

工业互联网边缘智能发展现状与前景展望

任姚丹珺¹, 戚正伟¹, 管海兵¹, 陈磊²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 中国工程院战略咨询中心, 北京 100088)

摘要: 随着工业互联网与制造生产的深度融合, 工业智能应用对制造业数字化、信息化转型的驱动能力逐渐显现, 相应新型应用对服务质量提出了更高要求。边缘智能作为边缘计算和人工智能结合的产物, 利用近数据源的计算资源完成智能任务, 能够有效缓解带宽传输压力、缩短业务响应时延、保护隐私数据安全, 为工业智能应用的性能需求提供了一种可行的解决方案。本文围绕协同计算、资源隔离、隐私保护等工业互联网边缘智能关键技术的研究现状, 结合边缘智能在设备管理服务、生产过程自动化、制造辅助等工业互联网典型场景的应用进行了具体分析。梳理工业互联网边缘智能未来在业务驱动模式、产业生态组成、联盟作用、商业模式等方面的发展趋势, 针对性提出相关政策建议: 整合产业优势资源, 推动行业标准确立; 加大对基础共性资源的投入, 深化工业互联网应用; 在细分领域营造良好产业生态; 校企合作培育复合型人才队伍。

关键词: 工业互联网; 边缘计算; 边缘智能; 协同计算; 资源隔离

中图分类号: T-01 **文献标识码:** A

Development and Prospect of Edge Intelligence for Industrial Internet

Ren Yaodan jun¹, Qi Zhengwei¹, Guan Haibing¹, Chen Lei²

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Center for Strategic Studies, Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China)

Abstract: As the industrial Internet deeply integrated with manufacturing, the drive capability of industrial intelligence becomes prominent regarding the digitization and informatization of the manufacturing industry. Meanwhile, new applications propose higher requirements for service quality. Edge intelligence, a product of edge computing and artificial intelligence, completes intelligent tasks using computing resources near the data origin. It can alleviate bandwidth transmission pressure, shorten service response delay, and protect the security of private data. Hence, edge intelligence provides a possible approach to satisfy the performance requirements in industrial intelligence applications. This study reviews the research status of cooperative computing, resource isolation, privacy protection, and other key technologies in edge intelligence. Then the typical applications of edge intelligence in equipment management services, production process automation, and manufacturing assistance in the industrial Internet are analyzed in detail. Moreover, the development trend of edge intelligence for the industrial Internet is analyzed in terms of business driving mode, industrial ecology composition, alliance role, and business model. Furthermore, relevant policy suggestions are proposed. We suggest that superior resources should be integrated to establish industry standards; investment increased in basic common resources to deepen the application of the industrial Internet; a good industrial ecology created in the subdivided fields; and university-enterprise cooperation promoted to cultivate interdisciplinary personnel.

Keywords: industrial Internet; edge computing; edge intelligence; cooperative computing; resource isolation

收稿日期: 2021-01-22; **修回日期:** 2021-02-28

通讯作者: 管海兵, 上海交通大学电子信息与电气工程学院教授, 研究方向为虚拟化技术和云计算; E-mail: hbguan@cs.sjtu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“工业互联网创新发展战略研究”(2019-ZD-12)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

随着全球经济竞争进一步激烈,新一轮信息产业变革兴起;与消费互联网相比,实体制造业面临着生产运营成本高、产品附加价值低等问题,产业数字化和智能化变革刻不容缓[1]。快速发展的边缘计算和人工智能(AI)技术正成为制造业全面转型的重要推动力,工业发达国家纷纷制定制造业智能化升级发展战略。随着通用电气公司、微软公司、亚马逊公司等诸多巨头企业积极布局,美国已孕育出以 Predix 为代表的一批工业互联网平台[2]。德国立足雄厚的自动化生产基础,率先提出“工业 4.0”战略,积极规划交通、医疗、能源、制造业等领域的创新发展[2]。日本、韩国、法国、瑞典等也推出了制造业转型升级计划,构建以数字化为基础的生产发展模式以保持制造业优势。我国作为制造大国,高度重视工业互联网的发展,2020 年国家发展和改革委员会首次明确“新基建”重点领域包括工业互联网,指出工业互联网建设是信息基础建设的核心内容;一批制造业龙头企业、互联网公司、技术创新企业等开展工业互联网前沿探索,在协同制造、产品全生命周期管理、用户定制化等方向形成了多个工业互联网平台[3]。

工业互联网产业起源于大国以产业升级为核心的博弈,依托开放互联的全球化信息网络平台,工业互联网推动工业生产、销售、物料供应等流程各要素更加数字化、网络化、自动化、智能化[4]。联网设备数量急剧增加,随之增长的数据总量为网络资源带来极大压力,传统的云计算模式在带宽不足的情况下很难实时响应终端设备的请求[5]。推动云能力下沉、提升边缘设备处理能力成为发展趋势,而工业互联网边缘智能的兴起将推动制造业深度挖掘数据价值,形成云-边-端协同计算的整体架构,从而营造工业生产新生态[6]。

本文针对工业互联网边缘侧智能化程度不断提高的发展现状,调研协同计算、资源隔离、隐私保护等工业互联网边缘智能的支撑技术;分析工业互联网边缘智能的代表性应用场景,探讨工业互联网边缘智能的发展趋势;提出我国工业互联网边缘智能的发展建议,以期为国家制造业智能化升级提供参考。

二、工业互联网边缘智能的定义与研究范畴

工业互联网平台是新工业体系的“操作系统”,通常分为现场层、边缘层、基础设施即服务(IaaS)层、工业平台即服务(PaaS)层、应用层;国内主流厂商开发的工业互联网平台都参照类似范式[2]。边缘层是平台的基础,承担着接入现场层设备、协议解析、边缘数据处理等任务。PaaS 层提供应用开发平台、工业微服务组件等功能。应用层包含面向企业传统需求的软件优化、面向特定场景的应用创新,是工业互联网平台价值的集中体现。

随着万物互联时代的到来,联网设备的数量急剧增长,产生的数据总量随之增加,从端到云的数据传输会带来巨大的带宽压力和能源消耗,使得传统的集中式处理不堪重负,由此催生了边缘计算并逐步向边缘智能发展[7]。在对时间延迟更敏感、联网设备更多、数据安全性要求更高的智能工厂中,边缘智能的需求更为突出[8]。一般认为,未来智能工厂每天会产生 1 PB 以上的生产监控数据,由于检测、控制、执行操作要求的时延一般小于 10 ms,现行的终端-核心网-云端模式根本无法保障实时性要求;边缘智能方案在边缘即时处理和回馈结果给终端,有望将实时性、短周期业务的处理时延降低至 1 ms[9]。边缘智能的资源包括从终端到云计算中心传输路径上的所有计算和网络设备,因此能在近数据源侧完成收集、分析与决策任务[3]。通过将云计算中心的存储、计算、智能资源下沉到网络边缘侧,推动智能应用从云端向边缘迁移,边缘智能方案有望满足制造业在实时响应、智能应用、敏捷感知、需求多样、隐私保护、数据海量且异构等方面的关键需求。

边缘智能定义为:具备机器学习和高级网络功能,在网络边缘节点处理和存储数据的高级边缘计算[8]。需要指出的是,边缘计算与云计算并非相互替代的关系,而是通过协同来高效利用终端-边缘-云端路径上的所有计算和存储资源,全面提升数据处理能力,促进工业智能应用的落地与推广。边缘智能将有效应对当前工业互联网发展面临的诸多挑战(见图 1):业务需求多样,单一计算模式无法满足各类应用的特定要求;业务数据海量且异构,需要实时管理多种数据流;原有生产设备缺少内置安

全机制，存在隐私数据泄露的风险等。

三、工业互联网边缘智能发展现状

(一) 工业互联网边缘智能的关键技术

1. 协同计算

协同计算方案一般按参与计算的主体分类（见图2），包括由云计算中心、边缘节点协同的云边协同，由边缘控制器、网关、边缘云等多种边缘设备协同的边边协同。目前工业界探索较多的是云端-边缘协同计算，按各自承担的计算任务进一步划分为预测-训练云边协同、云导向的云边协同、边缘导向的云边协同[10]。边边协同计算是新兴的研究方向，相较于云边协同，在进一步保护用户隐私数据的同时，又避免“数据孤岛”现象[8]。

在训练-预测云边协同中，云计算中心汇聚边缘设备的上传数据，对AI模型进行集中训练和更新；边缘设备承担数据入口、推理结果出口的任务，应用于视频检测、设备工况预测等方向，获得成熟的框架支持[11]。在云导向的云边协同中，云计算中心除了负责模型的训练和更新，还承担一部分模型推理的计算任务；需要对模型选取合适的切割点，平衡计算和通信开销，如Kang等[11]提出基于DNN模型各层的时延估计来确定满足目标的最佳模型分割点。在边缘导向的云边协同中，边缘设备除了承担模型推理和数据收集任务，还承担在本地或近邻设备上训练和更新模型的任务。

边缘-边缘协同计算是当前协同计算的研究热点，如McMahan等[12]提出的联邦学习综合考虑了隐私性、服务质量、通信开销等多种因素，不直接上传在边缘收集到的数据，而在本地训练后向云端上传更新的参数。自主学习则更为关注边缘节点用户的定制化需求，通过数据增强、运行时缓存、模型压缩等机制，使训练任务分配到资源受限的边缘或终端设备，据此完成所有与隐私数据相关的计算并提高隐私保护能力[9]。

2. 资源隔离

边缘智能的稳健发展离不开资源隔离技术。隔离技术通过对计算、存储、网络等资源的统一管理，避免了单一程序的崩溃可能对整个系统稳定性的影响，从而保证服务的质量与可靠性。海量的物料、半成品、终端、边缘设备的参与，使工业互联网场景变得极为复杂：在流水线生产中，生产控制任务和状态监控任务一旦相互干扰，可能导致整条生产线停工；在汽车配件定制化生产中，配件制造跟踪数据的传输将显著增加用户隐私、核心技术参数泄露的可能性。

虚拟机（VM）技术的发展开启了云计算时代，但基于VM的虚拟化技术不够轻量，通常启动一台虚拟机需要数分钟的时间，不能满足边缘场景的实时性要求。容器（Docker）作为下一代虚拟化技术，对启动开销进行了重大改进，支持应用程序在基于操作系统的虚拟化隔离环境中运行；通过分层镜像，打包和分发应用只需毫秒级时延，额外资源开销很小，成为边缘系统中实现隔离的首选[8]。

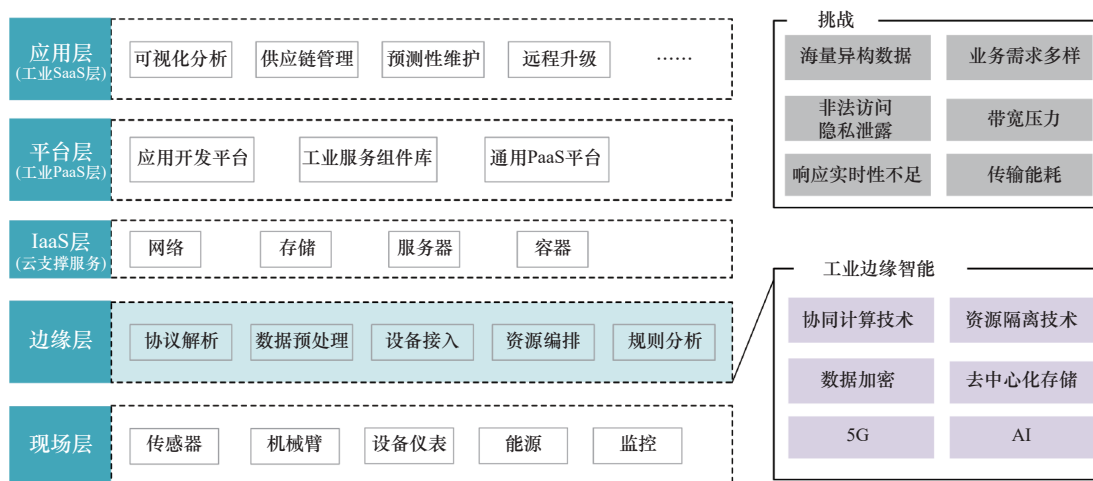


图1 工业互联网边缘智能研究范畴

注：SaaS表示软件即服务。

目前,以 Docker 为主的容器技术、以 Kubernetes 为主的容器编排技术已较为成熟 [13], EdgeX Foundry、Azure IoT Edge、KubeEdge 等边缘计算架构都纳入了容器封装功能。在场景复杂、资源受限、开发工具和语言多样的工业互联网边缘场景下,通过容器技术封装工作负载具有良好的可行性。

3. 安全传输与隐私保护

制造企业得益于工业互联网平台带来的生产高效化、决策智能化的同时,也面临着数据泄露、机密暴露、内部网络安全性下降等威胁。工业互联网平台的边缘节点和云数据中心的安全性都是值得关注的问题。

当前,主流的工业互联网平台依旧通过租用公有云、搭建私有云或综合两者使用混合云的方式来存储持久化数据 [14]。然而,云端数据中心并不可信,传统数据中心可能遭遇的问题在工业互联网场景下会带来更严重的后果;一旦云服务提供商不当操作造成数据泄露,相关的制造企业及其上下游企业都可能利益受损。为了保证数据安全,研究者提出在云端以密文形式存储用户数据,如 Rivest 等 [15] 提出的同态加密算法允许直接对密文进行特定的代数运算(见图 3),使密文运算得到的加密结果在解密后与明文进行相同运算的结果具有一致性,这为传输和处理用户数据都提供了保障。已有研究工作 [16] 探究了将同态加密算法应用到一些机器学习算法(如决策树、支持向量机)的训练过程,如 Nandakumar 等 [17] 进一步将同态加密应用到深

度学习,但该方案不支持卷积层运算,在训练效率和模型精度方面都不尽如人意。

由于依托的硬件资源遍布在网络连接的路径上,边缘智能天然具备分布式特征 [8],与分布式存储方案相辅相成。相较于集中式存储,分布式存储能有效缓解工业设备采集数据传输带来的带宽压力大、响应实时性差、传输能耗大、数据安全性下降等问题。目前应用较广的分布式存储协议是星际文件系统(IPFS),其本质是为分布式持久化存储和文件共享发展网络传输协议 [18]。当用户请求数据时,IPFS 系统基于搜索内容而非传统的基于域名来确定数据的存储节点,从分布式节点而非数据中心上获取数据,从而节省近 60% 的带宽并提高传输安全性。为了像传统云服务一样形成固定的盈利方式,IPFS 协议下的 Filecoin 项目新建了激励机制,服务提供方和服务使用方基于 Filecoin 代币对检索和存储服务进行交易,从而形成稳定的计费方式,促进分布式存储和边缘计算的进一步发展。

(二) 工业互联网边缘智能的应用

随着工业互联网产业的发展,边缘智能与实际应用深度融合。工业互联网的功能已经从数据的统一接入管理,朝着智能化分析和决策、工业机理的沉淀集成和创新改进、组件化和图形化分析等方向演进。在芯片、5G、协同计算、容器化、分布式等技术的推动下,出现了如预测性维护、机械臂控制、工业增强现实(AR)等新型应用。这些应用对前文所述的协同计算、隔离技术、隐私保护等的依赖

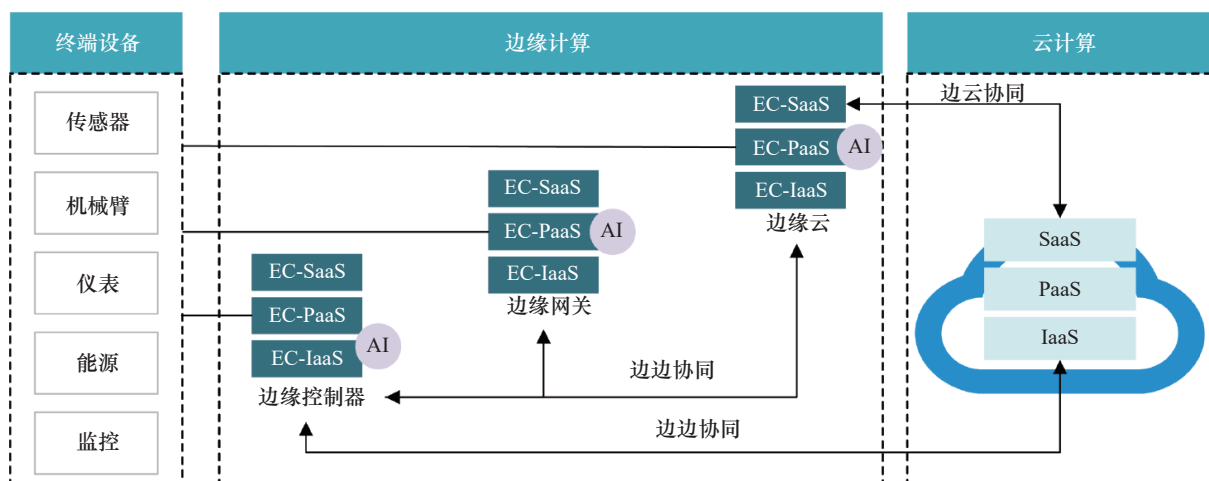


图 2 边云协同计算、边边协同计算示意图

注: EC 表示边缘计算。

关系如表 1 所示。预测性维护、机械臂控制、工业 AR 都离不开隔离技术的支持，一方面隔离技术能够保证各类智能应用在边缘设备上运行时彼此互不干扰；另一方面，隔离技术提高了对边缘资源的利用和调度效率，使得新兴应用以更低成本实现落地。

1. 高价值设备的预测性维护有效提高设备可用性和经济效益

设备管理服务，如预测性维护是工业互联网场景下最广泛的需求之一。现代化流水线制造环节的生产设备通常具有非常复杂的零部件结构，一旦某一生产环节出现问题，可能导致整条流水线的生产效率下降，甚至引发停工。边缘智能技术通过对设备运行状态的实时检测，调用基于工业大数据的 AI 模型对生产设备可能的工况状态、潜在的故障模式作出推断，使预测性维护成为了可能。现有的预测性维护如国产边缘智能计算物联网（EC-IoT）方案 [7]，采用边缘网关负责设备联通和数据预处理业务，在本地对实时数据进行预分析，只将与结果相关的少量高价值数据上传到云端；从应用效果看，EC-IoT 帮助生产企业减少了超过 70% 的业务

中断事件，使维护和运营成本下降了 50%。现有的预测性维护大都采取了云端训练模型并聚合数据，边缘预处理数据并上传的边云协同方式；但边缘还可利用数据的局部性进行本地增量训练模型等方式来进一步提升性能，同时分布式存储部署到边缘设备来节约云端存储资源和传输数据所需带宽。

2. 高精度机械臂使“机器取代人力”成为现实
随着人力成本的上升，企业制造的附加值下降；在工业互联网迅速发展的背景下，生产过程的自动化程度不断提高，“以机器取代人力”具有可行性。工业机械臂指通过模拟人手臂、手腕和手功能完成工业制造某些工序的机械装置，已有产品可以执行“硬性加工”任务（如切割、焊接等）[6]。先进计算机视觉技术使得机械臂控制精度达到 0.01 mm，5G 传输和边缘侧智能计算使得偏差检测、二次规划、姿态调整等步骤的时间延迟满足工业制造需求（< 10 ms）[8]。目前，工业机器人、数控机床部署智能算法已经有初步的落地应用，如 ADMOS 平台通过集成数控机床行业龙头德玛吉森公司提供的应用程序接口（API），将机器学习算法部署至机床软

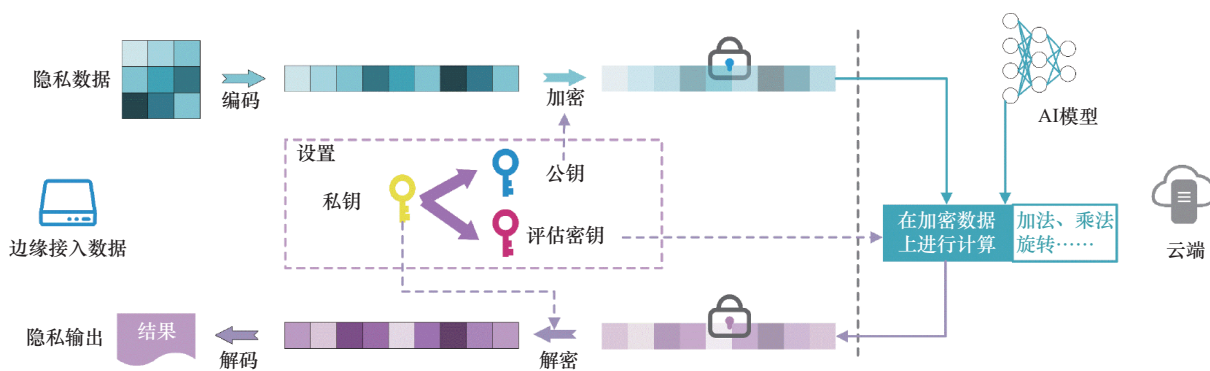


图 3 基于同态加密的端到端加密计算示意图

表 1 边缘智能关键技术与典型应用的关系

技术	应用		
	设备管理服务 (如预测性维护)	生产过程自动化 (如高精度机械臂)	制造辅助 (如工业AR)
协同计算	边缘-云端协同	√	√
	边缘-边缘协同	√	
隔离	容器化	√	√
安全传输与隐私保护	云端安全	√	√
	分布式存储	√	√

件,实现了基于温度智能计算刀头位移的补偿需求。此外,考虑到单个制造环节往往有多个数据采集点,可以融合边边协同计算,共同完成单项智能业务的计算需求,支持系统执行更精细的任务。

3. AI 与工业场景的深度融合催生工业 AR

工业 AR 是以 AI 算法辅助工业制造为特点的新兴场景。现代高精度机械装备由数量众多的复杂零部件构成,一旦装配过程发生问题,仅靠装配工人的记忆很难独立执行繁琐的装配步骤。集成工业 AR 的辅助眼镜,借助终端和边缘的计算资源在装配过程中智能识别零部件,通过文字、动态影像指导佩戴眼镜的装配工人开展组装;美国波音公司将之应用到飞机生产线上,减少了 50% 的装配错误,将装配耗时降低至原来的 75% [4]。工业 AR 还能应用于远程故障排查,无需资深专家到达现场,而由现场维护人员佩戴 AR 眼镜并与技术专家、专业团队连线,共同完成远程检修。

边缘智能用于工业互联网场景,在性能改善、减少操作成本和保障数据安全上有一定优势。工业生产常见的状态跟踪、缺陷检测、预测性维护等需求,在近数据源处获得智能处理,可以保证响应的实时性;在边缘处理和存储数据具有多重优势,在现有云模式的数据安全保护方案基础上,结合分布式存储和边缘智能计算将进一步提高隐私数据的安全性。

四、工业互联网边缘智能发展趋势展望

尽管边缘智能在工业互联网实际场景中存在巨大的实用潜力,但仍处于发展初期,距离大规模落地实施还需要突破多项挑战。工业互联网边缘智能未来发展将围绕实际需求和新兴产业,在各方参与者的推动下尽快固化商业模式,支持制造业的深化改革、工业互联网的规模化应用(见图 4)。

(一) 业务需求驱动技术创新

工业生产的实际业务需求始终是工业互联网边缘智能产业的核心驱动因素。当前,工业互联网边缘智能的参与者多为龙头制造企业、大型信息技术企业,前者推出满足自身生产需求的示范应用,后者利用技术优势为行业典型案例提供解决方案;行

业发展主要依靠上游供给方推动。未来,数量众多的中小型制造企业将成为需求的主要提出者,提供更丰富的工业生产场景需求,驱动边缘智能方案供应商发展更适合规模化落地的创新应用,促进工业互联网边缘智能发展成果覆盖更多更细分的制造业门类。

(二) 新兴领域产业蓬勃发展

工业互联网边缘智能的发展将带动产业链各环节的同步兴起。过去,我国在工业机器人、工业传感器、智能设备上基础薄弱,与国际领先水平存在一定差距。随着边缘智能兴起和发展,国内厂商有望抓住新兴需求对传统解决方案革新的机遇,推动自主产品与 5G、AI 等技术的融合,缩小产品性能差距,提升智能装备、工业机器人、传感器的国产化率。在制造企业深度挖掘数据价值的背景下,配置计算模块的边缘智能控制器、边缘智能网关将丰富工业智能应用的适用场景。

(三) “产学研用”联盟作用凸显

边缘智能产业的参与者已经形成一些相关产业联盟,稳步推进的标准化工作将有效提升边缘设备的通用性。鉴于工业生产设备种类庞杂、异构标准数量繁多的现状,在数据传输、业务建模、协议转换、安全防护等多个层面形成高质量的标准将是未来趋势。通过构建“产学研用”多方参与的联盟,显著加快边缘智能标准的制定、应用、推广进程,有助于打通产业链上下游企业的合作,使得面向工业生产场景的商用边缘智能解决方案稳妥落地,为制造业转型发展提供新动力。

(四) 商业模式提供积极反馈

边缘智能通常作为工业互联网平台整体解决方案的有机组成部分而存在,很难量化其对工业生产产能提升、成本降低的作用,因此相应商业模式还处于探索阶段。根据不同的业务提供方,商业模式可能各有不同:边缘智能运营方可与业务提供方收取最终用户的费用并按约定比例分成,如汽车配件定制业务;借鉴云服务的收费模式,根据边缘智能平台接口的调用情况和使用量进行计费可能是未来的主流模式;根据方案对业务的优化提升百分比或

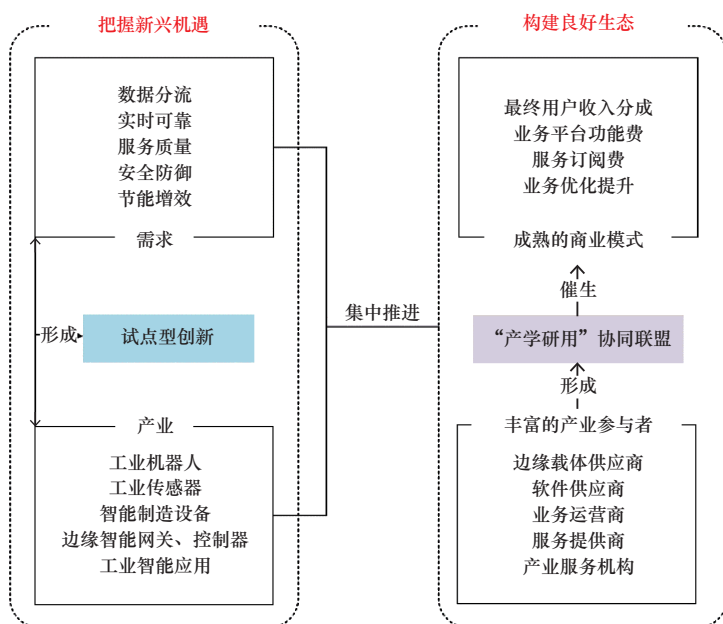


图4 把握新兴机遇构建领域生态示意图

服务订阅时长进行收费也是可能的商业模式。目前各类边缘智能运营商正在对收费模式进行探索，“自主造血”的商业模式将对工业互联网边缘智能产业提供积极反馈。

五、对策建议

(一) 完善行业标准体系，提升关键技术研究水平

工业互联网边缘智能参与主体众多，连接的设备种类繁多，建立行业标准体系有助于产业链上下游企业的协同。通过加强沟通、深化合作，整合并充分利用国内外工业互联网边缘智能相关企业、研究机构的优势资源，重点突破云端-边缘-终端协同计算架构、系统安全性技术、异构计算池和资源隔离技术等，充分提升边缘智能关键技术和通用解决方案的发展水平。推广相关的前沿研究成果，形成应用示范效应，优选出受市场认可的通用标准和规范，从而促进行业技术标准体系的不断发展与完善。

(二) 投资建设基础共性平台，深挖数据价值

现有工业平台应用集中在资产和运维优化方向，应进一步加强工业互联网平台在经营管理优化、资源匹配协同等更复杂场景下的数据分析能力。建议政府、高校、科研机构加大针对AI、边缘框架、

5G等基础共性技术的资源投入，支持开发者社区和开源项目建设，形成可复用的通用模块，避免重复建设，整体性提高工业互联网应用的开发效率；在与具体场景相关的大型和特色制造企业成立技术专项，建立面向特定行业、特定应用的研究中心，打造凸显数据价值的杀手级工业应用程序（APP），向中小企业辐射技术价值。

(三) 营造产业生态，推动细分行业快速发展

工业制造规模庞大且门类细分，产业发展依赖于行业协会、联盟的组织和引导，往往围绕龙头企业形成地区产业集群。建议行业协会、龙头企业积极组织行业趋势研讨会，广泛邀请企业家、技术专家开展行业动向讲座交流，促进行业内部的沟通合作。在重点企业或政府机构的牵头组织下，重点关注本地区垂直行业的需求、单一业务场景下的跨行业需求，合作完成工业互联网边缘智能的细分行业解决方案，为降本增效提供明确的客户价值；引导相关产业集群提升整体竞争力，协同推进产业生态成熟。

(四) 培育工业边缘智能方向的人才队伍

工业领域的场景、逻辑存在特殊性，多学科、多领域知识交叉渗透是工业互联网边缘智能方向的显著特征。培养一批既对制造业转型有深刻理

解、又具备信息技术研发能力的高端复合型人才是当务之急。高等院校、科研院所积极调整并增设融合工业制造、AI 等知识体系的前沿交叉专业,在重大项目、重点方向上加强与企业的合作研发;立足实际生产需求,鼓励原始性创新,在实际工业应用中孵化创新成果。建立健全成果认定机制,合理激励领域人才对智能应用、工业机理、关键技术等方面的贡献,鼓励相关创新人才在实际场景下发现并解决瓶颈问题。

参考文献

- [1] 王晨, 宋亮, 李少昆. 工业互联网平台: 发展趋势与挑战 [J]. 中国工程科学, 2018, 20(2): 15–19.
Wang C, Song L, Li S K. The industrial Internet platform: Trend and challenges [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(2): 15–19.
- [2] 工业互联网产业联盟. 工业互联网体系架构 (版本2.0) (2020) [R]. 北京: 工业互联网产业联盟, 2020.
Alliance of Industrial Internet. Industrial Internet architecture (Version 2.0) (2020) [R]. Beijing: Alliance of Industrial Internet, 2020.
- [3] 边缘计算产业联盟, 工业互联网产业联盟. 边缘计算与云计算协同白皮书 (2018) [R]. 北京: 边缘计算产业联盟, 工业互联网产业联盟, 2018.
Alliance of Industrial Internet. Collaborative edge computing and cloud computing white paper(2018) [R]. Beijing: Edge Computing Consortium, Alliance of Industrial Internet, 2018.
- [4] 赵维铎, 蒋伯章. 5G+工业互联网的思考与实践 [J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(5): 57–60.
Zhao W D, Jiang B Z. Thoughts and practice of 5G+ industrial Internet [J]. ZTE Communications, 2020, 26(5): 57–60.
- [5] 施巍松, 张星洲, 王一帆, 等. 边缘计算: 现状与展望 [J]. 计算机研究与发展, 2019, 56(1): 69–89.
Shi W S, Zhang X Z, Wang Y F, et al. Edge computing: State-of-the-Art and future directions [J]. Journal of Computer Research and Development, 2019, 56(1): 69–89.
- [6] 宋纯贺, 曾鹏, 于海斌. 工业互联网智能制造边缘计算: 现状与挑战 [J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(3): 50–57.
Song C H, Zeng P, Yu H B. Industrial Internet intelligent manufacturing edge computing: State-of-the-art and challenges [J]. ZTE Communications, 2019, 25(3): 50–57.
- [7] 李肯立, 刘楚波. 边缘智能: 现状和展望 [J]. 大数据, 2019, 5(3): 72–78.
Li K L, Liu C B. Edge intelligence: State-of-the-art and expectations [J]. Big Data, 2019, 5(3): 72–78.
- [8] Shi W, Cao J, Zhang Q. Edge computing: Vision and challenges [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016 (5): 637–646.
- [9] 徐梦炜, 刘渊强, 黄康, 等. 面向移动终端智能的自治学习系统 [J]. 软件学报, 2020, 31(10): 3004–3018.
Xu M W, Liu Y Q, Huang K, et al. Autonomous learning system towards mobile intelligence [J]. Journal of Software, 2020, 31(10): 3004–3018.
- [10] 张星洲, 鲁思迪, 施巍松. 边缘智能中的协同计算技术研究 [J]. 人工智能, 2019 (5): 55–67.
Zhang X Z, Lu S D, Shi W S. Research on collaborative computing in edge intelligence [J]. Artificial Intelligence, 2019 (5): 55–67.
- [11] Kang Y, Hauswald J, Gao C, et al. Neurosurgeon: Collaborative intelligence between the cloud and mobile edge [J]. ACM SIGARCH Computer Architecture News, 2017, 45(1): 615–629.
- [12] McMahan B H, Moore E, Ramage D, et al. Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data [C]. Seattle: Artificial Intelligence and Statistics, PMLR, 2017.
- [13] Xiong Y, Sun Y, Xing L, et al. Extend cloud to edge with kubeEdge [C]. Seattle: 2018 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC), 2018.
- [14] 边缘计算产业联盟, 工业互联网产业联盟. 边缘计算参考架构 3.0 [R]. 北京: 边缘计算产业联盟, 工业互联网产业联盟, 2019.
Edge Computing Consortium, Alliance of Industrial Internet. Edge computing reference architecture 3.0 [R]. Beijing: Edge Computing Consortium, Alliance of Industrial Internet, 2019.
- [15] Rivest R L, Adleman L, Dertouzos M L. On data banks and privacy homomorphisms [J]. Foundations of Secure Computation, 1978, 4(11): 169–180.
- [16] Bonawitz K, Ivanov V, Kreuter B, et al. Practical secure aggregation for privacy-preserving machine learning [C]. Dallas: Proceedings of the 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, 2017.
- [17] Nandakumar K, Ratha N, Pankanti S, et al. Towards deep neural network training on encrypted data [C]. Nashville: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2019.
- [18] Benet J. IpfS-content addressed, versioned, p2p file system [J]. arXiv: 1407.3561, 2014.