优化和动态调整，实现高效的个性化定制、全局的实时动态优化。

以钢铁行业为例，其生产过程具有长周期、长流程、不可逆、连续生产的特征，并且其生产过程是一个多因素参与高温化学冶金、相变以及物理冶金的混合过程，传统的被动式的工业控制过程不利于制造过程的全局优化。而这种情况在工业领域的其他行业也尤为常见。随着用户个性化需求日益旺盛，需要各生产工序更加优化协同，各个系统间实现无缝融合，以实现跨区域、跨工序，甚至是跨产业链的全生命周期的制造优化。[20]



传统的离散制造业在柔性制造的需求下，传统流水线式的产线可能会发生根本性的变化。产线会以一种单元模块化的设计，工作岛式的形态出现，工艺流程将以一种动态编排的方式来定义。整个工作岛的硬件是一个个独立的资源态，所有的工作岛构建成一个大的资源池，不同的客户需求将被按需编排，将整个资源池的工作岛按需串接在一起，实现产能、节拍和平衡率的最优化配置。



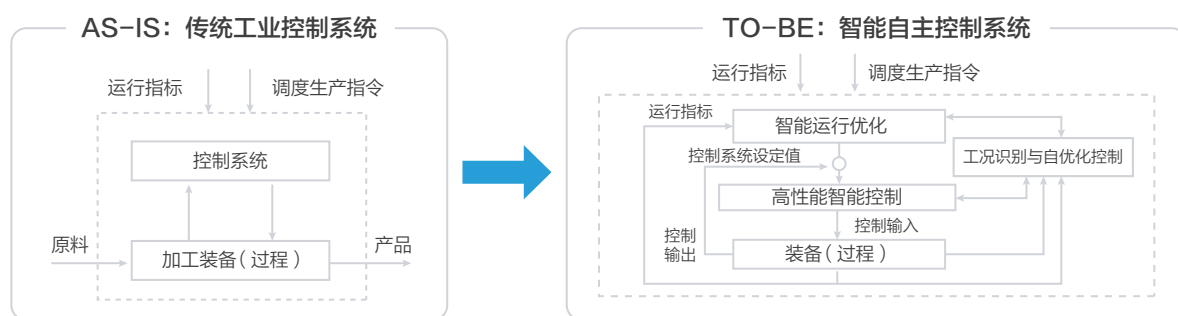
为了适配工业智能化时代的制造过程全局优化协同的特征，IEC 国际电工委员会基于早期的 IEC 61131-3 标准，在 2005 年发布了新一代的工业控制系统编程的国际标准 IEC61499，并定义了分布式控制系统的通用框架。传统的 IEC61131-3 是一种为了提升流水线生产效率，从“人操作”转换为“PLC 控制器操作”设计思路的架构，是基于周期往复的循环控制的设计架构；而 IEC61499 是基于事件触发方式的编程思路，与 IEC61131-3 相比，能够更好的适配工业智能化时代的海量工业物联场景。[19]

		IEC 61131-3	IEC 61499
Technicalities	Time triggered control	✓	
	Event triggered control		✓
	Can be coded using LD,STFBD	✓	✓
	Can be coded using HLL	✓	✓
IoT readiness	Encapsulation		✓
	Easy interoperability between multiple brands of PLCs		✓
	Code portability across diverse control devices from edge to cloud		✓
	Support for code redistribution		✓

传统的 IEC 61131-3 标准体系是面向“单个 PLC 控制单元”的编程标准。整个生产线的系统级设计高度依赖于工控设备厂家，工控系统自身不能实时优化、动态重构，快速发展的机器视觉等工业智能部件只能以“外挂”方式进行部署。IEC 61499 的三大关键特性：① 系统级建模 / 设计；② 软硬件解耦；③ 在线动态重构。这三大特性对于协作化工控体系架构尤为关键，因为这也是新工控架构的优势所在。同时 IEC 61499 定义了一种系统级的建模语言，用于开发分布式工业控制解决方案，这就从架构的设计开发维度，解决了新工控架构的开发标准问题。

#### 4.3.4. 智能化的工控架构

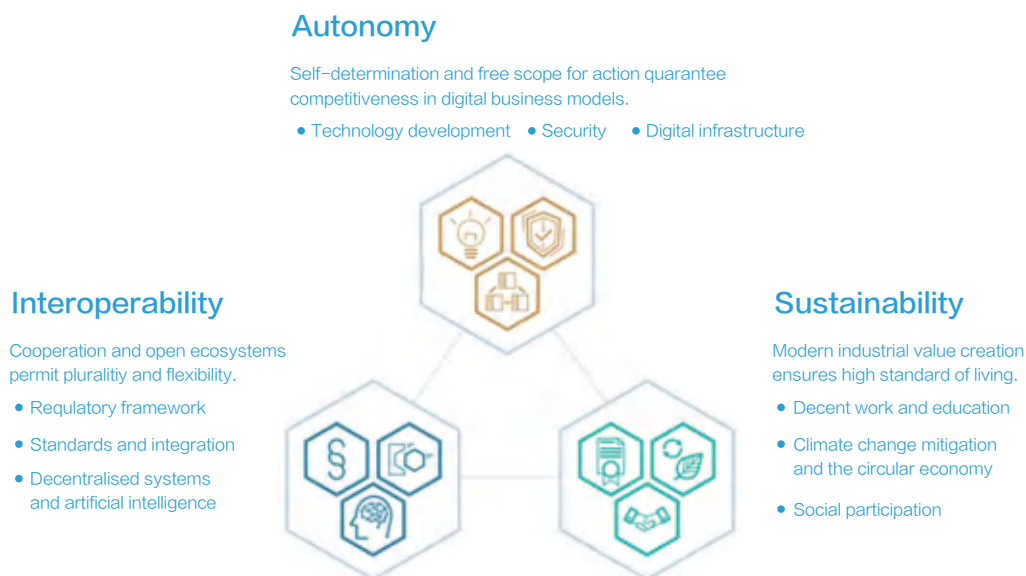
智能生产是智能制造的核心环节，而制造流程的智能化是实现智能生产的重要体现。以德国工业4.0为代表的智能制造的愿景目标是使生产资源形成一个循环网络，具有自主性、可调节性、可配置等特点；使加工过程中的产品具有独特的可识别性，可与加工装备相互识别，使加工装备可以加工个性定制的产品部件；使生产线根据整个价值链自组织、集成化生产设施，根据当前生产条件，灵活制定生产工艺，实现个性定制的高效化。实现上述功能的核心技术是采用分布式信息物理融合系统(CPS)和嵌入式互联网技术相互融合与协同。其中，工业控制系统将演变成智能自主控制系统，相比传统工业控制系统，增加了系统级实时优化、动态系统重构的能力。制造过程全局优化的需求，驱动控制系统向高性能智能自主控制系统发展、驱动单元自动化系统向全流程多工序协同优化控制系统发展、驱动本地监控向远程移动可视化监控系统发展。



当前国际上领先的制造企业采用 DCS、PLC 等先进的计算机控制系统实现了装备和生产过程的自动控制。但是控制系统的指令、运行工况监控和异常工况诊断仍然依靠知识工作者。制造流程智能化的目标是使装备(过程)的控制系统成为智能自主控制系统。如上图所示(图引自参考文献[22])，该系统主要由智能运行优化、高性能智能控制、工况识别与自优化控制 3 个子系统组成。装备(过程)智能自主控制系统的愿景功能包括：智能感知生产条件的变化，以优化运行指标为目标，自适应决策控制系统的设定值，高动态性能的智能控制系统跟踪控制系统设定值的改变，将实际运行指标控制在目标值范围内。实时远程与移动监控与预测异常工况，自优化控制，排除异常工况，使系统安全优化运行。与其他智能自主控制系统相互协同，实现制造流程全局优化。

# 05 未来展望

德国工业4.0平台组织在发布《2030 Vision for Industrie 4.0 - Shaping digital ecosystems globally》白皮书中从产业和社会的角度，提出面向2030年的三大愿景：



- **自主性：**强调独立决策和公平竞争，包括商业模式的定义和设计，以及独立个体的购买决策。自主性的实现要求以下三点的支撑：对所有人开放的数字基础设施，数据/IT/信息安全，技术中立的研究，创新和发展。
- **互操作性：**强调所有参与者的互操作是建设如此复杂的分布式数字生态系统的关键。其中参与者的付出平等的承诺和贡献是跨公司跨区域共同协作的前提。而标准化和整合工作，类似于统一的规章制度，分布式系统，和人工智能一样，是实现互操作性的必要前提。
- **可持续性：**经济，生态和社会可持续性是社会重要的价值取向。实施数字系统的创新生态体系为可持续性提供了肥沃的土壤，同时也实现了其本身的可持续性。可持续性的关键举措包括提供良好的工作和教育机会，缓解气候变化，提高经济循环和社会参与度。

过去的数十年里，工业企业一直在努力通过各种方式提高效率和降低成本。传统方法包括精益管理、本地化生产和自动化、信息化等，然而这些传统手段具有一定局限性。如今，数字技术的发展为工业领域带来了更多可能性。每个工业企业都面临着如何通过数字化转型来释放更大价值的紧迫问题。

在数字技术的影响下，未来工业将怎样发展呢？要思考这个问题，我们还需回到工业本质。工业是产出提升人类生活水平所需工具/物质的过程。但生产过程不是目的，拥有产品也不是目的，人们购买并使用生产出的产品成果，满足工作和生活需求，才是工业企业实现的价值。

如果我们以终为始，透过本质看未来工业，那么在将来的理想情况下，随着供应侧能力的发展，工业将从产品的生产供给不断延伸边界，最终发展成能够主动感知并满足客户需求，提供一体化方案，实现价值创造的形态。模式将从供应推动式变为需求拉动式；交付形式将从卖产品变为卖服务；需求侧角色从购买者、接受者变为产品的共同定义者；供应侧角色从产品的提供者变为满足需求的价值创造者；产业链分工从清晰的上下游分工变为紧密合作共创，以实现整体产出的价值最大化。

憧憬2030年的世界，未来工业将改变我们的生活方式和社会组织形态，将人类带入更加美好的生活。建筑业将完成工业化，各类建筑在工厂完成标准化模块的制造，在现场快速完成组装，建设周期显著缩短，建筑质量明显提高。在建筑内生活的我们将拥有解放双手、双眼，无处不在的私人助理，它们能够感知我们的需求并指挥智能家居产品执行，让我们拥有舒适的家居生活；走出家庭，AI、机器人等技术将把我们从事重复性、危险性岗位中释放，更多的人在机器人的辅助下可以拥有安全及体面的工作，更多的精力可以投入到具有创造力和趣味性的工作中；离开办公室，智能汽车、智能飞机、智能轮船会给我们带来智慧化、共享化的第三空间，让我们拥有便捷、安全的出行体验；当我们需要购物时，我们会以低廉的价格买到大规模定制化生产的独一无二专属于我们的服装、家居、电器。其它标准化的产品都会被自动补货进入我们的冰箱、橱柜和储藏室；未来的工业，还会给我们带来普惠的、一人一策的、定制化的教育和医疗服务。当然，未来工业还会为我们带来清新的空气、洁净的水和美丽的蓝天。[18]



# 06 参考文献

- [1] 《2021年中国工控自动化行业概览》，头豹研究院，陆淦，2021.03
- [2] 《工业数据采集产业研究报告》，工业互联网产业联盟，2018.09
- [3] 《Industrial Communications Report - 2020 Analysis》，OMDIA, Syed Mohsin Ali, 2020
- [4] 《2022年中国边缘计算产业研究报告》，亿欧智库，2022.11
- [5] 《工业基础设施市场空间报告》，MIR睿工业，2022.03
- [6] 《PC-based 运动控制器市场深度观察》，MIR睿工业，2020
- [7] 《Virtual PLC & Soft PLC Market Report 2020-2025》，IoT Analytics, 2020.11
- [8] 《走向工业自动化的未来——浅谈三个发展趋势》，彭瑜（PLCOpen中国组织名誉主席），2022.11
- [9] 《2030德国工业4.0愿景》，赛迪智库译丛，2019.08
- [10] 《工业4.0时代 给中国企业创新带来的机遇和挑战》，中国知识产权杂志总106期，周砚，余刚，李慧
- [11] 《智能制造新工具：自动持续优化》，德勤，2022
- [12] 《数字孪生技术和应用趋势》，华为茶思屋.MKT科技外交家思想沙龙第11期，赵社峰，2022.11
- [13] 《我国智能制造发展趋势研判》，赛迪（上海）先进制造业研究院，董凯，2021.03
- [14] 《2020 中国制造强国发展指数报告》，中国工程院战略咨询中心、机械科学研究总院集团有限公司、国家工业信息安全发展研究中心、南京航空航天大学，2020.12
- [15] 《工业智能白皮书》，工业互联网联盟，2020.04
- [16] 《IBM Analytics工业4.0与物联网白皮书》，IBM，2020
- [17] 《网络体系强基展望白皮书》，华为技术有限公司，2021
- [18] 《工业数字化/智能化2030》，华为技术有限公司，2023
- [19] 《开放自动化白皮书》，机械工业仪器仪表综合技术经济研究所&施耐德电气（中国）有限公司，2021.08
- [20] 《南钢的数字化转型之路：新一代工控架构的探索与实践》，南京钢铁股份有限公司@2022世界智能制造大会，林锦斌，2022.10

[21] 《工业智能的研究方向和研究思路》，东北大学，柴天佑，2021

[22] 《制造流程智能化对人工智能的挑战》，中国科学基金报2018年第3期，柴天佑，2018

[23] 《Improve the Value generated by your Process Plant/Site by using the Single Physical Layer for the Future: Ethernet-APL》，ODVA, Benedikt Spielmann &Endress+Hauser, 2020.03

[24] 《2022年我国可编程逻辑控制器（PLC）行业市场规模增长及各厂商市场份额统计》，立鼎产业研究网，2023.03.03

## 指导专家

张相木 国家智能制造专家委副主任、智能制造系统解决方案供应商联盟专家委员会主任

欧阳劲松 国家智能制造专家委副主任、机械工业仪器仪表综合技术经济研究所所长

## 参编单位

工业和信息化部装备工业发展中心

华为技术有限公司

深圳市汇川技术股份有限公司

机械工业仪器仪表综合技术经济研究所

上海交通大学

新奥新智科技有限公司

东风设计研究院有限公司

重庆川仪自动化股份有限公司

中电智能科技有限公司

## 编写人员

孙建平 徐前锋 肖冠男 李瑞琳 杨磊 严义 刘丹 邱月峰 唐新兵 戴文斌 马力

秦希青 耿亮 张浩 胡秀敏 胡仲怀 窦连旺 林浩