

离散制造业边缘计算 解决方案白皮书



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

中国信息通信研究院
工业互联网产业联盟
2020年1月

声 明

本报告所载的材料和信息，包括但不限于文本、图片、数据、观点、建议，不构成法律建议，也不应替代律师意见。本报告所有材料或内容的知识产权归工业互联网产业联盟所有（注明是引自其他方的内容除外），并受法律保护。如需转载，需联系本联盟并获得授权许可。未经授权许可，任何人不得将报告的全部或部分内容以发布、转载、汇编、转让、出售等方式使用，不得将报告的全部或部分内容通过网络传播，不得在任何公开场合使用报告内相关描述及相关数据图表。违反上述声明者，本联盟将追究其相关法律责任。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟

联系电话：010-62305887

邮箱：aii@caict.ac.cn

致 谢

本白皮书由中国信息通信研究院（以下简称“中国信通院”）牵头、工业互联网产业联盟、边缘计算产业联盟、华为技术有限公司、中国科学院沈阳自动化研究所、广州中国科学院沈阳自动化研究所分所、树根互联技术有限公司、和利时科技集团有限公司、机械工业仪器仪表综合技术经济研究所、阿里巴巴网络技术有限公司、北京亚控科技发展有限公司、华中科技大学、中国联合网络通信有限公司网络技术研究院、北京邮电大学等联合撰写发布。

白皮书编写组成员：时晓光、王哲、罗松、宋华振、史扬、肖金超、胡晓晶、陈冰、王永辉、李天辉、刘学东、武兆宝、张硕、吕华章、刘秋妍、卢铁林、程晓磊、郎平、刘金娣、薛俊礼。

白皮书编写过程中，编写组就离散制造业边缘计算关键问题先后征询了高新民、朱森第、于海斌、余晓晖、续合元、王爱华、曹蓟光、张恒升、黄颖等专家意见，并结合意见对白皮书进行了多次修改和完善。

在此一并感谢所有参与本白皮书编写，以及为本白皮书编写提供指导和建议的专家、企业和机构。

前 言

数字化浪潮正席卷传统离散制造业，逐步优化了生产车间的工艺条件和生产流程，在这个过程中，边缘计算快速兴起并体现出特有优势。边缘计算是在靠近物或数据源头的网络边缘侧，构建融合网络、计算、存储、应用核心能力的分布式开放体系，就近提供智能化服务，满足离散制造业在敏捷联接、实时业务、数据优化、应用智能、安全与隐私保护等方面的关键需求，其为离散制造业的数字化、网络化、智能化转型提供了强大助力。

同时，针对离散制造业的转型升级需求，其边缘计算解决方案在不断发展成熟，相关生态构建和产业布局也正在全球加速展开。在此关键时期，中国信息通信研究院联合工业互联网产业联盟共同发布《离散制造业边缘计算解决方案白皮书》，把握离散制造业目前发展面临的挑战及边缘计算当前的应用现状，研判边缘计算为工业现场带来的真正价值，提出离散制造业边缘计算实施架构及技术体系，探索边缘计算解决方案实践，最后结合当前现状给出了离散制造业边缘计算技术和产业化发展建议。

目 录

一、 离散制造业发展面临的挑战及边缘计算的应用价值.....	1
(一) 离散制造业迎来新的发展机遇.....	1
(二) 离散制造业转型发展对边缘计算能力的需求分析....	2
1.制约离散制造业转型发展的关键因素	2
2.边缘计算带来的工业现场价值.....	4
(三) 离散制造业边缘计算应用基本情况	7
1.边缘控制器层	8
2.边缘网关层	10
3.边缘云层	10
二、 离散制造业边缘计算实施架构及技术体系	11
(一) 离散制造业边缘计算实施架构	11
(二) 离散制造业边缘计算关键技术	12
1. 边缘智能	12
2. 异构计算	13
3. 互联互通技术	14
4. 微服务	14
5. 计算迁移	15
三、 离散制造业边缘计算解决方案实践.....	15
(一) 汽车生产制造领域边缘计算解决方案实践	16
1. 面临问题和挑战	16
2. 边缘计算解决方案实践	18

3. 实践效果	19
(二) 电子制造领域边缘计算解决方案实践	20
1. 面临问题和挑战	20
2. 边缘计算解决方案实践	21
3. 实践效果	23
(三) 工程机械领域边缘计算解决方案实践	23
1. 面临问题和挑战	24
2. 边缘计算解决方案实践	25
3. 实践效果	26
(四) 船舶制造领域边缘计算解决方案实践	26
1. 面临问题和挑战	26
2. 边缘计算解决方案实践	29
3. 实践效果	31
(五) 定制家具领域边缘计算解决方案实践	31
1. 面临问题和挑战	31
2. 边缘计算解决方案实践	32
3. 实践效果	33
四、 离散制造业边缘计算发展趋势及建议	34
(一) 离散制造业边缘计算未来展望	34
(二) 离散制造业边缘计算技术和产业化发展建议	35
1. 产业化发展建议	35
2. 技术及标准发展建议	36

图表目录

图 1 边缘计算通用架构	9
图 2 离散制造业边缘计算实施参考架构	11
图 3 智能产线终端架构	19
图 4 电子生产数字化车间解决方案架构	22
图 5 智能生产系统架构	26
图 6 船舶舾装件制造行业个性化定制和自组织生产系统框架	30
图 7 定制家具生产系统解决方案架构	33

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

一、离散制造业发展面临的挑战及边缘计算的应用价值

（一）离散制造业迎来新的发展机遇

在全球已经掀起的新一轮工业转型浪潮中，数字化是基础，网络化是支撑，智能化是目标，在此背景下，离散制造业转型面临巨大发展机遇。当前，在产品规划、设计、制造、运营等生产过程中，离散制造业产品、生产装备、工艺流程等已经逐步实现了数字化和网络化，且智能传感和人工智能等技术不断发展成熟，因此，离散制造业的全面转型已经具备了基础条件。而边缘计算作为工业互联网工厂内网的关键技术以及连接工厂内外网的有效手段，是推动离散制造业转型发展的重要使能技术。

离散制造业与流程制造业相比，生产环节更加分散，生产设备更加多样，更容易通过软件改造工艺流程，而流程制造业因为其本身自动化水平已经很高，生产环节较为成熟封闭，且主要由硬件决定生产流程和产能，因此针对离散制造业的边缘计算解决方案率先在工业互联网应用中落地实施，边缘计算的功能和特点能够在实施过程中更易实现和展示，本白皮书也重点从离散制造业入手，进行边缘计算解决方案的分析。

随着新的发展模式不断成熟，对高质量发展的需求不断增加，未来离散制造业生产方式将朝着智能化方向提升，个性化定制、网络化协同、智能化生产、服务化延伸成为引领制造业高端化的重要模式。而工业互联网边缘计算的兴起将推动离散制造业沿着数字化、网络化、

智能化阶段不断跃升。

（二）离散制造业转型发展对边缘计算能力的需求分析

1. 制约离散制造业转型发展的关键因素

随着新一代信息技术的进步和相关政策的支持，我国离散型制造业正积极的向数字化、网络化、智能化方向转型，但是制约离散制造业转型的因素仍有很多，例如多数离散制造企业没有统一的数据标准；特殊工艺规划等方面不易进行数字化积累；现有数据资源的可利用率不高，降低了数字化的实用价值；缺少统一规划和认证，工业现场存在众多“信息孤岛”，数据开放度低；工业现场网络协议多样异构，互联互通困难等，这些因素都为离散制造业转型发展造成阻碍。目前中国离散制造业自动化技术方面的发展现状及挑战如下：

单机设备自动化软件的结构化和柔性化不足，缺少开放式接口，设备间缺少统一的互联互通标准。因为离散制造业涉及的行业众多，发展不均衡，整个离散制造业目前还未普遍实现基于订单的柔性自动化生产。总体上，随着数控机床、工业机器人以及可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controller, PLC）的广泛应用，各个行业的单机自动化水平都有了较大提升，但离散制造业整体还处于以单机自动化为主和刚性自动化产线为主的状况，柔性自动化产线较少，真正实现基于订单的柔性自动化产线更少，OT系统和IT系统难以实现互联互通。

数据采集困难，缺少完整的数据集成应用架构。目前离散制造业

普遍存在低端产能过剩、高端产能不足的情况。提高高端产能首先需要从装备入手提高生产品质。一方面，行业知识还需要长期积累来转化为设备工艺软件的进步；另一方面，数据驱动的应用还需进一步加强来促进工艺参数的优化、生产调度的优化、生产设备的实时监控诊断、预测性维护等。行业内大部分设备和产线传感器数量不足，一些关键的物理量尚缺乏有效的传感测量手段，一些自动化装备获取的状态数据没有通过开放式接口提供给第三方，且原有的自动化系统和架构都不能提供良好的支撑。

装备和产线自动化软件系统薄弱，软件升级维护困难。在目前的发展阶段，各个离散制造行业的自动化软件水平极不均衡，在装备中还存在大量“黑盒子”，即缺少关键工艺控制能力，大量采用第三方的专用控制器，既难以实现工艺算法和软件的自主迭代升级，也影响了装备软件的统一架构设计。很多装备的人机交互软件、逻辑控制、运动控制等分布在多个PLC，专用控制器，触摸屏，甚至嵌入到底层的伺服驱动器等硬件中，相互之间连接和控制方式不尽相同，导致装备缺乏整体的软件架构设计。同时，软件与硬件耦合严重，设备的软件含量低，结构化设计不足，硬件设备和设备功能的更换升级都会造成大量的低效软件升级工作，距离“软件定义机器”的目标还比较远。

生产线设备的功能安全和信息安全形势严峻。原有的大量自动化设备主要运行在刚性、封闭的自动化系统中，缺少内置的功能安全和信息安全机制，要适应柔性自动化生产，设备功能动态重构，与IT系统互联互通等要求，必须要有功能安全和信息安全的保障。

工厂运营人员劳动强度大，效率低。相对于流程行业，离散制造业的设备产线操作人员、品质检测人员、生产管理人员、设备维护人员工作内容更为繁琐，更容易出现疲劳状况。对于生产规划人员来说，离散制造涉及的不确定性因素较多，制定按需生产、有弹性的生产计划比较困难。一些关键零件加工环节、装配环节不能完全依赖于自动化，需要有经验的工人完成，目前尚缺乏有效的人机协作机制来减轻操作工人的劳动强度。基于机器视觉等手段的在线检测装置正获得广泛的应用，但在很多工厂，质量检测仍是一个劳动力密集环节。

原有标准和解决方案不适应转型发展。原有的工厂自动化和信息化架构的参考模型主要是 ISA-95 的金字塔模型，该模型定义了工业现场设备及系统的接口和数据交换标准。目前，一方面在实际中该标准并没有得到很好的实现，广泛采用的是主流厂家以数据库为中心的方案；另一方面，该标准也需要进一步完善，适应离散制造业数字化转型的需求。



2. 边缘计算带来的工业现场价值

随着离散制造业的发展，对高质量发展的需求不断增加，对业务时延、隐私和安全等指标的要求也进一步升级，整体作业呈现精细化、柔性化和智能化的发展趋势，这就不仅需要云计算的整体运筹，也需要边缘计算的本地实时决策职能。

边缘计算是在靠近物或数据源头的网络边缘侧，构建融合网络、计算、存储、应用核心能力的分布式开放体系，形成新的生态模式，就近提供边缘智能服务，满足离散制造业在敏捷联接、实时业务、数

据优化、应用智能、安全与隐私保护等方面的关键需求，从 OT 与 IT 跨界协作、推动信息流动和集成、实现知识的模型化以及开展端到端的产业各环节协作推动离散制造业的发展。

边缘计算提供了设备之间互联互通机制、OT 系统和 IT 系统互联互通机制，以及部署于工业现场的实时数据采集、汇聚、存储、分析机制，可以快速便捷地实现 OT 与 IT 的整合。边缘计算及支撑技术有利于解决离散制造业当前和未来所面临的如下问题：

边缘计算能有效解决离散制造系统的连接性问题。离散制造领域行业众多，行业碎片化导致设备连接协议众多，造成设备互联困难。边缘计算具有完善的连接配置和管理能力，收集系统间实时通信需求和服务质量要求，运行优化调度算法，转化为对时间敏感网络（Time Sensitive Networking, TSN）交换机和 5G 网络的配置，支持多种实时数据流传输。在保证信息安全的基础上，不仅可以把支持传统接口和协议的设备接入，而且通过引入数据抽象层，使得不能直接互联互通的设备基于边缘计算实现互联互通，边缘计算的低延迟性能可以保证设备间的实时横向通信。

边缘计算为离散制造业提供边缘侧的建模工具及智能工具。不同类型的离散制造工厂，都需要不断提高自动化和数字化程度，提升制造质量和效率，不断丰富以数据为中心的各种应用。边缘计算作为物联网架构的中间层，提供了现场级的实时计算、存储和通信机制。容器化的边缘计算核心组件和应用程序部署机制、标准化的设备数据采集机制，逐步完善的边缘应用程序生态、基于边云协同的人工智能模

型训练和部署机制，将为离散制造领域专家提供大量平台化、模块化的灵活易用工具，不断提升工厂的精益制造能力。

边缘计算为离散制造业提供决策和效率优化能力。当前大量离散制造系统受限于数据的不完备性，整体设备效率等指标数据计算比较粗放，难以用于效率优化。边缘计算基于设备信息模型实现语义级别的制造系统横向通信和纵向通信，基于实时数据流处理机制汇聚和分析大量现场实时数据，实现基于模型的生产线多数据源信息融合，为离散制造系统的决策提供强大的数据支持。边缘计算可以有效支持：物料的标识和可追溯性；设备和产线的实时状态监控；现场操作指导和操作优化；自适应的生产调度和工序的优化；上下料和车间物流环节的优化。

边缘计算为离散制造系统的数字孪生系统提供支撑。数字孪生系统是数字制造系统的核心，包括产品数字孪生，生产过程数字孪生，性能数字孪生。数字孪生系统发挥作用依赖于深入的领域知识和丰富的实际数据。边缘计算基于设备管理壳模型来对实时数据进行清洗和预处理，来保证数据的完整性和有效性，为模型和数据的融合提供基础支撑。

边缘计算具有丰富的抽象和粘合能力，针对老工厂升级和新工厂建设的不同需求，能够提供具有一致性的设计解决方案。目前大量老工厂都面临数字化转型问题，边缘计算由于具有丰富的连接性和灵活的部署能力，可以提供多种轻量级的解决方案，在不对自动化装备进行大规模升级的情况下，通过增加边缘网关和必要的边缘数据采集终

端等，可以有效提高制造工厂的数字化水平，加强数据在制造系统各个环节间的流动，实现各种基于数据的智能应用。

边缘计算可以实现离散制造系统实时工业软件开发的软硬件解耦。智能工厂的运行依赖于智能装备和智能流程，需要大量的实时软件支持。目前很多装备实时应用软件过度依赖于具体的控制系统硬件，难以迁移到不同的系统。基于边缘计算的微服务架构，可以将大量实时规划、优化排版、设备监控、故障诊断和分析、自动导引运输车（Automated Guided Vehicle，AGV）调度等功能封装在边缘应用程序上，实现了软件与硬件平台的解耦，降低了开发难度，提高了软件质量，通过边缘计算可进行边缘应用程序的灵活部署，实现了领域知识的分享。

边缘计算可以进一步促进离散制造系统的 IT/OT 融合。边缘计算既连接 OT 系统，又连接 IT 系统，既具有低延迟、高可靠的现场实时数据采集和处理能力，又有丰富的 IT 工具和接口，是当前实现离散制造系统的 IT/OT 融合的有效手段。边缘计算通过提供整体的数据发布/订阅机制，根据离散制造柔性生产的需求，可以实现从数据源到多个数据订阅端的实时通信，解决传统结构信息流动不畅的问题。边缘计算提供了现场侧丰富的计算和存储能力，可以利用边缘计算数据处理组件和边缘 APP，把各种工艺算法进行灵活部署，实现边缘和云的协同。

（三）离散制造业边缘计算应用基本情况

目前，边缘计算在离散制造业中的物理实现形式主要以边缘控制

器、边缘网关以及边缘云为主，如图1所示，企业将根据自身需求部署其中一层或者多层架构。其中，边缘控制器、边缘网关以及边缘云基于云原生的边云协同架构，采用轻量级容器管理、虚拟化等技术构建统一的现场异构数据集成平台，负责从各现场设备采集数据，实现边缘侧人员、设备、物料、环境、业务管理等数据的统一接入、本地集中存储、边缘分析处理等。

1. 边缘控制器层

边缘控制器是工业互联网边缘侧连接各种现场设备，进行工业协议的转换和适配，统一接入到边缘计算网络中，并将设备能力以服务的形式进行封装，实现物理上和逻辑上生产设备之间通信连接。边缘控制器硬件架构设计采用分布式异构计算平台，一般采用异构计算体系结构，支持全分布式控制以及多种控制器的协作运行和无缝集成，也是目前各种实时嵌入式硬件平台实现的主流实现方案；在满足硬件实时需求前提下，利用多物理内核结合虚拟化技术的支持，实现在同一硬件平台上运行实时与非实时任务或操作系统，并满足系统多样化与可移植性的需求，提高整体平台体系的安全性、可靠性、灵活性以及资源的利用效率；应用时空隔离的多任务和多线程调度机制与改造优化调度算法相结合的方式，实现任务调度机制。

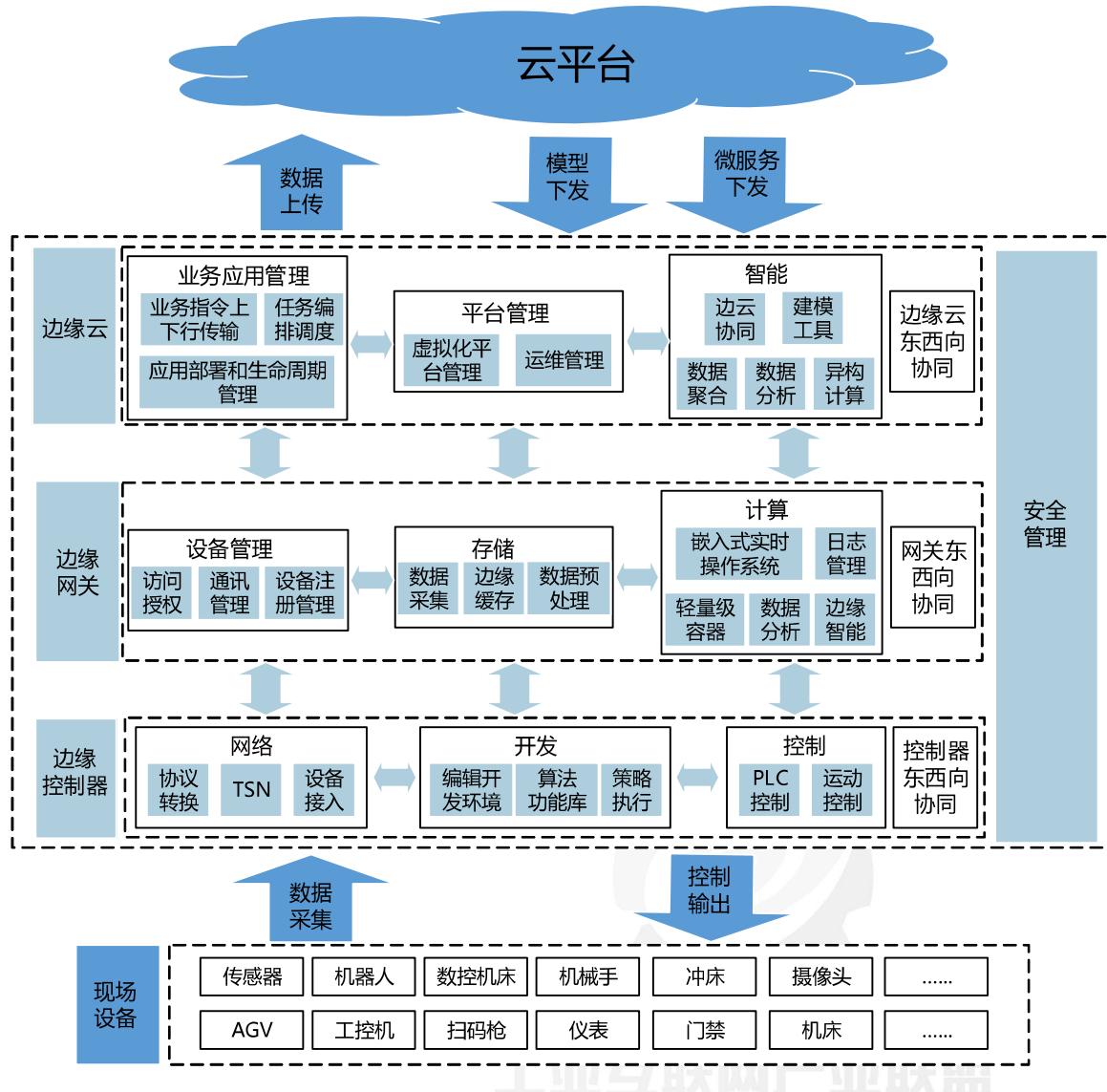


图1 边缘计算通用架构

针对需要采用多控制器协同控制的智能工厂复杂任务，边缘控制器采用协同控制策略和控制一致性协议，结合无边界网络化的动态仿真技术，提高现场干扰环境中网络信息交换时智能控制系统的鲁棒性和实时性，实现多控制器在动态环境下的自适应协同控制。同时，采用软件定义的网络化智能控制系统技术，提高了控制系统的灵活性，对边缘侧生产设备和产线，可快速满足小批量多品种柔性制造的控制工艺重构要求。

2. 边缘网关层

边缘网关是指具备边缘计算、过程控制、运动控制、机器视觉、现场数据采集、工业协议解析能力的边缘计算装置。边缘网关能适应工业现场复杂恶劣环境，满足国内主流控制器、工业机器人、智能传感器等工业设备的接入和数据解析的需求，支持边缘端数据运算及通过互联网推送数据到工业互联网平台。

边缘网关可将现场各种工业设备、装置采用、应用系统的标准或私有通信协议转化成标准 OPC UA 等通讯协议，使得上位系统及工业互联网平台可采用统一的协议和信息模型与不同设备和系统互相通信，方便系统集成，实现远程监控、故障诊断、配置下载、远程管理等功能。

3. 边缘云层

边缘云是边缘侧单个或者多个分布式协同的服务器，通过本地部署的应用实现特定功能，提供弹性扩展的网络、计算、存储能力，满足可靠性、实时性、安全性等需求，是实现 IT 技术与 OT 技术深度融合的重要纽带。

一方面，将在云端基于机器学习离线训练好的模型部署到边缘云，并通过定期更新模型算法来同步边缘智能，可以使得紧急类故障能够在本地及时报警，同时可以对一些相关参数指标进行实时修正。另一方面，根据模型中输出与特征之间权重关系，优化终端上传数据的过滤规则，以此减少流量成本和云端存储成本。

二、离散制造业边缘计算实施架构及技术体系

（一）离散制造业边缘计算实施架构

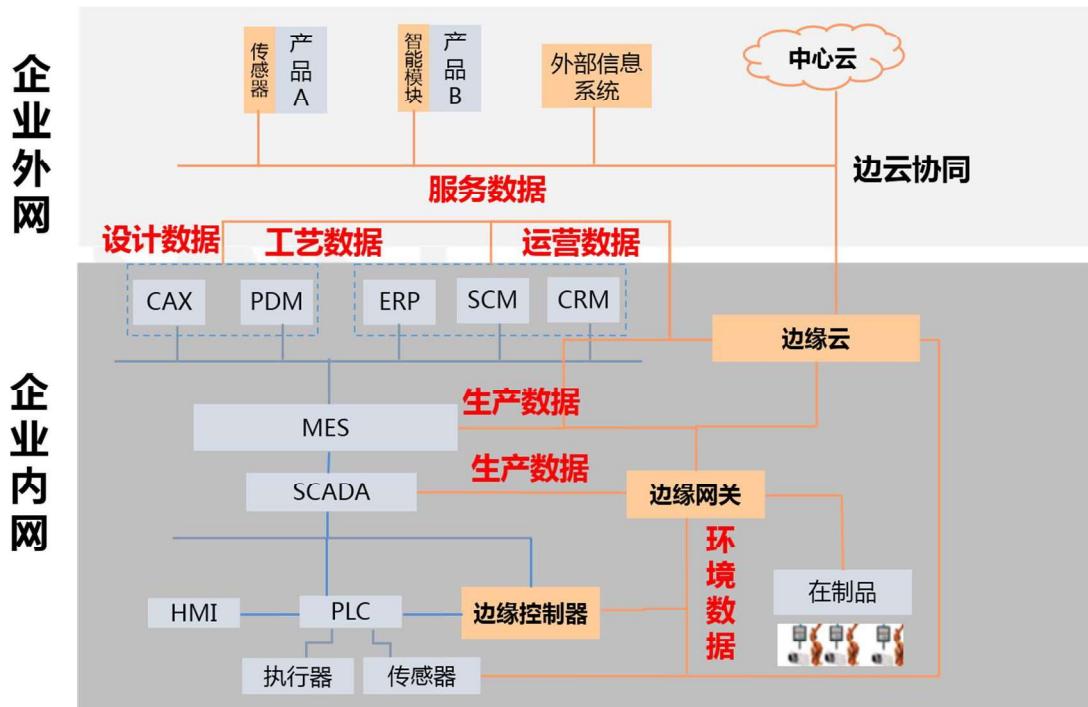


图 2 离散制造业边缘计算实施参考架构

如图 2 所示，整个离散制造业边缘计算实施架构包括现场设备层、边缘计算层（包括边缘控制器、边缘网关、边缘云）以及支持边云协同的中心云层，边缘计算层负责从各现场设备采集数据，实现边缘侧人员、设备、物料、环境、业务管理等数据的统一接入、本地集中存储、边缘分析处理等，并通过对现场设备的物联集成（如：生产设备、物流设备、检测设备）采集设备运行参数，将数据传送至中心云，同时实时接收中心云下发的控制指令，最终反馈至相应设备，从而实现对现场设备的数字化管理，对离散制造业的生产过程控制、工艺优化具有重要意义。

此外，随着边缘计算在离散制造业中的应用不断广泛，云计算与

边缘计算的协同效应也在快速增强，边云协同成为离散制造业数字化改造的主要使能器。一方面，边缘计算在工厂内部发挥重要作用。边缘侧数据分散，本地应用系统多，需要大量的计算、存储资源。边缘计算可以实现业务数据本地处理及生产现场的实时控制反馈，同时，边缘计算通过东西向联接进行数据和知识的交换，支持计算、存储资源的横向弹性扩展，能够完成本地的实时决策和实时优化操作。另一方面，边缘计算将与工厂外的云平台协同联动，边缘侧聚焦实时、小数据的处理，而云平台侧聚焦长周期、大数据的处理。边缘计算通过南北向链接与更上层的工业云平台实现数据交换和应用管理协同，实现边缘侧基础设施资源的统一管理、调度和运维，支撑边缘侧应用的灵活部署和升级。

（二）离散制造业边缘计算关键技术

离散制造业边缘计算需要解决海量数据管理与处理、多源数据集成、各类设备接入、数据建模分析、资源规划分配、应用创新与集成等一系列问题，边缘计算的核心关键技术能够支撑这些需求，一些典型关键技术在业界被广泛应用并受到高度关注，其中一方面边缘智能、异构计算、互联互通等技术进一步提升边缘侧面向离散制造业的数据管理和分析能力；另一方面微服务与计算迁移等技术不断提升平台资源利用效率，进一步提升边缘计算服务能力。

1. 边缘智能

边缘智能是赋能离散制造业实现数字化转型的关键技术，提供了

边缘侧的建模能力、数据汇聚和分析能力。边缘智能从延迟、内存占用量和能效等方面，进行边缘计算节点上智能推理加速和多节点智能训练算法的联动，完成轻量级、低延时、高效的人工智能计算框架，边缘设备需要执行越来越多的智能任务，例如在刀具监测过程中，通过对机床主轴负载数据进行采集与分析，实现边缘侧刀具在加工过程中的实时状态监测和寿命预测管理以及数据信息可视化；此外，针对信息安全、数据不出网等要求，边缘节点需要完成数据安全预处理，边缘-云数据中心协同才能开展完整的智能模型训练，以上操作配合计算机视觉、自然语言处理等智能算法模型库和强化学习、离线分析、迁移学习等工具组建，形成完整的边缘智能功能栈。

边缘节点应用对计算和流量宽带处理存在较强依赖，计算方面，应用需要智能算法框架完成人机交互、编解码/加解密等算法框架进行信息预处理、离散制造等建模算法构建专业领域信息框架；流量方面，边缘节点需要数据源带宽低收敛比、低时延响应的物理资源环境，以满足数据传输和交互需求。

2. 异构计算

工业互联网应用的普及带来了信息量爆炸式增长，特别在离散制造业，海量的传感器数据、文本/超文本、声音数据、影像数据、视频序列等对边缘计算能力都提出了更高的要求，边缘设备既要处理结构化数据，同时也要处理非结构化的数据。因此，离散行业业务与数据的多样性驱动计算的多样性是必然趋势。针对上述需求，业界提出了将不同类型指令集和不同体系架构的计算单元协同起来的异构计算

架构，以充分发挥各种计算单元的优势，实现性能、成本、功耗、可移植性等方面均衡。在离散行业通过异构计算对各种类型数据进行内容分析和融合处理，从海量数据中挖掘隐藏信息和有效数据，提高离散制造过程中各种装备状态监测的准确性。

3. 互联互通技术

OPC UA Over TSN 为传感器层、控制器层到自动化软件层提供一套统一且标准的网络与通讯体系，打破自动化金字塔的传统结构，并有效解决用户与集成商在系统集成时所遇到的困境。TSN 技术和 OPC UA 相结合，可以满足离散制造业应用的各种传输需求，支持边缘侧工业设备的联网接入，实现边缘侧的互联互通，赋予离散制造业生产制造系统高度灵活性，工厂车间网络架构可以快速调整优化，有效提升网络化协同制造与管理水平。

例如，在离散制造业工厂数据采集、传输与生产运营中，都会需要对现场的机器状态、生产能耗、生产质量等相关参数进行采集，TSN+OPC UA 在整体上使得工厂各个环节的横向与纵向数据实现了透明交互，并且配置效率更高，程序与应用模块化更强，为工业互联网边缘计算提供了有力支撑。

4. 微服务

微服务是一种开发应用软件的方法，围绕特定业务功能构建一套小型独立可部署的服务。传统的 IT 行业软件大多都是各种独立系统的堆砌，存在扩展性差，可靠性不高，维护成本高，无法直接在边缘