

# 工业互联网智能制造 边缘计算：现状与挑战

## Industrial Internet Intelligent Manufacturing Edge Computing: State-of-the-Art and Challenges



宋纯贺/SONG Chunhe<sup>1,2</sup>, 曾鹏/ZENG Peng<sup>1,2</sup>, 于海斌/YU Haibin<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016;

2. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110016)

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**摘要:** 介绍了边缘计算的基本概念以及工业互联网智能制造边缘计算的发展现状。通过分析工业互联网、智能制造、边缘计算之间的关系,以及工业互联网智能制造边缘计算行业典型案例,总结了工业互联网智能制造边缘计算的核心问题,并提出了其面对的挑战。

**关键词:** 工业互联网; 智能制造; 边缘计算; 确定性; 可编程性

**Abstract:** In this paper, the basic concept of edge computing and the development status of edge computing in industrial internet intelligent manufacturing are introduced. By analyzing the relationship among industrial internet, intelligent manufacturing and edge computing, and typical cases of industrial internet intelligent manufacturing edge computing industry, the core problems and the challenges of industrial internet intelligent manufacturing edge computing are summarized and put forward.

**Key words:** industrial internet; intelligent manufacturing; edge computing; certainty; programmability

DOI: 10.12142/ZTETJ.201903008

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20190604.1045.004.html>

网络出版日期: 2019-06-04

收稿日期: 2018-12-27

## 1 工业互联网智能制造边缘 计算概述

### 1.1 边缘计算及其发展

目前科技处于史无前例的高速发展时代,新的技术层出不穷。近年来,国际著名咨询公司高德纳(Gartner)每年都会发布本年度的新兴技术周期曲线,和下一年度十大战略技术趋势<sup>[1]</sup>,对新兴技术

的发展趋势进行了准确的预测。边缘计算以及边缘智能,与人工智能、深度学习、区块链技术等炙手可热的科技名称并列,连续出现在Gartner公司的咨询报告上。边缘计算已经受到学术界、工业界以及政府部门极大关注,目前学术界发表了很多边缘计算综述,工业界成立了边缘计算产业联盟等多个边缘计算联盟组织,政府部门也发布了一系列边缘计算重大研究计划,人工智能标准化机构也将边缘计算列为人工智能的重要组成部分<sup>[2]</sup>。文

章中,我们主要关注的是中国工业互联网智能制造边缘计算的一些现状与挑战,更大范围的边缘计算的相关情况请见施巍松教授的研究综述<sup>[3-5]</sup>。

边缘计算的发展与云计算、大数据以及物联网技术的发展息息相关,其核心是如何保障网络边缘应用的实时性问题。不同领域应用实时性挑战的来源不同,因此各个领域研究边缘计算的侧重点并不相同,例如人工智能标准化机构将可穿戴式计算列为边缘计算的一个核

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1700200)、工业和信息化部工业互联网创新发展工程项目“工业互联网边缘计算测试床”

心场景。

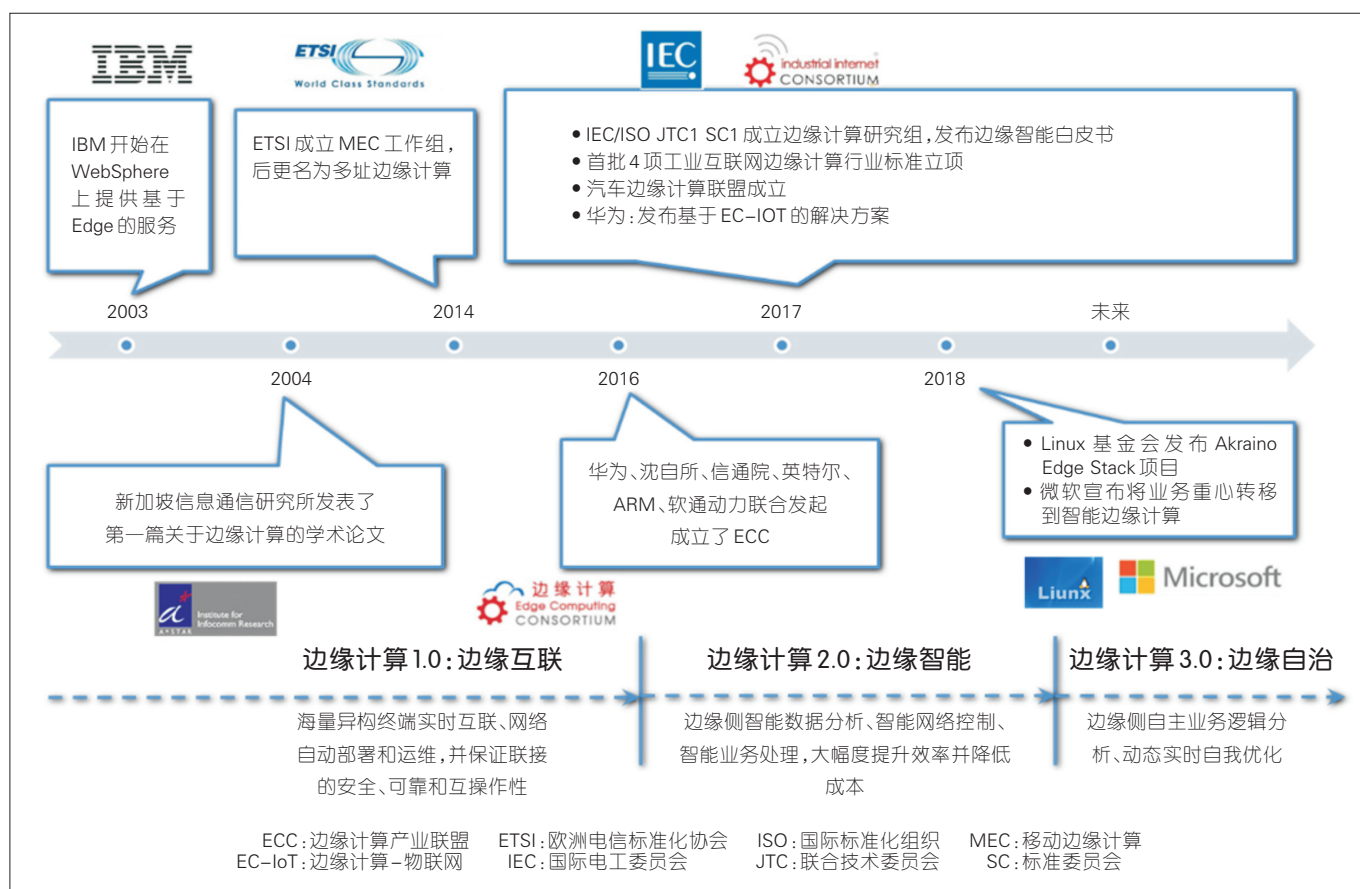
2016 美国韦恩州立大学施巍松教授给出了边缘计算的一般性的定义:“边缘计算是指在网络边缘执行计算的一种新型计算模型,边缘计算操作的对象包括来自于云服务的下行数据和来自于万物互联服务的上行数据,而边缘计算的边缘是指从数据源到云计算中心路径之间的任意计算和网络资源”<sup>[5]</sup>。

虽然近年来受到了广泛的重视,但边缘计算并非一个新的概念。如图 1 所示,2003 年 IBM 已经开始在 WebSphere 上提供基于 Edge 的服务,2004 年新加坡信息通信研究所发表关于边缘计算的学术论文。近年来,随着 5G 和物联网的发

展、智能终端设备不断普及,网络边缘侧数据的爆发式增长推动了边缘计算的发展。2014 年欧洲电信标准化协会(ETSI)成立移动边缘计算(MEC)标准化工作组,同年,AT&T、思科、通用电气(后简称为通用)、IBM 和英特尔成立工业互联网联盟(IIC);2015 年,ARM、思科、戴尔、英特尔、微软和普林斯顿大学建立开放雾(OpenFog)联盟;2016 年,电气和电子工程师协会(IEEE)和国际计算机学会(ACM)共同发起了边缘计算研讨会,中国工业、信息通信业、互联网等领域百余家单位共同发起成立工业互联网产业联盟,同年,由中国科学院沈阳自动化研究所等单位联合倡议发起的边缘计

算产业联盟(ECC)。在学术科研方面,中国自动化学会于 2017 年率先成立了边缘计算专业委员会,并在《IEEE COMMUNICATIONS Surveys &Tutorials》等著名学术期刊上发表了很多边缘计算综述性文章<sup>[6-9]</sup>。在标准制定方面,国际电信联盟电信标准分局(ITU-T) SG20 发起了“边缘计算需求和能力要求”的国际标准立项,中国通信标准化协会(CCSA)也陆续开展多项边缘计算行业标准立项。

2018 年是边缘计算蓬勃发展的一年:在微软 2018 年度开发者大会上,微软公司发布“Azure IoT Edge”等边缘侧产品,将业务重心从 Windows 操作系统转移到智能边缘



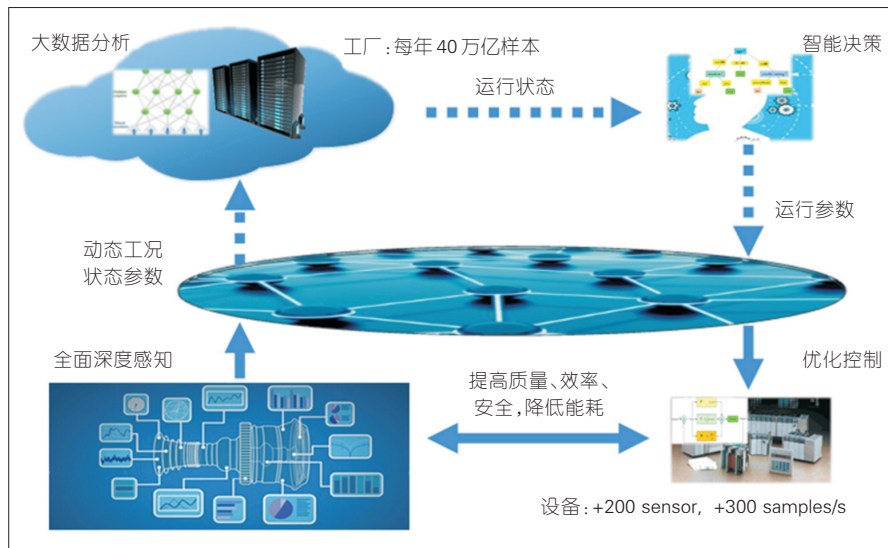
▲ 图 1 边缘计算发展历程

计算方面;亚马逊公司发布“AWS Greengrass”边缘侧软件,将AWS云服务无缝扩展至边缘设备;阿里云宣布2018年将战略投入边缘计算技术领域并推出边缘计算产品Link Edge。

### 1.2 工业互联网智能制造

智能制造是具有信息深度自感知、智慧优化自决策、精准控制自执行等功能的先进制造过程、系统与模式的总称。智能制造可以追溯到1990年4月日本发起“智能制造系统”国际合作研究计划。目前,基于物联网、大数据、云计算等信息技术,智能制造已经贯穿于设计、生产、管理、服务等制造活动的各个环节。工业互联网是指在物联网的基础上,综合应用大数据分析技术和远程控制技术,优化工业设施和机器的运行和维护,通过网络化手段提升工业制造智能化水平。2012年,通用公司首先提出了工业互联网概念,此后工业互联网在世界范围内得到了广泛的发展。目前工业互联网以德国“工业4.0平台”和美国“工业互联网联盟”为典型代表,其分别发布了工业互联网智能制造参考架构RAMI 4.0和IIRA。工业互联网作为中国智能制造发展的重要支撑已经得到了国家的高度认可与充分重视,“十三五”规划、中国制造2025、“互联网+”“深化制造业与互联网融合发展”等国家的重大战略都明确地提出了要大力发展工业互联网。

如图2所示,工业互联网智能化生产、网络化协同、个性化定制和



▲图2 工业互联网智能制造面临的问题

预测性维护等创新应用对计算提出新需求;而工业应用低开销、实时性要求使云计算模式难以适用,而传统的分布式计算方法缺乏高效的网络边缘侧资源管理和任务调度方法,难以应对先进工业生产过程中海量数据的实时分析和系统的实时控制任务。因此,需要发展云与网络边缘侧融合进行数据分析和计算的新模式。

### 1.3 工业互联网智能制造边缘计算

边缘计算是集先进网络技术、大数据、人工智能于一身,横跨通信、计算机、自动控制等多领域的综合性技术。不同领域内的边缘计算技术的侧重点有所不同,工业互联网智能制造对系统的确定性、实时性和安全性有着很高的要求,ECC给出了工业互联网智能制造领域边缘计算的定义:边缘计算是在靠近物或数据源头的网络边缘侧就近提供边缘智能服务,满足行业数字化

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<sup>[10]</sup>。工业互联网智能制造边缘计算的体系架构具体如图3所示。

针对工业流数据实时分析、边缘侧智能计算、分布式实时控制等工业互联网智能制造典型应用场景,工业互联网智能制造边缘计算需要解决工业互联网边缘计算场景下计算资源的零散性和有限性、现场网络的异构性对系统确定性、实时性和安全性带来的问题,而工业互联网智能制造边缘计算参考架构的设计、工业互联网智能制造边缘计算的标准化、工业互联网智能制造测试平台和测试方法的构建,是解决上述问题的关键。

## 2 工业互联网智能制造边缘计算现状

以ECC的成立为分界点,工业互联网智能制造边缘计算发展大体可以分为3个阶段:边缘互联、边缘



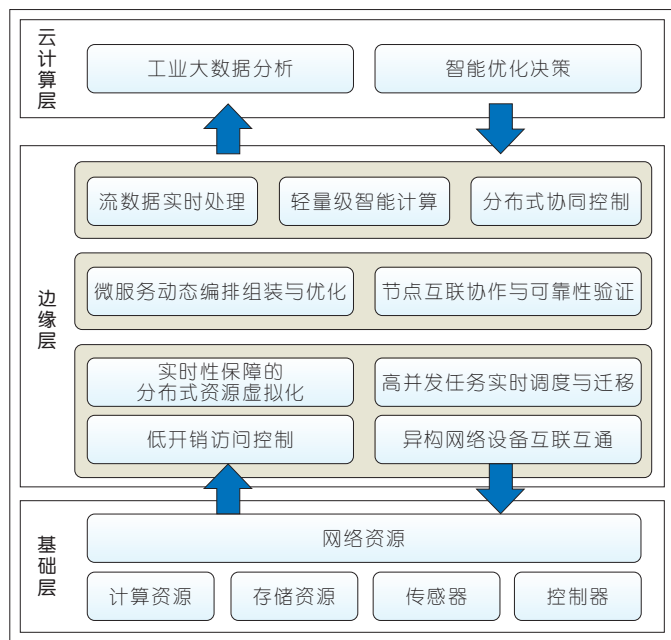


图3 工业互联网智能制造边缘计算的体系架构

智能,以及边缘自治。2016年以前,中国边缘计算的研究处于1.0阶段,主要解决边缘互联问题,即海量异构终端实时互联、网络自动部署和运维等问题。目前,边缘计算处于2.0阶段,即边缘智能阶段,主要解决网络边缘侧智能数据分析、智能网络控制、智能业务处理等问题,从而大幅度提升效率并降低成本。未来,边缘计算将步入3.0阶段,即边缘自治阶段,边缘侧自主业务逻辑分析、动态实时、自我优化将在这一阶段得到实现。

### 2.1 工业互联网边缘计算产业学术组织

#### (1)IIC。

2014年4月,AT&T、思科、通用、IBM和英特尔宣布成立IIC。2017年1月,工业互联网联盟发布工业互联网参考架构IIRA v1.8。目前,工业互联网联盟拥有211个成员单位,涵盖能源、医疗、制造、采

矿、零售、智慧城市、运输等多个领域,并批准了26个工业互联网测试床项目。

#### (2)OpenFog联盟。

2015年11月,ARM、思科、戴尔、英特尔、微软和普林斯顿大学建立OpenFog联盟,目前有60个成员单位。2017年2月,该联盟发布OpenFog参考架构,这是一个旨在支持物联网、5G和人工智能应用的数据密集型需求的通用技术框架。2018年12月18日,OpenFog联盟宣布并入IIC。

#### (3)工业互联网产业联盟。

2016年2月,由工业、信息通信业、互联网等领域百余家单位共同发起成立工业互联网产业联盟。目前,工业互联网产业联盟拥有942个成员单位,发布了“工业互联网平台标准体系框架”等10项白皮书、“工业互联网标准体系框架”等9项技术标准,以及“基于安全可靠云平台的智能工厂验证示范平台”等34

个测试床项目。

#### (4)ECC。

2016年11月,由中国科学院沈阳自动化研究所等联合倡议发起了ECC。目前ECC共拥有成员单位200余家,业务范围包括工业制造、智慧城市、交通、电力能源等一些领域。2018年,ECC发布了“边缘计算与云计算协同白皮书”和“边缘计算参考架构3.0”,同时发布了“面向个性化定制的自适应模块化制造验证平台”等29个边缘计算的测试床项目。

#### (5)中国自动化学会边缘计算专业委员会。

在专业学术团体方面,中国自动化学会率先成立了边缘计算专业委员会。首届中国自动化学会边缘计算专业委员会会议于2017年10月举行,中国科学院沈阳自动化研究所为承办单位。目前,中国自动化学会边缘计算专业委员会委员以项目/课题负责人方式承担了与边缘计算相关的国家重点研发计划、工信部智能制造、工信部工业互联网创新发展工程等一系列重大项目,一定程度上引领了中国边缘计算的发展。

### 2.2 工业互联网边缘计算计算平台

#### (1)通用Predix。

2012年通用提出工业互联网的概念,随后推出Predix。通用Predix分为边缘端、平台端和应用端。在边缘端,Predix提供网关框架Predix Machine以实现数据的采集和连接,支持工业协议解析、数据

采集、多平台协同、本地存储和转发、多种安全策略,以及本地设备通信等。平台端 Predix Cloud 集成了工业大数据处理和分析、Digital Twin 快速建模、工业应用快速开发等方面的能力,以及一系列可以快速实现集成的货架式微服务。在应用端,通用 Predix 采用数据驱动和机理结合的方式,提供设备健康和故障预测、生产效率优化、能耗管理、排程优化等解决方案。2018年10月 Predix 被通用出售。

(2) 西门子 Mindsphere。

2016年4月,西门子推出的基于云的开放式物联网操作系统 MindSphere。MindSphere 向下提供数据采集接入方案 MindConnect,可以直接到达车间级工厂设备,支持开放式通信标准 OPC UA,实现西门子和第三方设备的数据连接;MindSphere 向上为应用软件开发层提供一个开放的架构,用户可以针对不同场景来开发相应的软件。2018年7月,西门子与阿里云签署备忘录,共同推进中国工业物联网发展。

(3) 其他的一些重要的物联网(IoT)平台。

目前各大主流 IT 企业都推出了自己的 IoT 平台,包括 Google Cloud IoT、MS Azure IoT、AWS IoT、IBM Watson IoT 等。例如,Google Cloud IoT 是一个边缘/云服务平台,该平台分为3层:边缘设备、云数据分析、数据应用。Google Cloud IoT 在边缘设备层中集成了一个实时机器学习工具;云数据分析组件包括4个关键功能:Cloud Bigtable、

BigQuery、CloudDataflow 和 Cloud Machine Learning;数据应用层主要用 Cloud Datalab 和 Cloud Studio 解决方案来实现数据的存储和使用。

### 2.3 工业互联网边缘计算标准化

受5G技术发展的推动,ETSI、第3代合作伙伴计划(3GPP)、CCSA、中国联通等通信组织和企业进行了一系列通信领域边缘计算标准化工作;但这些标准化工作主要为了满足5G三大应用场景的需求,即增强移动宽带(eMBB)、高可靠低时延(uRLLC),以及海量机器类通信(mMTC)。

在工业互联网智能制造领域,2017年国际标准化组织(ISO)/国际电工委员会联合技术委员会(IEC JTC1)/标准委员会(SC)41 物联网及其相关技术、分技术委员会成立了边缘技术研究组,并在SC41 范围就边缘计算的定义达成共识,规定边缘计算-物联网(EC-IoT)的参考架构;2018年,SC41 生成现有 EC-IoT 标准的需求分析报告,推荐使用 EC-IoT 技术,为如何实现开放跨行业提供指导,发布了 EC-IoT 项目技术报告;2019年,SC41 将参与边缘计算标准的制定。

2017年,三菱、SAP 等联合发布了《垂直边缘智能白皮书》。2018年,工业互联网产业联盟发布了“工业互联网标准体系框架”“工业互联网安全总体要求”等9项技术相关标准。2018年,CCSA 工业互联网特设组(ST8)召开会议,通过“边缘计算总体架构与要求”“边缘计算边缘节点模型与要求”等9项新立项

建议。

### 2.4 工业互联网边缘计算项目设立

工业互联网智能制造边缘计算也受到了国家各部委的高度重视。工信部在2017年和2018年连续设立了一系列智能制造综合标准化与新模式应用项目。2017年,中国科学院沈阳自动化研究所承担的工信部智能制造综合标准化与新模式应用项目“工业互联网应用协议及数据互认标准研究与试验验证”,从工业互联网边缘计算模型、工业互联网数据统一语义模型、工业互联网互联互通信息安全要求等7个方面对工业互联网智能制造边缘计算标准的制定进行了探索。2018年,工信部工业互联网创新发展工程系列项目中,针对工业互联网边缘计算,专门设立了“工业互联网边缘计算测试床”“工业互联网边缘计算基础标准和试验验证”等8个项目。在2018年度科技部国家重点研发计划“网络协同制造和智能工厂”重点专项中,专门针对边缘计算设置了“工业互联网边缘计算节点设计方法与技术”“典型行业装备运行服务平台及智能终端研制”“基于开放架构的云制造关键技术与平台研发”等多个项目。

## 3 工业互联网智能制造边缘计算行业典型案例

### 3.1 中科院沈阳自动化研究所智能制造边缘计算示范线

传统制造系统一般是针对一种

或几种产品而设计的批量化、刚性生产系统,一旦生产需求发生变化,生产线调整周期长,设备维护成本高,难以满足目前智能制造个性化定制的需求。

为了解决上述问题,中科院沈阳自动化研究所搭建了智能制造边缘计算示范系统。如图4所示,该平台由工业云平台、边缘计算数据平台、边缘计算网络、边缘计算网关、现场设备等部分构成。通过引入边缘计算,能够为个性化定制生产带来3方面提升:首先,设备可以灵活替换。通过web互操作接口进行工序重组,实现新设备的即插即

用,实现损坏设备的快速替换,减少50%的人力投入。其次,实现了生产计划灵活调整。通过生产节拍、物料供给方式的自动变化来适应每天多次的计划调整,消除多个型号的混线切单,物料路径切换导致的输入/输出(I/O)配置时间损耗。再次,实现了新工艺/新型号的快速部署。通过Web化的工艺模型的自适应调整,消除新工艺部署带来的可编程逻辑控制器(PLC)(涉及数百个逻辑块、多达十几层层嵌套判断逻辑)重编程、断电启停、数百个过程控制量修改重置的时间,这使得新工艺的部署时间大概缩短了

80%以上。

### 3.2 工业互联网创新发展工程

边缘计算是一个综合性的技术体系,单一技术通常难以反映系统整体性能,因此边缘计算测试床的开发一直是各大边缘计算产业/技术联盟十分重视的内容。2018年,在工信部工业互联网创新发展工程自助下,中科院沈阳自动化研究所承担了我国首批大型边缘计算测试床项目——“工业互联网边缘计算测试床项目”,项目整体架构如图5所示。

该边缘计算测试床项目架构包括3个主要部分:

(1)边缘计算云服务平台,即利用云服务平台实现实验室搭建的生产模拟系统以及汽车装备制造、工程机械、铸造装备加工和光伏装置制造等企业的实际生产系统之间的互联与信息共享。

(2)边缘计算基础测试平台,即为验证边缘计算领域模型,支撑边缘计算关键技术的研发与测试,实现加工、装配、物流工艺过程模拟。

(3)边缘计算垂直行业测试平台,即用于验证边缘计算垂直行业领域模型,支撑边缘计算工业应用APP研发与测试,构建基于企业实际生产系统的行业测试平台,包括:汽车装备制造、工程机械、铸造装备加工和光伏装置制造等企业的4套实际生产系统。

该项目解决工业互联网边缘计算中的问题:边缘计算关键技术研发的试验测试问题、基于边缘计算开发新型工业APP的实验验证问

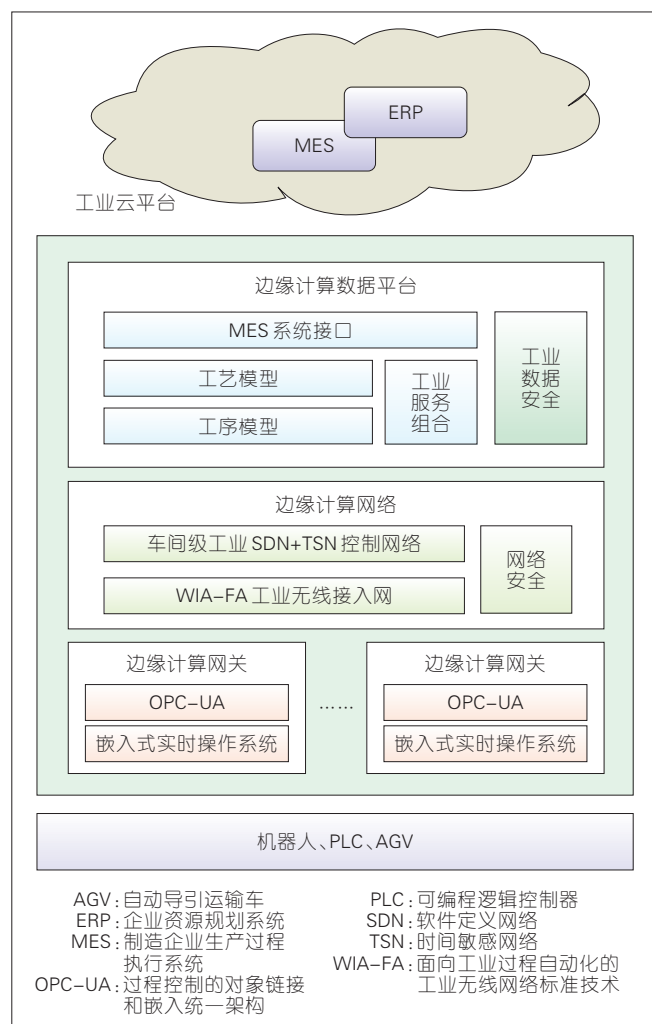
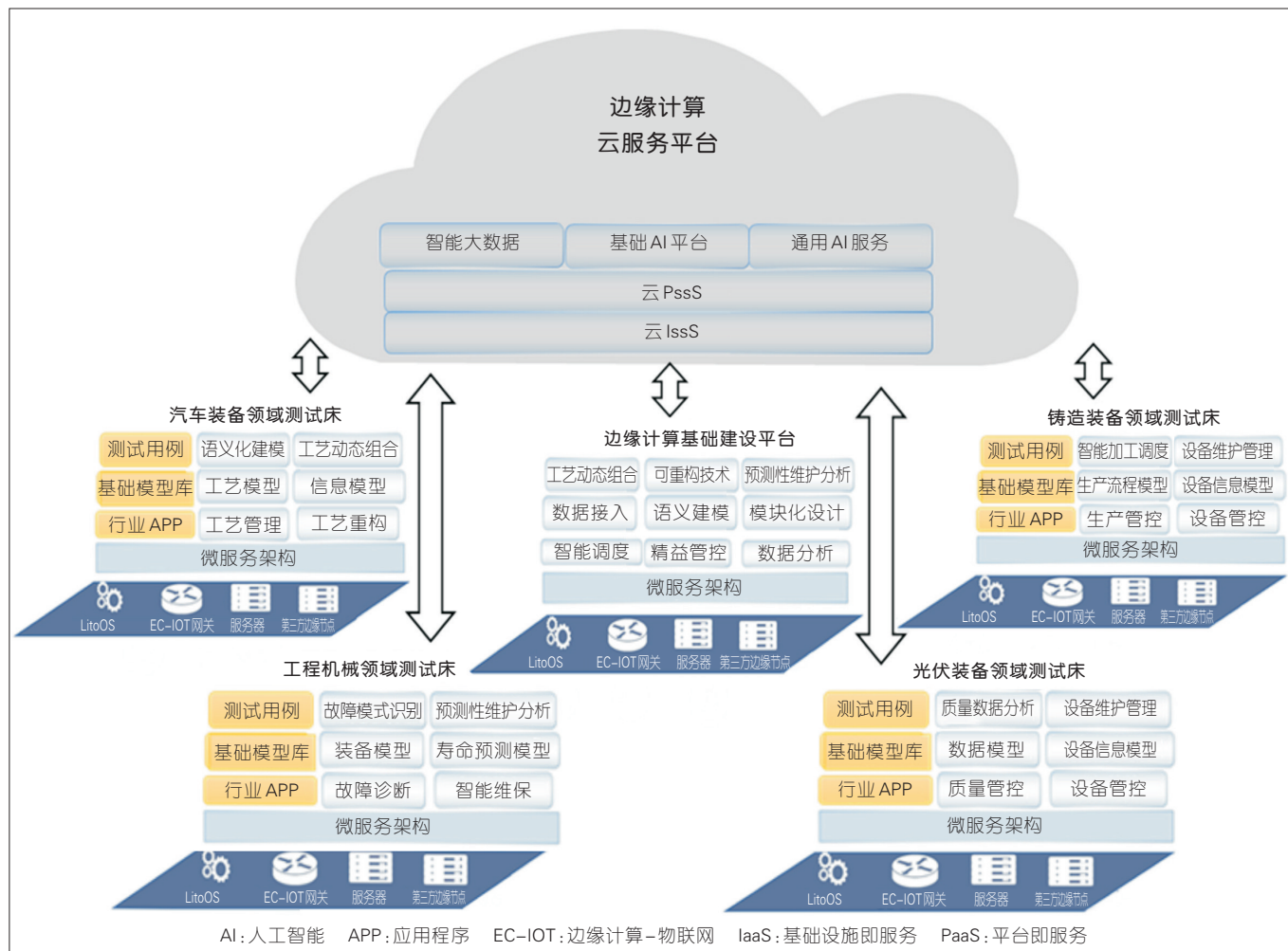


图4 中科院沈阳自动化研究所智能制造边缘计算示范系统整体架构





▲图5 边缘计算测试床项目架构

题,以及基于边缘计算的行业解决方案的多厂商产品互操作问题。

## 4 工业互联网智能制造边缘计算面临的挑战

### 4.1 资源动态条件下高并发分布式混杂系统中确定性保障问题

工业互联网智能制造边缘计算的关键需求是边缘应用的实时性和确定性;但是边缘计算环境存在计算资源分布式、零散化,以及网络动态性和存在测量噪声等特征,并且一般为兼有离散事件和连续变量等

运行机制的混杂系统。同时,边缘计算任务常存在高并发的特点。这些特征导致边缘计算任务时序复杂难以同步,计算结果确定性难以保证。如何针对计算资源的零散性、异构性和动态性、系统的混杂性特点,构建支持分布式混杂系统和高并发任务的边缘计算模型,是工业互联网智能制造边缘计算的挑战。

### 4.2 面向工业互联网中分布式边缘设备的异构行为统一建模与编程问题

工业互联网中边缘计算环境中

的计算、网络和存储等资源的异构性、动态性、分布式和零散化等特性,使得边缘设备资源的动态调整对软件的动态性和可伸缩性要求提升,多种异构资源共存的复杂系统对软件的可组合性与模块化程度需求提高,传统集中式应用程序的开发模式难以满足边缘计算场景的需求。如何解决面向工业互联网中分布式边缘设备的异构行为统一建模与编程问题,实现统一的编程与开发环境,提升编程系统在部署、调试和运行各类应用时的资源利用率,降低部署和维度的难度和时间,是

工业互联网智能制造边缘计算面对的一个挑战。

## 5 结束语

随着物联网技术的发展,网络边缘侧数据呈现爆炸式的增长,云计算模式的缺陷日益突出,而边缘计算为解决工业互联网智能制造过程中数据分析和实时控制提供了有效手段。可以预见:在未来几年内,边缘计算将广泛应用于工业生产之中。把握边缘计算技术发展方向,促进边缘计算技术落地,必将有力地促进工业互联网智能制造的发展。

### 参考文献

[1] Gartner. Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2019 [EB/OL]. [2019-01-02]. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019>

[2] 中国电子技术标准化研究院. 人工智能标准化白皮书(2018版)[EB/OL]. [2019-01-02]. <http://www.cesi.ac.cn/images/editor/20180124/20180124135528742.pdf>

[3] 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

[4] 施巍松, 孙辉, 曹杰, 等. 边缘计算: 万物互联时代新型计算模型[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(5): 907-924. DOI:10.7544/issn1000-1239.2017.20160941

[5] SHI W, CAO J, ZHANG Q. Edge Computing: Vision and Challenges [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016(5): 637-646. DOI: 10.1109/JIOT.2016.2579198

[6] MAO Q, HU F, HAO Q. Deep Learning for Intelligent Wireless Networks: A Comprehensive Survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4):2595-2621. DOI: 10.1109/COMST.2018.2846401

[7] MOHAMMADI M, AI-FUQAHA A, SOROUR, et al. Deep Learning for IoT Big Data and Streaming Analytics: A Survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4):2923-2960. DOI: 10.1109/COMST.2018.2844341

[8] 汪海霞, 赵志峰, 张宏纲. 移动边缘计算中数据缓存和计算迁移的智能优化技术[J]. 中兴通讯技术, 2018, 24(2):19-22. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2018.02.004

[9] 王秋宁, 谢人超, 黄韬. 移动边缘计算的移动性管理研究[J]. 中兴通讯技术, 2018, 24(1):37-41. DOI:10.3969/j.issn.1009-6868.2018.01.008

[10] 边缘计算产业联盟. 边缘计算参考架构3.0 [EB/OL]. [2019-01-02]. <http://www.econsortium.org/Uploads/file/20181129/1543443431522383.pdf>

### ← 上接第 36 页

满足应用的时延要求前提下,尽可能降低系统总体能耗,保持各计算节点负载均衡,及时响应紧急计算任务。

### 参考文献

[1] 徐志伟, 曾琛, 朝鲁, 等. 面向控域的体系结构: 一种智能万物互联的体系结构风格[J]. 计算机研究与发展, 2019, (1):90-102

[2] SHI W, CAO J, ZHANG Q, et al. Edge Computing: Vision and Challenges [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, (3):637-646

[3] XU Z, PENG X, ZHANG L, et al. The Phi-Stack for Smart Web of Things [C]//Proceedings of the Workshop on Smart Internet of Things. USA: ACM. 2017: 1-6

[4] REINSEL D, GANTZ J, RYDNING J. Data Age 2025: The Evolution of Data to Life-Critical[R/OL]. <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/Seagate-WP-DataAge2025-March-2017.pdf>

[5] FIELDING R T, TAYLOR R N. Architectural Styles and the Design of Network-Based Software Architectures [D]. University of California, 2000

[6] CAO J, XU L Y, ABDALLAH R, et al.

EdgeOSH: A Home Operating System for Internet of everything[C]//2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). USA: IEEE, 2017: 1756-1764. DOI:10.1109/ICDCS.2017.325

[7] DAWSONHAGGERTY S, KRIOUKOV A, TANEJA J, et al. BOSS: Building Operating System Services [EB/OL].[2018-12-22].<https://www.usenix.org/conference/nsdi13/technical-sessions/presentation/dawson-haggerty>

[8] BORMANN C, CASTELLANI A P, SHELBY Z. CoAP: An Application Protocol for Billions of Tiny Internet Nodes [J]. IEEE Internet Computing, 2012, 16(2): 62-67. DOI:10.1109/mic.2012.29

[9] XU Z, CHAO L, PENG X. T-REST: An Open-Enabled Architectural Style for the Internet of Things [J]. IEEE Internet of Things Journal.2019. DOI: 10.1109/JIOT.2018.2875912

[10] HUNKELER U, TRUONG H L, STANFORD-CLARK A. MQTT-S — A Publish/Subscribe Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middlewares and Workshops (COMSWARE '08). India: IEEE, 2008. DOI: 10.1109/COMSWA.2008.4554519

[11] SHELLEY Z, BORMANN C. 6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet [M]. USA: Wiley, 2009

### 作者简介



**宋纯贺**, 中国科学院沈阳自动化研究所研究员, 中国科学院百人计划入选者, 中国自动化学会边缘计算专业委员会秘书长; 研究方向为工业互联网边缘计算; 发表论文 50 余篇。



**曾鹏**, 中国科学院沈阳自动化研究所所长助理、研究员, 中国科学院网络化控制系统重点实验室主任, 中国自动化学会边缘计算专业委员会主任, 国家“万人计划”创新领军人才; 研究方向为工业互联网; 获得国家科技创新贡献一等奖等省部级科技奖励 6 项; 发表论文章百余篇。



**于海斌**, 中国科学院沈阳自动化研究所所长、研究员, 国家杰出青年基金获得者, 国家“万人计划”创新领军人才, ISA Fellow, 中国自动化学会副理事长, 边缘计算产业联盟理事长; 研究方向为工业互联网; 获国家科技进步二等奖 4 项、技术发明二等奖 1 项; 发表论文章百余篇。

### 作者简介



**彭晓晖**, 日本东京大学博士毕业, 中国科学院计算技术研究所副研究员、硕导; 现主要从事物端计算系统的编程方法、应用协议与系统架构研究, 研究方向为分布式系统、边缘计算等; 主持和参与了数项国家、部委级研究课题; 发表论文章近 20 篇。



**徐志伟**, 中国科学院计算技术研究所研究员、博士生导师、学术委员会主任, 中国科学院大学教授, CCF 会士, 曾担任国家自然科学基金委信息科学部专家咨询委员会委员, 《IEEE TC》《IEEE TSC》等多个国际著名期刊的编委等; 主要研究领域为高性能计算机、分布式计算、网格计算与系统软件, 近年来主要从事边缘计算、海云计算系统的研究, 并提出了物端计算方向; 曾获国家杰出青年科学基金、中国科学院科技进步一等奖、国家科学进步二等奖、中国科学院优秀青年科学家奖、中国科学院百人计划资助、中国科学院杰出科技成就团队奖等, 2007 年获中国计算机学会“王选奖”; 发表论文章 100 余篇、专著 3 部。