

边缘计算在制造业数据采集与处理中的应用

徐盼望^{1a}, 杜万和^{1b}, 杨敬辉^{1b}, 韩玲玲^{1a}, 张笑²

(1. 上海第二工业大学 a. 资源与环境工程学院; b. 智能制造与控制工程学院, 上海 201209;
2. 南京航空航天大学 计算机科学与技术学院, 南京 211106)

摘要: 边缘计算靠近设备现场提供分布式计算、存储、应用等服务, 在制造业数据采集和处理方面相较以云计算为中心的模式, 其具有更高的实时性等优点, 因此研究边缘计算在制造业的应用有着较高的实际价值。介绍了边缘计算的架构模式和在制造业中的应用趋势, 对国内外应用于制造业数据采集与处理中的边缘计算软件服务框架进行对比研究, 总结了在边缘层获取采集数据、边缘节点管控与集群、智能数据处理和应用实施等方面, 当前面临的问题和技术解决方案, 以利于边缘计算在制造业应用中的落地和发展。

关键词: 边缘计算; 制造业; 数据采集; 数据处理

中图分类号: TP274

文献标志码: A

Research on the Application of Edge Computing in Manufacturing Data Collection and Processing

XU Panwang^{1a}, DU Wanhe^{1b}, YANG Jinghui^{1b}, HAN Lingling^{1a}, ZHANG Xiao²

(1a. School of Resource and Environmental Engineering; 1b. School of Intelligent Manufacturing and Control Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China; 2. School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Edge computing provides services such as distributed computing, storage, and applications at the device layer, which has the advantages of higher real-time data collection and processing in the manufacturing industry compared to the cloud computing-centric model. Therefore, it has high practical value to study the application of edge computing in the manufacturing industry. The article introduces the architecture model of edge computing and its application trends in manufacturing, compares the service frameworks of edge computing software used in manufacturing data collection and processing domestic and foreign, and summarizes the current problems and technical solutions facing the acquisition of collected data at the edge layer, edge node management and clustering, intelligent data processing and application implementation, in order to facilitate the application and development of edge computing in the manufacturing industry.

Keywords: edge computing; manufacturing; data collection; data processing

0 引言

2013年, 美国专家 Ryan^[1] 首次提出具有现代概念的“edge computing”, 即边缘计算。边缘计算是指

在靠近物或数据源头的一侧, 采用网络、计算、存储、应用核心能力为一体的分布式框架, 就近提供智能运算等服务^[2]。Shi等^[3]将边缘计算的数据对象正式定义为: 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,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。

边缘计算的概念是相对云计算产生的,传统的制造业数据采集和处理方式是以云计算为中心的工业互联网模式,如美国通用(GE)公司推出的Predix平台的云计算中心,每日实时采集和处理数以千万条来自世界各地的传感器数据[4]。这种以云计算为中心架构的数据存储和处理普遍依赖于云端系统,海量数据上传依赖大量的网络环境和带宽[5]。而边缘计算能够在网络边缘执行计算,它对传统的以云计算为中心的模式起到很好的保障和补充,即使在云中心出现突发问题的情况下,也能在边缘侧进行数据分析和存储操作。

分布式的边缘计算和传统的云计算是共同促进制造业转型升级发展的手段,而边缘计算在制造业实时性数据处理上更具有优势,它的加入是实现数据从采集到智能处理、再到数据互联、智能分析的基础,且是重要组成部分。由于制造业现场的终端层和边缘层的硬件设备的差异性和具体制造业现场的应用目标不同,制造业现场边缘计算的应用发展

还较为缓慢。如何发挥边缘计算的作用,完成现场数据从采集到处理的过程,是实现理想的应用服务的基础,也是制造业边缘计算的研究目标之一。

本文针对边缘计算技术概念与架构进行简单介绍,对制造业边缘计算的软件服务框架、数据采集与处理的现状和所面临挑战进行研究综述,以便于为智能制造和边缘计算相关研究人员和从业者提供一定参考,促进制造业边缘计算的发展和应用。

1 边缘计算架构与应用

1.1 架构模式

2016年11月,华为技术有限公司、中国科学院沈阳自动化研究所等在北京成立了边缘计算产业联盟(edge computing consortium, ECC)。据ECC发布的边缘计算参考架构3.0[6],边缘计算的通用“终端层-边缘层-云层”3层架构模式与云计算模式对比如图1所示,目前边缘计算模式的挑战较多集中在对边缘层的边缘计算数据处理、软件服务框架、边云协同、5G通信等关键技术研究上。

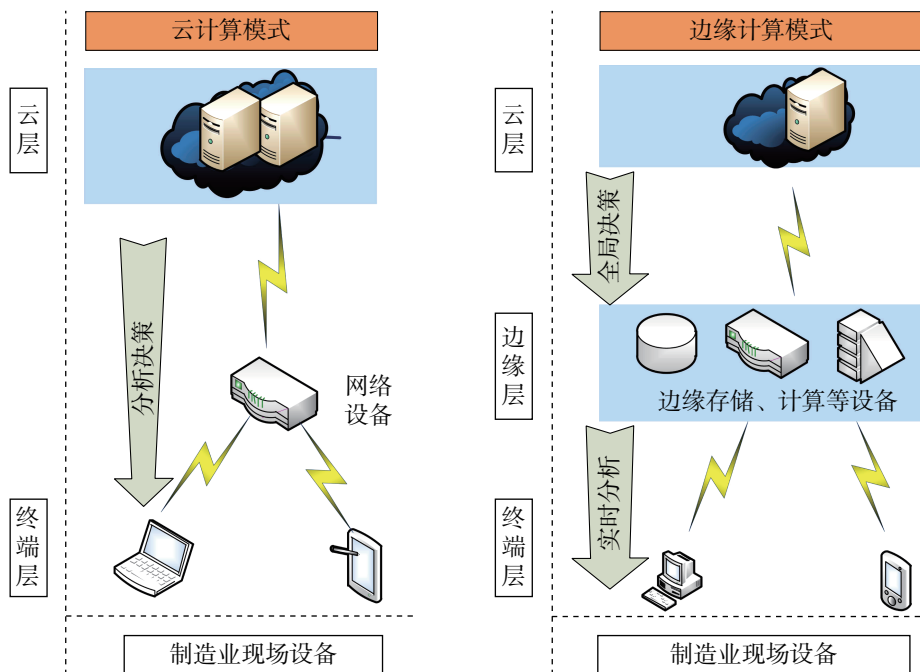


图1 云计算与边缘计算模式对比

Fig. 1 Comparison of cloud computing and edge computing models

据ECC发布的《边缘计算产业联盟白皮书》的边缘计算参考架构[7]来看,边缘计算从以边缘节点的分布式运算和服务为核心,展开延伸至异构硬件、

网络通信、边缘人工智能等范围,目前还涵盖了边缘大数据处理的边缘计算概念。制造业边缘计算架构如图2所示,边缘层紧靠现场的网络边缘向下对

终端层进行异构数据连接, 在边缘层内提供敏捷开发运维、分布式存储、边缘智能分析、网络资源管理等服务。制造业边缘层中的软件服务, 不仅要实现对现场数据的实时获取和处理, 还要向上支持云

边协同和数据迁移服务, 对内统一管理分布式的计算和网络资源, 为此诸多组织向边缘层提供了统一的软件开发和部署的边缘计算软件服务框架。

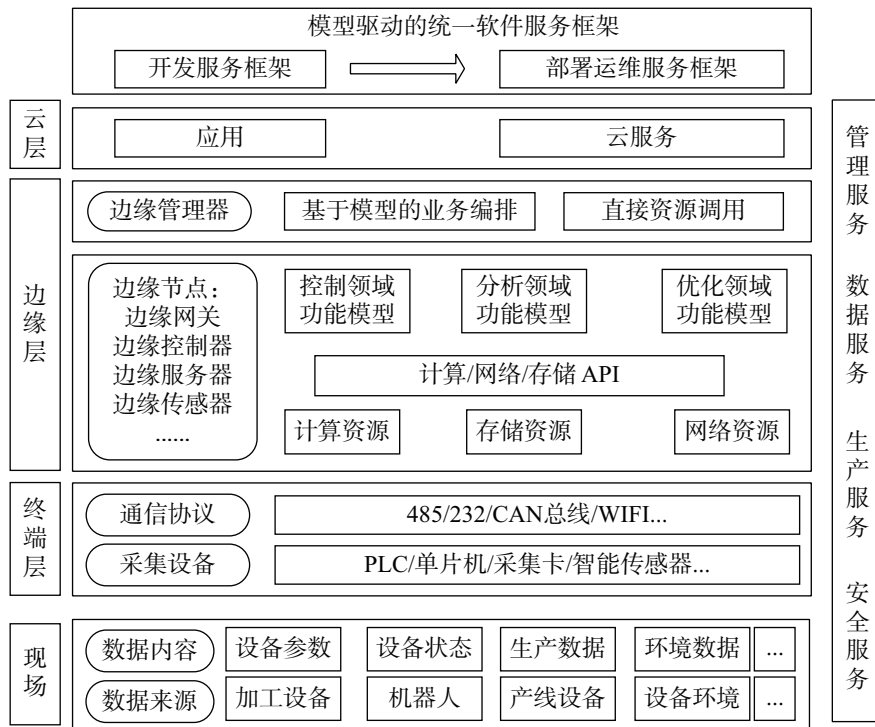


图 2 制造业边缘计算典型架构

Fig. 2 Typical architecture of manufacturing edge computing

1.2 国内外应用趋势

当前, 制造业边缘计算应用领域中的行业趋势分为两类, 如图 3 所示。一类以西门子等制造业巨头和华为等硬件厂商、物联网行业为主导, 自现场设备向上的边缘计算服务; 另一类以阿里云、AWS、GE Predix 等的工业互联网云平台服务商和通信运营商为主导, 自云端向下的边缘计算服务。

自云端向下的制造业边缘计算服务主要体现在微云计算、云原生边缘计算、边云协同等方面, 倾向于将传统工业互联网的云服务下沉到微云或边缘服务器集群中, 进行快速网络响应和上层云端响应。

自现场设备向上的制造业边缘计算服务, 主要思路是在基于 Docker 等容器技术通过硬件功能虚拟化的方式集中管控分布式的边缘计算节点^[8], 边缘计算节点由服务方提供的操作系统执行计算资源隔离分配、应用执行、任务调度等功能。在具体的边缘节点功能上, 可执行面向人工智能等场景的算法框架^[9]发挥边缘智能处理的作用, 分布式的数据储存和数据处理平台进行数据存储、调用、管理等任务^[10]。

由于制造业中常用的工业现场总线无法直接上传数据至互联网, 传统物联网网关只有对接云平台进行数据转接和简单数据压缩功能, 且硬件功能难以统一开发和运维。因此, 边缘计算中通过虚拟化的方式将软件功能与硬件剥离的新型设备开始出现。边缘计算硬件设备是承担应用功能的物理基础,

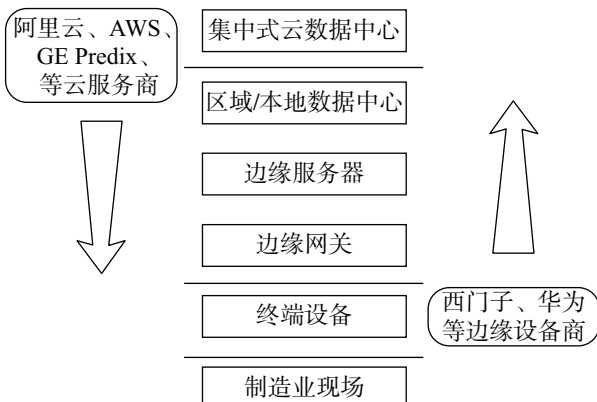


图 3 制造业边缘计算应用趋势

Fig. 3 Trends in edge computing applications in the manufacturing industry

硬件设备体系结构的研究重点主要为针对异构型处理器的加速计算,通用型计算设备(边缘网关、边缘服务器、边缘控制器等)的应用开发、标准制定。但目前边缘计算节点的硬件资源管控标准仍未确定,在制造业中也缺少健全的规范和体系,制造业边缘计算的项目实践检验仍是一项长远的行业研究重点。

2 边缘计算软件服务框架

在边缘计算软件功能上,目前相关行业组织都

研发出以隔离技术、安全技术、操作系统、数据处理功能为一体的边缘计算软件服务框架,将软件服务框架部署于边缘设备上,进行数据采集与处理服务是制造业边缘计算的应用核心。边缘计算软件服务框架能实现基于不同计算资源的统一化标准的边缘计算服务,包括不同通信协议的接入、异构数据的预处理和计算、边云协同和计算迁移等,能为边缘层提供具象化的软件功能和实现标准,是沟通连接制造业现场设备与计算资源的重要手段,边缘计算服务框架对照见表1。

表1 边缘计算服务框架对照
Tab. 1 Edge computing service framework comparison

服务框架名称	类别	支撑环境/系统	虚拟化方式
GE Predix Machine	工业互联网服务	Linux	Docker
西门子 Mind Connect	工业互联网服务	西门子设备	Docker
AWS Greengrass	边缘云商业服务	Linux	Docker
Azure IoT Edge	边缘云商业服务	Windows/Linux	Docker
阿里云 Link IoT Edge	物联网边缘服务	Linux	Docker
EdgeX Foundry	开源物联网边缘服务	Linux	Docker
KubeEdge	开源云原生服务	Linux	Docker、K8s
Baetyl	开源边缘智能服务	Linux	Docker、K3s

2.1 Predix Machine 与 MindConnect

边缘计算在制造业的数据采集与分析的行业应用中,最早出现的是美国 GE 公司的 Predix 平台。Predix 2.0 提供了 Predix Machine 的边缘计算系统操作框架,支持第三方开发相应的设备接入和边缘计算的功能,进行数据的连接、控制,分析机器设备等产生的海量数据以及连接到云端系统^[11]。Predix Machine 能在边缘网关中提供边缘计算框架服务,甚至小到如 Raspberry Pi 的微型嵌入式工业级控制器,提供整套技术和工具进行开发管理,并根据不同设备的内置功能,实现各种工业数据的采集和连接、解析、存储和通信等功能。

继 2016 年推出 MindSphere 平台后^[12], 西门子也推出 MindConnect 进行制造业边缘数据采集和处理,并与 Predix 竞争。不同的是,西门子公司以工厂数据采集与监测为起点向上设计平台,通过 MindConnect 采集西门子机器人、PLC 相关设备的实时运行数据到云端 MindSphere 平台,而 GE Predix 的设计思路是从云端向下。两者对比,西门子

MindConnect 因局限于自身的工业设备,在制造业中只适合西门子用户进行资源和设备的监测和数字化转型, Predix Machine 的使用范围和支持接入的范围更广,但是其成本也相对较高。

2.2 边云协同服务框架

国内外互联网服务提供商所提供的制造业边缘计算服务集中在边缘协同的能力上,主要以云边协同的理念将云服务拓展到边缘侧,即边缘云服务。2016 年 AWS 推出面向物联网的 Greengrass 商用边缘计算软件服务框架^[13], AWS Greengrass 能将 AWS 云服务功能扩展到本地设备,使得本地设备可以更靠近信息源来收集和分析现场数据,同时在本地上网安全地相互通信,构建出边缘云系统。

Azure^[14] 在 2017 年推出 IoT Edge, IoT Edge 是一组能够应用于 Windows 主机/Linux 系统设备/工业服务器的软件服务,能够将部分工作负荷移至边缘,做到更短时间的边云通信和协同。其中 IoT Edge modules 容器组件可以运行 Azure 服务、支持自主开发代码,通过 IoT Edge Runtime 组件部署到每个设

备的 IoT Edge 模块, 最后通过 Cloud-based interface 组件实现云端的设备可视化和管理分析。

阿里云提供的 Link IoT Edge^[15] 软件服务框架给出了一种面向物联网设备部署边缘计算服务的解决方案, 它继承了阿里云安全、存储、计算、人工智能的能力, 可部署于不同量级的智能设备和计算节点中, 提供不同数据格式的易扩展的本地计算服务。

上述边缘计算软件服务框架在制造业均经过实践性检验, 优越性集中在边云协同上, 但在应对现场大量复杂异构的数据采集问题时灵活性较为薄弱。

2.3 开源社区服务框架

Linux 基金会于 2017 年 4 月启动了开源项目 EdgeX Foundry^[16], 旨在创建即插即用的标准化物联网边缘计算的通用框架。EdgeX Foundry 是由一系列的耦合、开源的微服务模块组成, 其架构可以运行于不同的硬件操作系统, 且可升级或扩充组件, 边缘设备部署简单稳定且易于管理^[17]。

华为云贡献的 KubeEdge^[18] 是一个基于 Kubernetes 构建的将容器化应用扩展到边缘层的主机和设备, 支持边缘和云之间应用数据同步的开源系统, 用于将容器化应用程序编排功能扩展到边缘层。KubeEdge 目前已加入 CNCF 基金会。除边缘计算框架之外, 华为进一步研发了边缘云服务器和边缘网关, 打造软件系统和硬件设备协同推进的战略局面。张琦等^[19] 阐述了一种使用 KubeEdge 的云原生边缘计算系统方法, 通过构建边缘云计算服务器将云原生微服务管理能力延伸到边缘并在某制造现场使用, 验证了其在生产监管和产品质量检测和故障预测的实用性。

百度云贡献的 Baetyl^[20] (原名 Openedge) 边缘计算操作系统是一个开源项目, 旨在将云计算能力拓展至用户现场, 提供设备和消息对接、数据计算上报与同步等各种服务。Baetyl 属于百度智能边缘 (Baidu-IntelliEdge, BIE) 的边缘本地运行服务, 能和 BIE 云端管理套件配合使用^[21]。在架构上, Baetyl 不仅实现了功能模块化, 还使用 Docker 容器技术实现了多操作系统的适用性。目前此项目在 Linux Foundation Edge 旗下, 已升级到 Baetyl 2.0 版。

开源社区的边缘服务框架提供方主要是各方研究者和开发者, 共建共享的开源力量更有利于制造业边缘计算中的研究发展。除以上开源边缘服务框

架之外, 使用 K3OS、IoT Edge 等新的边缘软件服务框架、分布式机器人操作系统 ROS 2.0 开发边缘网关的软件功能^[22], 进行数据采集和处理也成为热点。但开源软件服务在结合边缘硬件在制造业边缘计算提供落地的服务之前, 往往还需进行投入一定研发人员进行二次开发和运维, 达到生产应用前的开发周期也较长, 研发门槛和投入成本较高。

3 应用与挑战

虽然国内外已经出现诸多边缘计算软件服务, 但在更为复杂的制造业实际应用场景中仍有较多问题需要解决。如应对海量异构数据的接入和预处理的问题及边缘层计算资源有限的条件下进行集群管理的困难, 并且伴随智能制造升级对边缘计算应用实践提出时延性、安全性等更多新的要求。为解决这些问题, 当前的应用研究主要在以下方面:

3.1 边缘层数据采集

边缘层软件服务框架以实时采集数据的作为数据来源。边缘层与终端层数据连接如图 4 所示。在边缘层数据采集上, 通用型边缘设备如边缘网关、边缘一体机作为数据采集的物理硬件, 软件服务框架承担数据处理、存储等功能。毕超等^[23] 提出 IAPcloud 平台在边缘层使用支持异构数据连接的通用型网关 APbox, 不仅能进行高速的边缘数据采集和计算还具有断网续传的功能, 支持边缘数据 ms 级实时性连接和异构计算, 同时具备算法实时动态重构功能。关岳等^[24] 设计了一种面向高速列车实验的边缘计算网关, 可以对多种协议总线的数据在边缘侧进行解析、存储、应用和管理, 并能提供丰富的包括 MQTT、OPC UA、HTTP 以及 RestFul 等北向接口与云平台低延时交互。

然而, 边缘层进行数据采集面临跨越繁多种类设备、缺乏统一的软件通信标准等问题, 边缘层数据采集仍需终端层与边缘层共同推进。终端层和边缘层的数据连接是提供数据采集的基础。目前, 在制造业数据采集终端层, 越来越常使用物联网操作系统 (Operating System for Internet of Things, IoT OS), 如微软物联网端的 Azure SphereOS、华为 Huawei LiteOS、亚马逊 Amazon FreeRTOS 等, 在嵌入式硬件设备上开发工业物联网终端设备的传感器源数据采集功能, 终端操作系统和边缘层软件服务框架融合进行通信互联, 才能提供更具有稳定性、实时性、

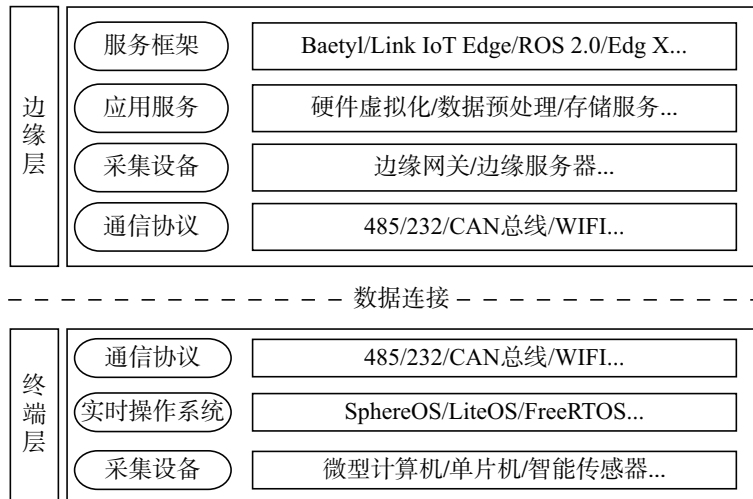


图4 边缘层与终端层数据连接
Fig. 4 Data connection between edge layer and terminal layer

数据异构性的数据连接服务。但制造业现场的设备复杂性、通信协议多样性、数据异构性现状长期存在,在制造业边缘计算应用开发和实施中会是长期的难点。

3.2 边缘节点管控与集群

在诸多制造业边缘计算的研究场景中,分布式的边缘节点还需要实现边边协同、边云协同实现边缘数据分布式处理和边云协同推理。在边缘节点应用功能的开发上,当前以 Docker 为主的容器技术因能隔离应用环境,统一管理底层计算资源并且在一个硬件上快速部署多个应用容器而成为关键技术之一。在边缘层部署的大量容器需要集中进行管控和集群,才能保证边缘层服务的稳定性和可靠性。

利用云原生技术中的容器技术及编排工具(Docker swam^[25]、Kubernetes^[26]、K3s^[27]等),在进行边缘计算节点的应用功能开发部署和运维交付时,不仅能更高效管控边缘节点进行扩展、迁移和升级,还能实现对容器自动化部署、弹性伸缩、运维监控

等集群服务。器集群工具对比见表2。陈卫等^[28]使用 KubeEdge 的云边协同架构是基于 Kubernetes 的接口进行边缘集群的编排和管理,通过仿真实验验证了 KubeEdge 平台结合容器技术可以大大减少实际场景下的资源消耗。但 Kubernetes 的部署对硬件内存消耗至少为 16 GB,对资源限制较大,对比针对边缘设备发行的轻量级 K3s,甚至只需要 512 MB RAM 即可运行在边缘节点,使用集群管理工具进行边缘层系统的搭建,跨硬件平台灵活部署性能更好。

将云原生技术以低开容器化的方式应用于边缘计算服务的运行环境中,是边缘网关和服务器、边缘微云中心进行管控和集群的主要思路。曾德泽等^[29]在对边缘集群的研究中从云原生边缘计算的容器分层属性上分析容器的层次化特性,并提出适用于有限边缘计算的低开容器部署方法的全栈式云原生边缘计算架构。但是边缘末端如边缘网关和嵌入式智能设备,对更轻量级分布式集群管理工具的需求,目前仍在探索中。

表2 容器集群工具对比
Tab. 2 Comparison of container cluster tools

名称	Controller	部署单位	优点	缺点
DockerSwam	Manager	Task	速度快、配置简单	跨平台效果较差
Kubemetes	Master (可多个)	Pod	适用大集群、自动负载均衡	资源消耗较大
K3s	Master (仅单个)	Pod	资源消耗小、适合边缘	目前仅适合小规模集群

3.3 边缘层智能数据处理

在边缘层数据处理中,国外较早早在轻量化人工智能算法执行框架如 TensorFlow Lite^[30-31]、Caffe2

等的关键技术上进行研究,如使用 TensorFlow Lite Converter 将运行在云计算平台的 TensorFlow 模型转换为 TensorFlow Lite 模型,通过应用程序激活、量

化等优化措施优化应用内核, 使在边缘设备上消耗较少的资源且高速实时处理小规模数据。国内此领域的行业领先者较少, 如百度开源深度学习平台-飞桨推出轻量化版本 Paddle Lite, 目前已适配 NVIDIA EGX 边缘计算平台, 其深度学习推理模型可直接在 EGX 平台上运行并进行边云协同数据推理。冯原等^[32]将 Paddle Lite 实践部署在移动 AGV 中, 验证了其在低算力、低功耗情况下的实用性。

除轻量化算法执行框架研究外, 谷歌的工业服务平台 Google Cloud IoT 表示, Cloud IoT Core 边缘服务框架除支持在边缘层收集设备数据将发布到谷歌云以进行分析外, 还可结合新发布的 Edge TPU (为 TensorFlow 框架定制的芯片) 使用, 可以将人工智能的功能集成到边缘设备, 起到软硬件协同推理作用。微软在云边缘协同方向推出的 Azure IoT Edge, 可将 Azure 云端的分析服务、机器学习、认知服务带到边缘设备, 加快对异常事件的预警反应。Azure IoT Edge 还开始将 Azure 机器学习及 AI 认知服务带进设备端进行基于硬件的边缘智能应用。

国内较多学者有关边缘智能的研究更倾向于具体应用型研究, 设计适合不同场景的人工智能算法。于天琪等^[33]提出一种包含无线监测节点、边缘计算节点和云平台的物联网监测系统边缘计算框架, 并利用自编码神经网络实现数据异常检测。其训练过程在云平台进行, 所得到的模型及参数将回传至边缘计算节点实施, 实验证明该异常检测方法接近理想检测器。

在边缘智能硬件开发中, 主要有通用型设备人工智能应用的开发和异构型专用硬件设备应用开发两个方向, 通用型设备的应用开发对算法执行框架具有较大的依赖。在异构设备上, 卢冶等^[34]研究设计了一种面向边缘计算的嵌入式 FPGA 卷积神经网络构建方法, 可以将高计算消耗的应用和服务逐渐从集中式的云计算中心迁移到网络边缘的嵌入式系统中应用。边缘智能作为边缘计算的突出表现之一, 无论是通过异构设备载体进行智能处理, 还是使用通用边缘节点设备进行推理, 其目标是一致的。但是由于制造业现场的数据异构性和应用的复杂性, 开发人员必须选择合适的方案, 以满足工厂对时延和准确性的要求。

3.4 制造业边缘计算的应用探索

制造业边缘计算的应用主要包括使用行业组织提供的服务、使用开源社区二次开发服务以及根据企业现状自主设计。在边缘计算开源项上, 李振江等^[35]使用 StarlingX 的架构组成和代码功能, 通过搭建大唐移动边缘计算平台总体架构, 再部署到实际环境中, 可以实现电信级可靠性架构从而满足边缘计算的实时服务特性。在针对具体行业设计边缘计算应用模型中, 宋纯贺等^[36]设计并验证了一种面向智能制造边缘计算模型。该模型可以满足智能制造在敏捷联接、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, 各类传感器通过边缘网关上报验证平台, 与实时流引擎实现数据的处理, 从而满足边缘计算向工业互联网智能制造融合的发展。张立婷等^[37]设计了一种集大数据、网络、储存为一体, 包括数据采集、生产及设备管理监控的边缘计算系统, 此系统对于繁琐的生产过程和复杂状况也较为适用。

以上边缘计算制造业中的应用探索, 基于边缘数据采集和处理, 从通信可靠性、数据互联、生产操作论证边缘计算助力制造业升级, 实现工厂的智能数据分析、智能控制、智能决策。但在制造业中的实践检验相对较少, 制造业场景下的边缘计算发展还需要更多的应用项目来实践。

4 结 论

本文介绍了边缘计算的发展、架构模式以及在制造业的发展, 分析了国内外边缘节点的软件服务框架和其优缺点, 对在制造业中数据采集与处理问题中的研究的现状进行分析。对边缘计算软件服务框架在异构性数据采集、节点管控、边缘智能与制造业落地应用等方面的未来长期发展与完善提供一些分析建议; 对国内智能制造和工业互联网相关边缘计算科研与工作人员, 在研究和应用制造业边缘计算时提供一定参考; 对全国制造产业信息化互联进程有些许贡献。

参考文献:

- [1] RYAN L M. Edge computing [R]. Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory, 2013.
- [2] 边缘计算产业联盟 (ECC)/工业互联网产业联盟 (AII). 边缘计算参考架构 3.0 [R]. 北京: 边缘计算产业联盟

- (ECC)/工业互联网产业联盟 (AII), 2018: 7.
- [3] SHI W S, CAO J, ZHANG Q, et al. Edge computing: Vision and challenges [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(5): 635-647.
- [4] 何江. 工业互联网架构实例分析: 以 GE 公司 Predix 为例 [J]. *信息通信*, 2017(11): 140-142.
- [5] LEE J. A view of cloud computing [J]. *International Journal of Networked and Distributed Computing*, 2013, 1(1): 2-8.
- [6] 边缘计算产业联盟 (ECC)/工业互联网产业联盟 (AII). 边缘计算参考架构 3.0 [R]. 北京: 边缘计算产业联盟 (ECC)/工业互联网产业联盟 (AII), 2018: 9.
- [7] 边缘计算产业联盟. 边缘计算产业联盟白皮书 [R]. 北京: 边缘计算产业联盟 (ECC), 2016: 23.
- [8] BALI A, BILLEL S, MAHMUD A O, et al. Container based resource management for data processing on IoT gateways [J]. *Procedia Computer Science*, 2019, 155: 234-241.
- [9] DENG S G, ZHAO H L, FANG W J, et al. Edge intelligence: The confluence of edge computing and artificial intelligence [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(8): 7457-7469.
- [10] ALEXEY S, SEMEN Y, et al. Evaluation of modern tools and techniques for storing time-series data [J]. *Procedia Computer Science*, 2019, 156: 19-28.
- [11] GE. Predix 技术白皮书 [EB/OL]. [2021-08-10]. https://predix.csdn.net/m/zone/ge/white_download.
- [12] 西门子 (中国) 有限公司. MindSphere: 基于云的开放式 IoT 操作系统 [J]. *智能制造*, 2019(7): 24-27.
- [13] AWS. AWS Greengrass [EB/OL]. [2021-08-10]. <https://docs.aws.amazon.com/greengrass/index.html>
- [14] AZURE. Azure IoT Edge [EB/OL]. [2021-08-10]. <https://azure.microsoft.com/zh-cn/services/iot-edge/>.
- [15] 阿里云. Link IoT Edge [EB/OL]. [2021-08-10]. https://help.aliyun.com/document_detail/
- [16] Linux 基金组织. EdgeX Foundry [EB/OL]. [2021-08-10]. <https://www.edgexfoundry.org>.
- [17] 顾笛儿, 卢华, 谢人超, 等. 边缘计算开源平台综述 [J]. *网络与信息安全学报*, 2021, 7(2): 22-34.
- [18] KUBEEDGE. KubeEdge 赋能边缘计算的开放平台 [EB/OL]. [2021-08-10]. <https://www.oschina.net/p/kubeedge>.
- [19] 张琦, 贾玄, 张森, 等. 云原生边缘计算架构分析 [J]. *电信科学*, 2019, 35(S2): 98-109.
- [20] BAETYL. BAETYL 边缘计算开源框架 [EB/OL]. [2021-08-10]. <https://www.oschina.net/p/baetyl>.
- [21] 李巧玲, 樊勇兵, 陈天. 边缘云开源技术探讨 [J]. *广东通信技术*, 2020, 40(8): 53-60.
- [22] QUIGLEY M, CONLEY K, GERKEY B, et al. ROS: An opensource robot operating system [EB/OL]. [2021-08-10]. <http://www.willowgarage.com/sites/default/files/icraoss09-ROS.pdf>.
- [23] 毕超, 郑松, 曾其璠, 等. 工业互联网中的数据采集与控制技术 [C]//2018 中国自动化大会 (CAC2018) 论文集. 北京: 中国自动化学会, 2018: 537-542.
- [24] 关岳, 刘文成. 一种实现试验台数据采集的边缘计算网关架构 [J]. *自动化博览*, 2020(11): 90-93.
- [25] MARATHE N, GANDHI A, SHAH J M. Docker swarm and Kubernetes in cloud computing environment [C]. 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019.
- [26] SPYRIDON V, GOGOUVITIS, HARALD M, et al. Seamless computing in industrial systems using container orchestration [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2018, 109: Pages 678-688.
- [27] RANCHER. K3s: Lightweight Kubernetes [EB/OL]. [2021-08-10]. <https://www.k3s.io/>.
- [28] 陈卫, 郑炜, 汤毅. 基于 KubeEdge 的云边协同技术架构的探索 [J]. *微型电脑应用*, 2020, 36(7): 155-157.
- [29] 曾德泽, 陈律昊, 顾琳, 等. 云原生边缘计算: 探索与展望 [J]. *物联网学报*, 2021, 5(2): 7-17.
- [30] DAI J. Real-time and accurate object detection on edge device with TensorFlow Lite [J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2020, 1651: 012114.
- [31] MANDUSIC M. Inference speed and quantisation of neural networks with TensorFlow Lite for Microcontrollers framework [C]. 5th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020.
- [32] 冯原, 王晓迪, 辛颖, 等. 基于深度学习模型小型化技术的输电线路智能巡检研究与应用 [J]. *四川电力技术*, 2020, 43(6): 21-25.
- [33] 于天琪, 朱咏絮, 王现斌. 基于边缘计算的物联网监测系统中利用自编码神经网络实现的异常检测 [J]. *物联网学报*, 2018, 2(4): 14-21.
- [34] 卢冶, 陈瑶, 李涛, 等. 面向边缘计算的嵌入式 FPGA 卷积神经网络构建方法 [J]. *计算机研究与发展*, 2018, 55(3): 551-562.
- [35] 李振江, 吴杨阳, 李婷. 边缘计算 IaaS 平台架构 StarlingX 研究 [C]//2019 全国边缘计算学术研讨会论文集. 北京: 中国通信学会, 2019: 14-26.
- [36] 宋纯贺, 武婷婷, 徐文想, 等. 工业互联网智能制造边缘计算模型与验证方法 [J]. *自动化博览*, 2020(1): 48-51.
- [37] 张立婷, 李世超, 郑东梁, 等. 工业无线通信技术讲座第七十一讲基于边缘计算的智能油田系统构建 [J]. *仪器仪表标准化与计量*, 2018(5): 8-11.