

# 边缘计算助力工业互联网:架构、应用与挑战



李 辉<sup>1,2</sup> 李秀华<sup>1,2</sup> 熊庆宇<sup>1,2</sup> 文俊浩<sup>1,2</sup> 程路熙<sup>1,2,3</sup> 邢 镔<sup>3</sup>

1 信息物理社会可信服务计算教育部重点实验室(重庆大学) 重庆 401331

2 重庆大学大数据与软件学院 重庆 401331

3 重庆工业大数据创新中心 重庆 400000

(h.li@cqu.edu.cn)

**摘 要** 工业互联网通过整合 5G 通信、人工智能等先进技术,将各类具有感知、控制能力的传感器与控制器融入工业生产过程,来优化产品生产工艺,降低成本,提高生产率。传统的云计算模式由于集中式部署的特点,计算节点通常离智能终端较远,难以满足工业领域对高实时性、低延迟的需求。边缘计算通过将计算、存储与网络等资源下沉到工业网络边缘,可以更加便捷地响应设备请求,满足工业互联网环境下智能接入、实时通信、隐私保护等关键需求,实现智能绿色通信。文中首先介绍了工业互联网的发展现状和边缘计算的相关概念,然后系统地论述了工业互联网边缘计算架构及推动工业互联网边缘计算发展的核心技术,最后总结了边缘计算在工业互联网领域的成功应用案例,并阐述了当下工业互联网边缘计算的现状与挑战。

**关键词:** 工业互联网;边缘计算;架构;应用与挑战;边云协同

**中图法分类号** TP393

## Edge Computing Enabling Industrial Internet: Architecture, Applications and Challenges

LI Hui<sup>1,2</sup>, LI Xiu-hua<sup>1,2</sup>, XIONG Qing-yu<sup>1,2</sup>, WEN Jun-hao<sup>1,2</sup>, CHENG Lu-xi<sup>1,2,3</sup> and XING Bin<sup>3</sup>

1 Key Laboratory of Dependable Service Computing in Cyber Physical Society (Chongqing University) Ministry of Education, Chongqing 401331, China

2 School of Big Data & Software Engineering, Chongqing University, Chongqing 401331, China

3 Chongqing Innovation Center of Industrial Big-Data Co. Ltd, Chongqing 400000, China

**Abstract** Industrial Internet integrates advanced technologies such as 5G communication and artificial intelligence, and integrates various sensors and controllers with perception and control capabilities into the industrial production process to optimize production processes, reduce costs and increase productivity. Due to the centralized deployment of the traditional cloud computing model, the location of computing node is usually far away from the smart terminal, which is difficult to meet the requirements of the industrial field for high real-time and low latency. By sinking computing, storage and network resources to the edge of the industrial network, edge computing can respond to device requests more conveniently, meet key requirements such as intelligent access, real-time communication and privacy protection in the Industrial Internet environment, and realize intelligent green communication. This paper firstly introduces the development status of the Industrial Internet and the related concepts of edge computing, then systematically discusses the Industrial Internet edge computing architecture and the core technologies that promote the development of Industrial Internet edge computing. Finally, it lists some successful application cases of edge computing and elaborates the current status and challenges of applying edge computing technology in Industrial Internet.

**Keywords** Industrial Internet, Edge computing, Architecture, Applications and challenges, Edge-cloud collaboration

来稿日期:2020-09-21 返修日期:2020-12-02 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金(61902044,61672117,62072060);国家重点研发计划(2018YFB2100100,2018YFF0214700);重庆市科技计划项目基础科学与前沿技术研究专项(cstc2019jcyj-msxmX0589);重庆重点基金项目(CSTC2017jcyjBX0025,CSTC2019jsxc-zdztzxX0031);中央高校基本科研业务费(2020CDJQY-A022)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(61902044,61672117,62072060), National Key R & D Program of China(2018YFB2100100, 2018YFF0214700), Chongqing Research Program of Basic Research and Frontier Technology (cstc2019jcyj-msxmX0589), Key Research Program of Chongqing Science & Technology Commission (CSTC2017jcyjBX0025, CSTC2019jsxc-zdztzxX0031) and Fundamental Research Funds for the Central Universities(2020CDJQY-A022).

通信作者:程路熙(chengluxi1818@126.com)

## 1 引言

目前,全球制造业正面临着自动化生产程度不足、低端产能与高端产能差异过大等问题,制造业生产水平整体上仍然停留在“工业 2.0”“工业 3.0”阶段。工业互联网作为新一代信息科技与智能制造深度融合的产物,通过智能化网络平台将人和工业生产线、业务系统、产品供应商紧密互联,充分利用大数据、人工智能、区块链、复杂分析等技术,帮助企业提高产品质量,降低生产成本,提高生产效率。目前,世界各国高度重视工业互联网的发展,德国于 2011 年率先提出“工业 4.0”战略,以解决国内出口下降、生产制造成本高等问题。2015 年,《中国制造 2025》发展战略指出要以创新驱动、质量为先、绿色发展、结构优化、人才为本为指导思想,加快我国从制造大国向制造强国的转变。2020 年 4 月,工业和信息化部召开工业互联网行业应用推进会,强调要全面落实工业互联网创新发展战略<sup>[1]</sup>。同年 7 月,中国信息通信研究院建设的工业互联网标识解析实验室成为首批工业互联网产业联盟实验室<sup>[2]</sup>,旨在推进工业互联网新技术新模式新业态研究。图 1 简单给出了工业互联网的发展历程。

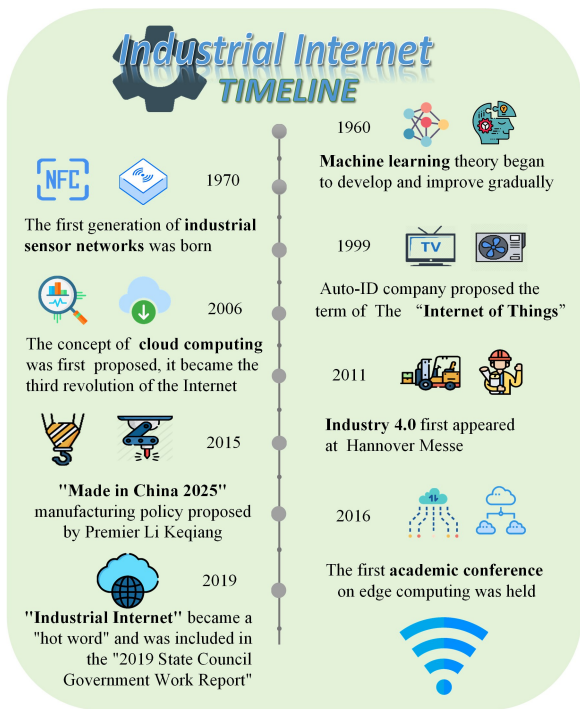


图 1 工业互联网发展历程

Fig. 1 Development history of Industrial Internet

根据工业互联网产业联盟(AII)推出的《工业互联网平台白皮书 2017》相关研究与分类,工业互联网平台主要包括四大典型应用<sup>[3]</sup>:工业生产过程优化(如智能物流、智能工厂、生产过程、工艺优化等)、社会生产资源优化(如生产制造协同、自动化控制等)、企业运营决策优化(如供应链管理优化等)、产品生命周期管理(如工业预测性维护等)。为了加速产业链的转型升级,实现 IT 与 OT 迅速融合,需要对传统的网络架构进行调整。目前工业领域普遍采用的是云计算架构模式,所有智能终端、工业传感器采集的数据都需要通过网络连接

传输至云计算中心,利用云服务器强大的计算能力进行集中式计算与处理。资源的高度整合是云计算架构的重要特征。然而,面对数据爆发式增长的情形,云计算架构模式还是暴露出其运维成本高、实时性低、数据隐私性差等方面的缺陷,具体如下。

1)极高的运维成本。随着工业自动化程度的不断提高,工业网络边缘每时每刻都有海量的数据产生,若数据全部传输至云端进行集中式处理,不仅会占用大量的网络带宽,导致核心网络阻塞,而且会加重云服务器的负载压力,导致大量能源消耗。

2)实时性难以保障。工业领域中部分应用对网络的实时性要求较高,如智能车联网、直播游戏和智能安防等。传统的云计算架构模式由于集中式的部署特点,数据处理程序通常在远程云端进行,计算节点的位置离智能终端较远,不可避免地增加了数据处理时延<sup>[4]</sup>。与此同时,由于工业边缘智能设备数量的增加和网络环境的动态性,带宽等网络资源的匮乏也正在逐渐成为制约云计算发展的另一大要素。

3)数据隐私性难以保证。工业传感器采集的数据通常具有高度的隐私性,例如精密仪器的生产加工过程、工业敏感数据等。云计算模式要求数据在云端统一处理,数据传输至云服务器需要经过较长的物理链路,这大大增加了数据被窃取与篡改的风险<sup>[5]</sup>。

为了弥补云计算模型的不足,边缘计算应运而生。本文第 2 节详细论述了边缘计算网络的发展历程,以及相较于传统云计算、Cloudlet、雾计算网络等其具有的优缺点及应用场景;第 3 节介绍了工业互联网边缘计算架构,并分层说明各个模块的功能;第 4 节详细介绍了推动工业互联网边缘计算的关键技术;第 5 节介绍了边缘计算在工业互联网领域的相关实现案例;第 6 节分析了当下工业互联网边缘计算系统所面临的现状和挑战;最后对全文进行了总结,并强调了工业互联网边缘计算发展对于国家建设的重大意义。

## 2 边缘计算的兴起

近年来,随着工业互联网程度的提高,边缘计算由于固有的低延迟、高实时性等优势,能满足未来工业互联网的建设需要,受到学术界和工业界的高度关注。本节首先介绍边缘计算的发展历程,随后系统综述了边缘计算的相关概念,并比较了其与传统计算范式的异同点。

### 2.1 边缘计算的发展历程

边缘计算最早由内容分发网络<sup>[6]</sup>(Content Delivery Network, CDN)逐渐演变而来,CDN 由 Akamai 公司在 1998 年提出,通过在网络边缘部署缓存服务器的方式,来提高内容获取速度,降低网络堵塞。2009 年,卡耐基梅隆大学研究团队首次提出了 Cloudlet<sup>[7]</sup>概念。Cloudlet 是一种融合物联网、移动计算和云计算技术的新型网络架构,支持与移动设备交互并提供强大的计算资源。2012 年, Cisco 公司提出雾计算模型<sup>[8]</sup>,旨在将云计算服务拓展到网络边缘,通过增添雾层(Fog 层)将计算任务迁移到离设备较近的雾节点中,以降低用户感知时延。2015 年,欧洲电信标准化协会发表移动边缘

计算白皮书<sup>[9]</sup>,其中详细论述了边缘计算的市场驱动、商业价值与应用场景。2016年5月,施巍松教授研究团队首次给出了边缘计算的正式定义:边缘计算是在网络边缘进行计算的技术,边缘是数据源和云计算中心之间的任一具有计算、存储能力的节点<sup>[10]</sup>。同年10月,首届以边缘计算为主题的学术会议(ACM/IEEE Symposium on Edge Computing,SEC)在美国华盛顿顺利召开。2016年11月,华为公司、中科院、英特尔等成立了边缘计算产业联盟ECC,边缘计算技术开始进入高速发展阶段。2018年,百度公司发布了边缘计算平台OpenEdge<sup>[11]</sup>,这是国内首个开源边缘计算服务平台。2019年,边缘计算产业联盟(ECC)与绿色计算产业联盟(GCC)联

合发表《边缘计算 IT 基础设施白皮书 1.0(2019)》,文中系统阐述了边缘计算的价值场景与技术方​​案<sup>[12]</sup>。2020年,中国移动在创新研究报告中提出“边缘计算+区块链”新兴研究方向,并分析了一些基于边缘计算与区块链的典型应用场景与技术实践<sup>[13]</sup>。

2.2 边缘计算相关概念

与边缘计算相似的计算范例,如 Cloudlet 和雾计算等,虽然在设计思想上与边缘计算相似,但就网络设施、架构层面和应用场景而言,却与边缘计算存在差异,本节将详细讨论这几种常见计算范式的异同点,表 1 列出了其详细技术指标对比。

表 1 常见的计算范式技术指标比较

Table 1 Comparison of several computing paradigms

	Cloud computing	Fog computing	Cloudlet	Edge computing
Distance	Multi-hop	One-hop/Multi-hop	One-hop	One-hop
Computing resources	Unlimited	Limited	Limited	Limited
Node devices	Server cluster	Router,Gateways	Data Center	Servers in base stations
Delay	High	Low	Low	Low
Node location	Data center	Within the Edge	Edge network	Edge network
Architecture	Centralized	Distributed	Distributed	Distributed
Real-time	Weak	Strong	General	Strong
Reliability	Weak	Strong	Strong	Strong
Face to	Unlimited	Distributed computing and storage IoT scenarios	Mobility enhanced scenarios	Internet of Vehicles,Industrial Internet of Things,etc.

1)边缘计算。边缘计算是近年来工业互联网领域引进的新技术,通过将计算、存储、网络、通信等资源下沉到网络边缘(工业现场、数据源头等),近距离地为应用提供边缘智能服务,可以满足工业互联网环境下智能接入、实时通信、隐私保护等关键需求,有效降低网络开销和系统资源消耗,是实现智能、绿色通信的关键。与云计算相比,边缘计算采用的是在网络边缘侧进行计算的方式,通过将一些小型的计算节点和数据中心分散部署在用户周边,让服务程序与用户进行近距离交互,从而提升用户服务质量。边缘计算与云计算的关系并不是非此即彼,而是相辅相成,云计算擅长处理长周期、计算量大的任务(如大数据分析、人工智能算法训练等),边缘计算则擅长短周期、本地化的数据处理(如本地实时决策等)。

2)Cloudlet。Cloudlet 是一种小型的具有计算、存储能力的服务器集群,通常部署于网络边缘(如商场、超市,或者具有移动性的车辆等),是一类具备移动性的小型云数据中心。Cloudlet 采用“移动设备-cloudlet-云”架构模式,其网络资源被广泛分布在用户周边,通过将云计算中心资源迁移到靠近用户的 Cloudlet 上,就近为附近的移动设备提供智能服务。相比边缘计算,Cloudlet 主要致力于增强设备的移动性,目前被广泛部署在设备与数据中心之间的基站、流量汇聚点中。

3)雾计算。雾计算与边缘计算具有很强的相似性,属于边缘计算范畴。雾计算通过在智能终端和云服务器之间引入 Fog 层的方式来拓展云计算,而 Fog 层实际上是由部署在网络边缘的雾节点构成。雾计算避免了终端设备与云服务之间的频繁通信,为用户提供了高可靠的实时通信服务。但这并不意味着雾计算就是边缘计算,雾计算强调的是智能终端与数据中心之间构成的统一体,计算过程通常发生在局域网级

别的网络架构层面,而边缘计算则大部分面向物联网设备本身,不仅关注网络基础设施,还关注于网络边缘设备等。此外,就应用领域而言,雾计算主要致力于分布式计算、存储的物联网场景,边缘计算则主要应用于降低应用延迟,适合于智能车联网、工业物联网、视频流优化加速与直播游戏等应用场景。

3 工业互联网边缘计算架构

为了能够充分整合云计算、边缘计算架构模式的优势,本节结合工业互联网领域技术构成与应用特点,提出了一种边云协同的联合式架构系统(以下简称工业互联网边缘计算系统)。工业互联网边缘计算系统通过在现场终端与云服务器之间部署具有计算、存储能力的边缘节点,将云服务应用拓展到工业网络边缘。边云协同的架构通常包括 3 层,即现场终端层、边缘层、云层,如图 2 所示。各层可以进行层间与层内通信,具体功能分析如下:

1)现场终端层。现场终端层由各种不同类型的物联网终端(如工业传感器、NFC 感应装置、智能卡、摄像头、智能车辆等)组成。这些智能终端通过有线连接(如工业以太网、现场总线和光导纤维等)或无线连接(如 4G、5G、蓝牙、Wi-Fi、RFID 和 NB-IoT 等)的方式与边缘层中的边缘控制器、网关相连,主要完成原始数据采集与上传任务,实现现场终端层与边缘层的信息、数据互通。在现场终端层中,为了延长设备的使用寿命,通常不考虑它们的计算能力。

2)边缘层。边缘层是边云协同架构的核心,由大量的边缘节点(如边缘网关、边缘控制器、路由器和基站等)组成。它既接收来自现场终端层发送的数据信息,进行计算与存储任务,又与云层进行任务、数据、管理、安全协同。边缘层通常由



3 部分组成: 基础设施即服务 (Infrastructure-as-a-Service, IaaS)、平台即服务 (Platform-as-a-Service, PaaS) 和软件即服务 (Software-as-a-Service, SaaS)。IaaS 层提供系统运行所必需的基础设施资源, 如计算、存储与网络资源等, 通过容器化与虚拟化技术为系统提供硬件层面优化。PaaS 平台层提供系统程序的运行环境, 可以完成分布式推理, 运行人工智能 (AI) 算法、数据可视化、大数据平台构建等任务。SaaS 应用层屏蔽底层技术细节, 对外提供平台管理、创新型应用、工业预测性维护、自动化控制等功能服务。企业可以结合自身需求定制、开发相应的创新型软件与平台。

3) 云层。在边云协同的架构模式下, 云层仍然是最强大的数据计算与处理中心, 通常由若干高性能服务器集群部署组成。边缘层难以处理的计算任务 (如大数据分析、深度学习模型融合训练和历史数据管理等) 和存储任务 (如镜像仓库等), 将仍由云层完成。云层不仅提供数字化、信息化和智能化的应用服务, 还支持与边缘 IaaS 层、PaaS 层和 SaaS 层协同, 以实现网络资源与安全协同智能化管理, 通过边缘层接收工业现场数据、向现场终端层发送控制指令信息, 从全局范围内进行资源调度和生产工艺优化, 满足现场终端层多样性的业务需求。

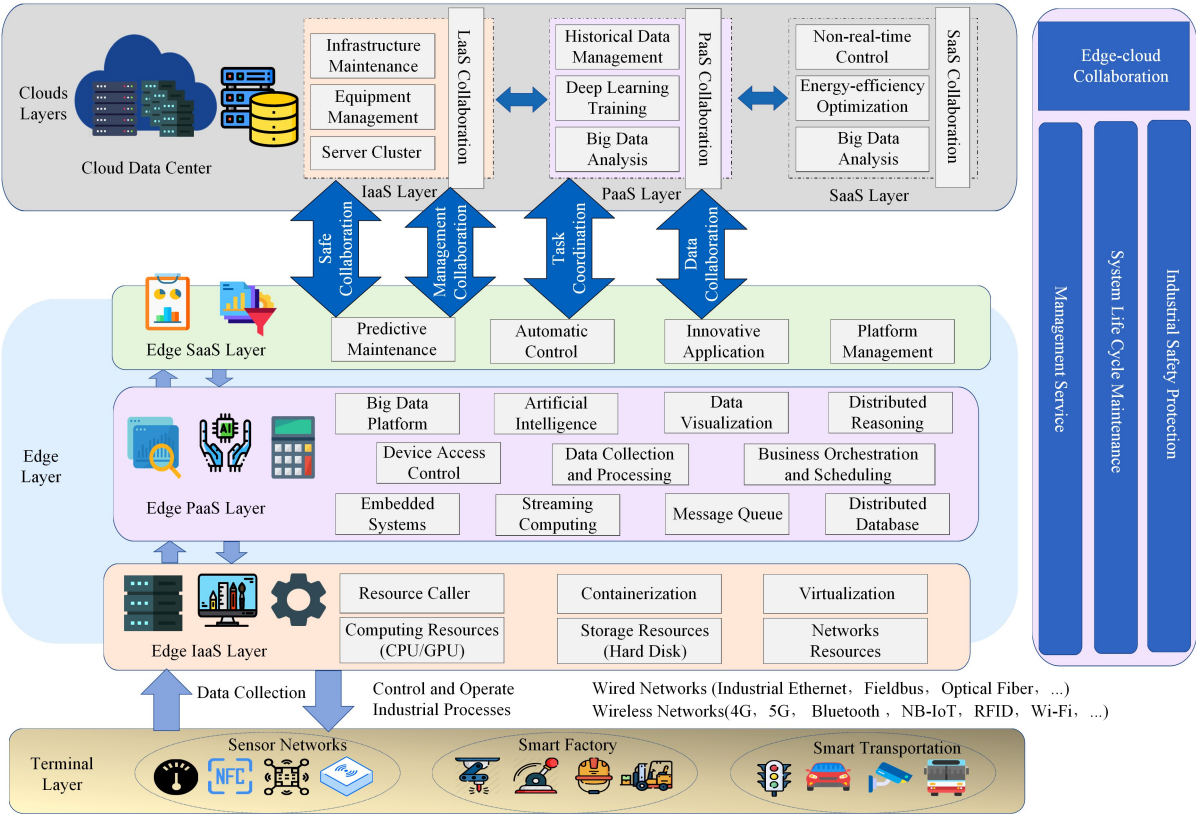


图 2 工业互联网边缘计算系统参考架构

Fig. 2 Reference architecture for Industrial Internet edge computing system

4 工业互联网边缘计算关键技术

工业互联网边缘计算系统的实现离不开相关技术的支撑。本节将详细讨论推动工业互联网边缘计算系统发展的关键技术, 具体包括 5G 通信技术、计算卸载技术、工业 SDN、网络功能虚拟化、网络切片技术和人工智能技术等。

4.1 5G 通信技术

5G 作为新一代蜂窝移动通信技术, 在网络组织和信息交换过程中起到至关重要的作用<sup>[14]</sup>, 是未来工业互联网发展的基础。与 4G 相比, 5G 通信技术可以为边缘计算网络提供极大的网络带宽、海量设备的接入能力和超高的文件传输速率, 可以精确满足工业场景下对低时延、高速率的需求。据思科年度互联网报告估计, 到 2023 年, 5G 网络的访问速度将是平均移动连接速度的 13 倍, 平均网速可达 575 Mbps<sup>[15]</sup>, 连接到互联网的设备数量将会超过全球总人口数量的 3 倍。此外,

在当前工业制造环境中, 由于工业现场环境的复杂性、无线网络的不可靠性, 多数终端节点的位置被固定, 网络连接方式仍以有线连接为主。5G 网络采用 C/U 架构方式, 可以让智能终端和传感器更灵活地部署, 摆脱传统有线连接的束缚<sup>[16]</sup>, 让工业生产与通信更加便捷、高效。目前, 我国 5G 通信技术已经在北京、上海等城市进行试点, 实测最高网速可达 GB 级别。

4.2 计算卸载技术

计算卸载是智能终端将本地全部或者部分计算任务卸载到边缘服务器或云服务器<sup>[17-18]</sup>, 由它们代替智能设备执行计算任务, 并将计算结果返回给智能终端的过程。计算卸载技术可以根据优先级、紧急程度等参数为任务分配特定的边缘服务器与计算资源, 以降低系统时延和能量消耗, 可以有效解决终端设备计算能力不足、资源受限等问题, 目前被广泛应用于实时决策生成等工业生产多领域中。

计算卸载技术需要解决的核心问题是如何确定卸载策略,即解决计算任务是否卸载、卸载地点、卸载时间、任务的卸载率(任务卸载比例)等问题。目前,大量的研究开始聚焦计算卸载技术,目标主要集中于优化时延和能耗两个方面。文献[19]考虑了车联网的应用场景,提出了在满足时延约束的前提下使总功耗最小的节能计算卸载问题,进而给出一种基于深度强化学习的解决方案,相比其他算法可以更有效地降低能耗。文献[20]介绍了物联网边缘计算环境下基于区块链的计算卸载方法,通过综合考虑卸载过程中的时延、能耗和负载均衡,提出了一种非支配排序遗传算法来生成可行的资源分配策略。文献[21]介绍了一种端-边-云架构下的计算卸载问题,综合考虑了系统的时延和能耗,通过一种启发式算法来实现任务的最优卸载与资源分配。

4.3 工业 SDN/NFV

软件定义网络(Software Define Network,SDN)最早由美国斯坦福大学提出,是一种实现可编程的网络管理和虚拟化的方式[22]。在传统网络体系结构下,由于系统的可扩展性、伸缩性较差,若要给系统添加新功能,势必要考虑其对现有网络兼容性的影响。然而,工业网络边缘通常应用场景复杂、需求差异明显,工业 SDN 通过分离数据转发和网络控制面[23-24],合理划分控制平面与转发平面功能,实现对网络流量的灵活控制,从“水平平面”对系统进行解耦。此外,SDN 控制器具有全局网络视图,可以与边缘计算协调器进行整合,为系统提供服务管理与试用能力,加速网络信息的收集。

网络功能虚拟化(Network Function Virtualization,NFV)的核心理念是将系统功能软件化,以弥补传统固定软硬件搭配的缺陷[25-27]。NFV 技术以虚拟机(Virtual Machine,VM)的形式将系统功能运行在标准硬件之上,实现网络功能“垂直层面”解耦,设备可以通过生成多个 VM 的方式来加速任务的计算过程,提升系统运行效率。网络功能并不依赖于专用硬件,物联网厂商可以自行生产标准硬件来运行系统功能,从而极大程度地利用系统资源,降低物理硬件和资源聚合成本,加快新业务的开发和部署。

NFV 与 SDN 并没有直接的依赖关系,但是它们在某些层面存在相似之处[28-29]。NFV 与 SDN 技术都是通过解耦来提升系统的灵活性,设计思想接近。SDN 的目标是创建可集中管理与编程的网络,从“水平平面”对系统进行解耦,而 NFV 更倾向于从硬件中抽象出网络特征,从“垂直平面”对系统功能进行松耦合。边缘计算通过整合 SDN 和 NFV 技术,可以快速、便捷地部署边缘业务,提供边缘智能服务管理,清除端边通信障碍,加速工业互联网边缘计算系统的建设进程。

4.4 网络切片技术

工业互联网边缘计算系统并非面向单一应用场景,而是面临各种不同领域的应用需求,如智能制造、智能车联网、虚拟现实(VR)与增强现实(AR)[30]、智能电网[31]等,如图 3 所示。不同应用场景对网络的实时性、可靠性、安全性的需求存在差异,这就要求系统能够根据不同的应用场景或特定的应用程序,指定不同的虚拟网络。网络切片技术可以根据不同的应用场景实现按需定制与隔离,允许将一个公共物理基础设施切分成多个虚拟网络[32],每个虚拟网络之间相互独立,

互不干扰,极大地提升了系统部署的灵活性。网络切片技术的实现依赖于 SDN 与 NFV 等相关技术[33],不同网络切片的建立依赖于 SDN 和 NFV 的虚拟资源池。

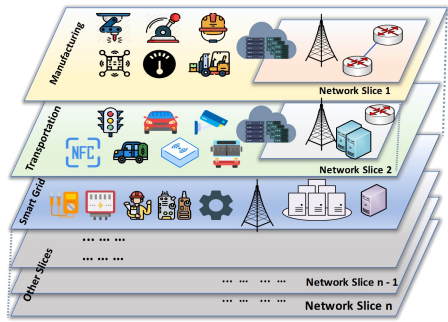


图 3 网络切片技术的应用场景

Fig. 3 Application scenarios of network slicing technology

4.5 人工智能技术

人工智能与边缘计算技术的融合,使机器具备了“思考”和“决策”的能力。近年来,随着智能设备运算能力的提升,在边缘计算网络中应用人工智能技术成为了可能。Wang 等[34-35]提出了边缘智能的概念,即通过在边缘生态中融入人工智能技术,来实现自适应的网络服务与资源管理。在人工智能领域的众多算法中,深度学习在强化边缘网络性能中取得的效果最为突出。深度学习具有强大的非线性表征能力,可以通过调整层内神经元个数和网络层间的计算规则,形成不同的网络结构(如 CNN,DNN,RNN 等),来适应不同的工业生产环境。CNN[36]可以用来提取图像中的隐式信息,通过整合边缘计算低时延的优势,实现边缘智能监控。DNN 可以学习数据特征和制定决策,被广泛应用于边缘缓存内容放置与更新[37]、策略制定场景等。强化学习(RL)通过智能体与环境交互来学习最优的任务调度和资源分配策略[38]等。

5 边缘计算相关实现案例

5G/6G 时代的到来加速了边缘计算系统的落地,使得边缘计算能够更好地服务于工业生产过程。本节将详细讨论边缘计算在工业互联网领域的几个应用场景,如离散制造业、智能交通、智慧工厂、消防监控等,如图 4 所示。其中部分场景已经得到学术界的深入研究。表 2 总结了近年来边缘计算在工业互联网领域的研究成果。

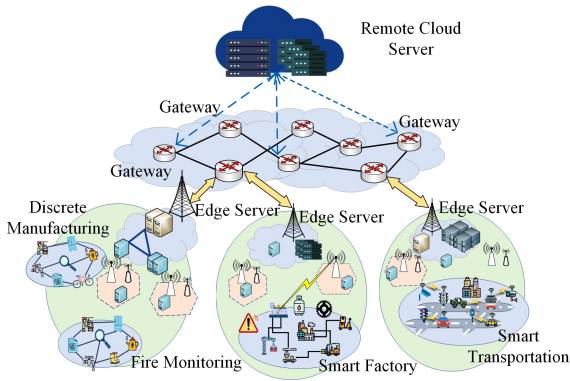


图 4 工业互联网边缘计算系统应用场景图

Fig. 4 Application scenarios of Industrial Internet edge computing system

表 2 工业互联网边缘计算系统应用的最新研究

Table 2 Latest research of industrial Internet edge computing system application

Application	References	Main contribution
Discrete Manufacturing	[39]	Introduced the industrial equipment management service system based on edge-cloud collaborative architecture from the perspective of system architecture.
	[40]	Proposed a four-layer computing system for the smart manufacturing environment, to meet the real-time requirements of the industrial environment.
	[41]	Integrated data flow and distributed deep learning in the edge environment of Internet of Things.
Smart Transportation	[43]	Improved the perception and decision-making capabilities of autonomous driving systems through edge computing and machine learning, and summarizes common machine learning algorithms for autonomous driving.
	[44]	1) Proposed the architecture of edge computing technology for autonomous driving and summarized the opportunities and challenges. 2) Discussed the security of the Internet of Vehicles system from multiple angles.
	[45]	Proposed a short-term traffic prediction model that combined the traffic light and vehicle speed model.
	[46]	Proposed an optimal control design for the connected cruise control system equipped with computing, caching, and control capability.
	[49]	Proposed a three-layer architecture edge AGV control system including cloud service layer, edge layer and the device layer.
Smart Factory	[50]	1) Proposed a smart factory industrial IoT architecture based on edge-cloud collaboration. 2) Realized real-time production status monitoring and autonomous production process response control of smart factories.
	[52]	Proposed an edge computing framework, which uses the collaborative processing capabilities of edge nodes to enhance video content detection.
Fire Monitoring	[53]	1) Proposed the architecture of edge computing enabled smart firefighting. 2) Analyzed the opportunities and challenges of edge computing applications in fire protection scenarios.
	[54]	Automatically deploy video analysis programs on edge devices for collaborative video analysis and processing.

5.1 离散制造业

离散制造业的生产过程通常由多个生产工序完成,如汽车制造、航空零部件制造等。近年来,随着信息化步伐的加快,全球离散制造业正在积极向网络化、智能化方向转型。然而制约离散制造业转型的瓶颈仍有很多,如工业设备间协议的多样异构、数据类型的异构异质、工业现场的“信息与数据孤岛”、设备之间互联互通、数据收集与处理缺乏实时性等,这些因素都为离散制造业的转型升级造成了巨大的困难。

当下,基于边缘计算的工业互联网体系架构将在离散制造业的智能化转型升级中发挥不可替代作用。工业互联网边缘计算系统具有强大的设备管理能力,不仅支持传统协议和接口,保证了原先互联的设备不会因为边缘层的介入而丧失连接性,而且可以让原先不能互联的设备在边缘计算平台的帮助下实现信息互通,有效解决了设备之间的连接性问题。文献[39]分析了基于边云协同架构的工业设备管理服务系统,详细讨论了设备管理云平台 and 边缘智能网关的设计,从系统架构层面探讨了设备异构性问题的解决方案。此外,基于数据流的数据处理方式可以有效应对海量实时数据,为系统提供强大的数据支撑。目前边缘计算系统正在加速向数据源头部署,实现数据就地处理,在网络边缘进行数据筛选与数据集成,组装结构化数据,加速异构数据融合,缓解云服务器的压力。Li 等<sup>[40]</sup>提出了一种应用于边缘计算网络下智能资源调度的混合计算框架,设计了一种基于贪婪和阈值策略的边缘层资源调度算法,来满足智能制造领域对高实时性的需求。文献[41]研究了一种在物联网边缘计算环境中集成数据流和分布式深度学习的方法,从数据生成阶段开始对数据进行处

理,实验证明,所提出的策略可以降低约 33% 的延迟。

5.2 智能交通

随着计算机视觉、5G 通信、物联网技术的迅猛发展,交通工具的功能不再局限于传统的出行与运输,而是逐渐演化为一个智能的、互通互联的系统<sup>[42]</sup>,智能车联网将会是未来工业互联网领域的重要应用之一。车联网系统中包含大量智能终端设备(如车辆、交通信号灯、感知路况的传感器等),在面对时变复杂的路况和突发的紧急事件时,传统的云计算架构试图将计算密集型任务卸载至云服务器中,以缓解终端设备计算能力的不足。然而,由于云计算中心业务的集中式部署,通常难以实现车辆与云服务器之间毫秒级甚至微秒级的响应。

目前,自动驾驶、交通分析与预测、交通信号控制是边缘计算在智能交通领域的主要应用。以自动驾驶为例,基于边缘计算的智能车联网系统通过多样传感器和车载应用感知路面信息和车辆行为,将收集到的实时路况信息传输至车辆周边的边缘服务器中进行分析与处理,让数据与应用处理程序更加靠近车辆本身,显著降低了数据在车云之间往返的传输时延,车辆驾驶员可以提前做出决策来应对紧急情况,提升车辆行驶安全性,减轻交通堵塞状况。云服务平台则负责从边缘服务器中获取车辆行驶和路面交通数据,服务于车辆跨区域调度、车载地图更新等任务。文献[43]探讨了利用新兴的通讯技术来强化自动驾驶系统的感应能力,通过使用机器学习算法,让车辆学习在无明确编程的情况下执行智能操作。文献[44]讨论了自动驾驶边缘计算架构,详细分析了算法、云和车辆边缘等子系统的作用,并从多维度总结自动驾驶技术



所遇到的机遇与挑战,从传感器安全、操作与控制系统安全、边缘平台网络安全性等多角度分析自动驾驶边缘计算系统的安全性。文献[45]提出了一个边缘计算网络下短期交通预测模型,通过综合考虑红绿灯效应和个体行为,提出了一种低复杂度半参数预测模型来对车辆速度进行预测。文献[46]提出了一种辅助驾驶的连接巡航控制系统,通过对车辆进行动力学建模来模拟现实场景,并采用反向递归迭代法求解线性二次优化问题,获得最优控制策略。

### 5.3 智慧工厂

智慧工厂是工业互联网领域的典型应用之一。随着计算机技术的发展和工业互联网程度的提高,大量异构的物联网设备开始在智能工厂中应用,据思科全球网络趋势报告估计,到2022年,全球M2M(machine-to-machine)的设备数量将会达到惊人的146亿,约占全球所有互联网设备总数的51%<sup>[47]</sup>,由人和机器产生的实时数据更是达到PB甚至ZB级别。传统的工业云平台已经难以满足低时延、大带宽的需求。为了实现从传统工厂到智慧工厂的转变,越来越多的工厂倾向于使用工业机器人代替人工从事工业生产。其中,自动导引车(Automated Guided Vehicle, AGV)凭借其准确率高、灵活性强的特点,被广泛应用于工业生产过程中。据了解,一台AGV小车一天的工作量相当于多个人加上一台运输车,且可以24小时连续不间断地工作,若能大量普及使用,可以显著降低雇佣人工的成本,提升生产效率。AGV小车具有自动引导装置,可以沿着指定的路线行驶,现阶段工厂操作AGV小车普遍采用云控小车的方式<sup>[48]</sup>,当系统中小车数量过多时,云服务器压力会陡增。与此同时,由于工厂内部的强电磁干扰,无线网络连接会存在不稳定因素,AGV小车调度控制的实时性难以保障。边缘计算技术可以就近完成数据处理任务,在网络边缘侧规划AGV小车的行车路径,并提供车辆导航服务;云计算层则负责数据的整合,提供工业预测性维护等功能。文献[49]提出了一种边云协同架构的AGV控制系统,并以路径规划和障碍物识别为例,将其与传统云计算方案进行对比,证明了基于边缘计算模型的控制系统可以减少46.4%~58.8%的计算延时。Ding等<sup>[50]</sup>提出一种边云协同的智能工厂工业物联网架构,综合考虑了加工车床、AGV小车等应用的智能属性,研究了智能工厂在边缘和云端两个层面的数据处理过程,并证明了所提方案的可行性,为智能制造、自动化生产领域提供了一种新的解决思路。

### 5.4 消防监控

随着工业城市化进程的不断加快,城市建筑群发展呈现面积扩大化、结构复杂化、建筑多样化的特点,使得火灾致灾因子增加,消防事故频繁发生,造成了巨大的财产损失和大量人员伤亡。据人民网不完全统计,2019年全年共接报火灾23.3万起,亡1335人,伤837人,直接财产损失高达36.12亿元<sup>[51]</sup>。研发和应用智能高效的智能消防监控系统,对智慧城市建设具有重要意义。

最初,人们只能通过人工巡查的方式来对火灾进行监控。近年来,由于深度学习在图像处理领域取得了重大突破,使得计算机具备强大的学习和数据处理能力,并被逐渐应用于消防监控领域。城市火灾具有突发性强、随机性高等特征,在传

统的云监控模式下,需要将事故现场图像与视频内容传输至云端进行分析、处理。然而由于火灾现场环境混乱,基础设施破坏严重,带宽资源通常难以保证,传输视频内容需要较长的时间,难以保证监控的实时性。此外,监控区域多为居民住宅或私人活动场所,视频信息通常具有高度隐私性与机密性,这大大增加了隐私信息被窃取与篡改的风险。近年来,边缘计算技术在火灾预防与监控领域发挥了至关重要的作用,通过在边缘网络中整合人工智能技术,应用AI算法,实现智能化监控和火灾事故预防等。文献[52]提出了一种基于边缘协同的视频处理框架,利用边缘节点之间的协同处理能力来提取视频内容特征,减少向云服务器的视频发送量,从而强化视频内容检测。文献[53]讨论了边缘计算在消防系统中的应用场景,通过在消防车辆等终端上部署具有计算能力的服务器,来处理火灾现场摄像头和传感器传递的数据,实时指导消防人员采取合理的消防措施,实现远程控制。Zhang等<sup>[54]</sup>在Firework大数据处理框架的基础上,通过增添边缘计算技术,实现了AMBER智能警报助手功能,可以自动化地与其他边缘服务协同进行视频处理,实现智能预警功能。

## 6 边缘计算系统面临的挑战

边缘计算在靠近网络边缘侧进行计算,提供高可靠性、低时延、高实时性的应用服务质量。为了实现技术架构升级,使企业利益最大化,近年来,我国的基础网络服务提供商(如中国移动、中国联通和中国电信等)、互联网公司(如华为、腾讯和阿里等)纷纷开始战略布局,但在推动工业互联网边缘计算系统的研究和应用落地过程中,仍然面临着诸多问题。本节从边缘设备管理、边缘网络的安全性和边缘系统的资源管理3个方面论述工业互联网边缘计算的现状与挑战,具体如图5所示。

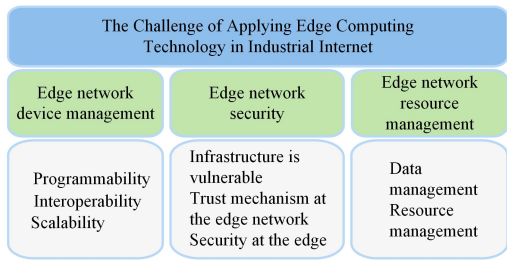


图5 工业互联网边缘计算面临的挑战

Fig. 5 Challenge of applying edge computing technology in Industrial Internet

### 6.1 边缘设备管理

1) 可编程性。工业互联网边缘计算系统中的设备和资源通常具有异构性、差异性特征,这意味着节点的计算能力、时钟频率、操作系统、所使用的开发语言和硬件资源等在很大程度上是不同的,平台开发者需要根据特定的设备类型进行系统开发,这无疑会大幅增加系统的开销成本与代价。边缘计算系统的目标是设计一个通用灵活的、开放的计算平台,任何与硬件具有高度耦合性的开发方式将难以适应边缘计算灵活的应用环境。为了解决工业互联网环境的可编程性,需要设计出具有高度抽象性的编译平台,开发者能够使用统一的

语言进行编程,然后根据不同的设备类型自动适配不同的硬件系统。

2)互操作性。边缘节点的互操作性是指不同的系统和组织机构之间相互合作、协同工作(即互操作)的能力。从目前来看,由于边缘设备网络接入、承载技术的差异,边缘计算系统对可拓展性、伸缩性提出了更高的要求,不同设备制造厂商之间需要通过制定相关的标准通信接口规范和合作协议,来实现异构边缘设备之间、设备和系统之间的互操作性。传统的操作模式和交互方式难以满足当下异构复杂的工业互联网环境的需求,边缘设备之间的互操作性已经成为制约工业互联网边缘计算系统能否大规模落地的前提和关键。

3)可拓展性。近年来,随着工业自动化程度的不断提高,越来越多的工业互联网基础设施开始逐渐投入工业生产过程,这势必要求工业互联网边缘计算系统具有较高的灵活性与可拓展性。云计算场景下的编排器并不能完美适用于边缘计算网络中多样复杂的拓扑环境,如何处理好边缘计算系统的可拓展性将成为制约工业互联网企业发展的重要因素。

## 6.2 边缘网络的安全性

1)基础设施易受到攻击。边缘计算实现了网络边缘侧的传感器、智能终端与核心主干网络的互联。然而,边缘设备通常由于资源受限,难以部署完整、可靠的安全策略,在受到恶意攻击时,容易产生单点故障。破坏者可以选择从任一有安全漏洞的物联网设备入手,对整个互联网生态进行破坏和污染、篡改和伪造数据,进而导致整个系统安全防线瘫痪。

2)网络边缘侧信任机制。信任是安全通信的前提,工业互联网边缘的智能设备种类繁多,设备间的通信方式也各有差异,传统的信任机制已经不再适用。以离散制造业为例,当产品的零部件由多个不同厂商生产时,由于通信接口与协议的差异,如何建立安全可靠的信任和认证机制,将成为制约产业链发展的重要因素。此外,由于边缘网络的动态性,授权实体并不完全可靠<sup>[55]</sup>,系统需要具备识别和监控能力,仅仅依靠传统数字签名或口令机制,难以保证边缘网络的安全通信。因此,在异构的边缘网络中建立合理的信任机制显得尤为重要。

3)边缘数据的安全性难以保障<sup>[56-57]</sup>。工业互联网汇聚的数据通常具有高度的隐私性与机密性<sup>[58]</sup>,边缘计算虽可以在工业网络边缘完成部分数据处理与计算任务,避免了敏感数据在较长物理链路传输过程中泄露的风险<sup>[59]</sup>,但是由于其分布式的计算架构与固有的设备异构性,使其更容易成为木马、恶意软件攻击的目标。对于资源受限的边缘节点而言,现有的安全策略并不能完美适配边缘计算架构,需要重新制定更加安全的保护方案与防护措施。

## 6.3 边缘系统资源管理

1)数据管理。随着工业传感器数量的爆发式增长,边缘计算网络每时每刻都在产生海量的计算数据。面对多样化异构的数据,如何对其进行高效清洗、汇聚、分析和存储成为亟待解决的问题。在信息汇聚的过程中,过早或者过晚处理数据都会导致有用信息的损失(过早处理会导致对问题产生片面的分析,缺乏全局性;过晚处理会让信息丧失时效性)。此外,数据的规模越大,提取数据中的有用信息难度也会相应增

加,这对于实时性要求很高的工业互联网边缘计算系统来说,无疑增添了新的挑战。

2)资源管理。资源管理是工业互联网边缘计算系统中的另一关键问题,云计算模式下,由于服务器集中集群式部署,资源调度与分配统一由中央处理器负责,计算资源比较充裕,资源管理方案相对简单。然而,在边缘计算环境下,由于节点内计算资源受限和节点间计算能力的差异,系统需要充分利用边云协同、边边协同等架构模式的优势,以整合闲置的计算资源,从而实现系统效益最大化。在这些应用场景下,计算资源分配和负载均衡问题异常复杂,云计算模式中的资源管理机制通常很难匹配边缘计算生产环境。此外,由于边缘计算固有的分布式特性,网络中的资源具有稀疏性和离散性<sup>[60]</sup>(边缘服务器与设备节点的分布通常与工业环境部署相关)等特征,如何整合离散分布的计算、存储资源,并让其发挥效用,以支持动态、智能的分布式资源管理,已经成为工业互联网边缘计算系统迫切需要解决的问题。

**结束语** 工业互联网建设是智能制造等相关产业实现高质量发展的重要支撑,是国家拓展数字经济发展空间、应对全球产业竞争的必然选择。目前,全球工业互联网程度越来越高,网络边缘接入的设备越来越多,核心网络流量呈现爆发式增长趋势,边缘计算技术的引入可以有效应对这一问题。边缘计算推动了包括智慧城市、公共安全、智能制造、智慧交通在内的多个领域的发展,已经逐渐成为推动工业互联网产业转型和服务升级的关键使能技术。

本文首先介绍了工业互联网的发展历程,强调了工业互联网建设对世界各国发展的重大意义。随后论述了边缘计算的相关概念、发展历程以及工业互联网边缘计算系统参考架构,分析了在工业互联网系统应用边缘计算技术的优势和关键需求。为了使边缘计算能够更好地服务于工业互联网系统,本文详细介绍了推动工业互联网边缘计算系统发展的关键技术,如5G通信技术、计算卸载技术、工业SDN、网络功能虚拟化、网络切片和人工智能技术,并以离散制造业、智能交通、智慧工厂和消防监控为应用案例,分析了边缘计算技术在这些领域的应用及进展。最后从边缘设备管理、边缘网络的安全性和边缘系统的资源管理3个方面总结了工业互联网边缘计算系统的现状与挑战。

## 参 考 文 献

- [1] Ministry of Industry and Information Technology. Industrial Internet Industry Application Promotion Association [EB/OL]. <http://www.miit.gov.cn/n973401/n5993937/n5993953/c7883868/content.html>.
- [2] Ministry of Industry and Information. The Industrial Internet Logo Analysis Laboratory became the first batch of industry alliance laboratories [EB/OL]. <http://www.miit.gov.cn/n973401/n5993937/n5993953/c8017365/content.html>.
- [3] Industrial Internet Industry Alliance. Industrial Internet Platform White Paper (2017) [EB/OL]. <http://www.aii-alliance.org/bps/20200302/858.html>.
- [4] REN J, YU G, HE Y, et al. Collaborative cloud and edge computing for latency minimization[J]. IEEE Transactions on Vehicu-



- lar Technology, 2019, 68(5): 5031-5044.
- [5] ZHANG J, CHEN B, ZHAO Y, et al. Data security and privacy-preserving in edge computing paradigm: Survey and open issues [J]. IEEE Access, 2018, 6: 18209-18237.
  - [6] ZHAO M. Overview of Edge Computing Technology and Application[J]. Computer Science, 47(6A): 268-272.
  - [7] SATYANARAYANAN M, BAHL P, CACERES R, et al. The case for vm-based cloudlets in mobile computing[J]. IEEE pervasive Computing, 2009, 8(4): 14-23.
  - [8] BONOMI F, MILITO R, ZHU J, et al. Fog computing and its role in the internet of things[C]//Proceedings of the First Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing. 2012: 13-16.
  - [9] Hu Y C, PATEL M, SABELLA D, et al. Mobile edge computing—A key technology towards 5G [J]. ETSI White Paper, 2015, 11(11): 1-16.
  - [10] SHI W, CAO J, ZHANG Q, et al. Edge computing: Vision and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(5): 637-646.
  - [11] OpenEdge. OpenEdge architecture [EB/OL]. <https://openedge.tech/zh/>.
  - [12] Edge Computing Industry Alliance (ECC) and Industrial Internet Industry Alliance (AII). Edge Computing IT Infrastructure White Paper 1. 0 [EB/OL]. <http://www.eccconsortium.org/Lists/show/id/375.html>.
  - [13] China Mobile 5G Joint Innovation Center. Blockchain+Edge Computing Technology White Paper [EB/OL]. [http://pg.jrj.com.cn/acc/Res/CN\\_RES/INDUS/2020/7/2/57f00099-d938-48e0-8f57-3276236af94b.pdf](http://pg.jrj.com.cn/acc/Res/CN_RES/INDUS/2020/7/2/57f00099-d938-48e0-8f57-3276236af94b.pdf).
  - [14] SHAFI M, MOLISCH A F, SMITH P J, et al. 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(6): 1201-1221.
  - [15] Cisco. Cisco annual internet report (2018—2023) white paper [EB/OL]. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>.
  - [16] QIU T, CHI J, ZHOU X, et al. Edge Computing in Industrial Internet of Things: Architecture, Advances and Challenges[J]. IEEE Communications Surveys Tutorials, 2020, 22(4): 2462-2488.
  - [17] CHEN X, JIAO L, LI W, et al. Efficient multi-user computation offloading for mobile-edge cloud computing [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2015, 24(5): 2795-2808.
  - [18] XIA Y N, MA Y Y, XIAO X, et al. Research review on the current situation of mobile edge computing technology and several key issues[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition). 2019, 18(2): 17-29.
  - [19] NING Z, DONG P, WANG X, et al. Deep reinforcement learning for intelligent Internet of vehicles: An energy-efficient computational offloading scheme[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications, 2019, 5(4): 1060-1072.
  - [20] XU X, ZHANG X, GAO H, et al. BeCome: Blockchain-enabled computation offloading for IoT in mobile edge computing[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 16(6): 4187-4195.
  - [21] SUN C, HUI L, LI X, et al. Task Offloading for End-Edge-Cloud Orchestrated Computing in Mobile Networks[C]//2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2020: 1-6.
  - [22] KREUTZ D, RAMOS F M, VERISSIMO P E, et al. Software-defined networking: A comprehensive survey[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 103(1): 14-76.
  - [23] XIA W, WEN Y, FOH C H, et al. A survey on software-defined networking[J]. IEEE Communications Surveys Tutorials, 2014, 17(1): 27-51.
  - [24] BAKTIR A C, OZGOVDE A, ERSOY C J I C S, et al. How can edge computing benefit from software-defined networking: A survey, use cases, and future directions[J]. IEEE Communications Surveys Tutorials, 2017, 19(4): 2359-2391.
  - [25] CHENG X, WU Y, MIN G, et al. Network function virtualization in dynamic networks: A stochastic perspective [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(10): 2218-2232.
  - [26] MIJUMBI R, SERRAT J, GORRICO J L, et al. Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges[J]. IEEE Communications surveys tutorials, 2015, 18(1): 236-262.
  - [27] YI B, WANG X, LI K, et al. A comprehensive survey of network function virtualization[J]. Computer Networks, 2018, 133: 212-262.
  - [28] COSTA-REQUENA J, SANTOS J L, GUASCHV F, et al. SDN and NFV integration in generalized mobile network architecture [C]//2015 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). 2015: 154-158.
  - [29] LYU Z, XIU W J I I O T J. Interaction of edge-cloud computing based on SDN and NFV for next generation IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019.
  - [30] QIAO X, REN P, DUSTDAR S, et al. A new era for web AR with mobile edge computing [J]. IEEE Internet Computing, 2018, 22(4): 46-55.
  - [31] ZAHOOOR S, JAVAID S, JAVAID N, et al. Cloud-fog-based smart grid model for efficient resource management[J]. Sustainability, 2018, 10(6): 2079.
  - [32] KALOXYLOS A J I C S M. A survey and an analysis of network slicing in 5G networks[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2018, 2(1): 60-65.
  - [33] ORDONEZ-LUCENA J, AMEIGEIRAS P, LOPEZ D, et al. Network slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, architectures, and challenges [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(5): 80-87.
  - [34] WANG X F. Smart Edge Computing: A Bridge from the Internet of Everything to the Empowerment of Everything[J]. People's Forum • Frontiers of Academic Research, 2020(9): 4-17.
  - [35] WANG X, HAN Y, LEUNG V C, et al. Convergence of edge computing and deep learning: A comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys Tutorials, 2020, 22(2): 869-904.
  - [36] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks[C]//Ad-

vances in Neural Information Processing Systems. 2012; 1097-1105.

[37] YANG J,ZHANG J,MA C,et al. Deep learning-based edge caching for multi-cluster heterogeneous networks [J]. Neural Computing Applications,2019;1-12.

[38] YANG Y,CHEN X,CHEN Y,et al. Green-Oriented Offloading and Resource Allocation by Reinforcement Learning in MEC [C]//2019 IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT). 2019;378-382.

[39] ZHANG H,CHEN S,ZOU P,et al. Research and Application of Industrial Equipment Management Service System Based on Cloud-Edge Collaboration[C]//2019 Chinese Automation Congress (CAC). 2019;5451-5456.

[40] LI X,WAN J,DAI H-N,et al. A hybrid computing solution and resource scheduling strategy for edge computing in smart manufacturing [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019,15(7):4225-4234.

[41] SANKARANARAYANAN S,RODRIGUES J J,SUGUMARAN V,et al. Data Flow and Distributed Deep Neural Network based low latency IoT-Edge computation model for big data environment[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence,2020,94:103785.

[42] CONTRERAS-CASTILLO J,ZEADALLY S,GUERRERO-IBÁÑEZ J A J I I O T J. Internet of vehicles:architecture, protocols,and security[J]. IEEE internet of things Journal,2017, 5(5):3701-3709.

[43] SOUZA A M D,OLIVEIRA H F,ZHAO Z,et al. Enhancing Sensing and Decision-Making of Automated Driving Systems With Multi-Access Edge Computing and Machine Learning[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine,2020,PP(99).

[44] LIU S,LIU L,TANG J,et al. Edge computing for autonomous driving: Opportunities and challenges [J]. Proceedings of the IEEE,2019,107(8):1697-1716.

[45] YANG S R,SU Y J,CHANG Y Y,et al. Short-Term Traffic Prediction for Edge Computing-Enhanced Autonomous and Connected Cars[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019,68(4):3140-3153.

[46] WANG Z,GAO Y,FANG C,et al. Optimal control design for connected cruise control with edge computing,caching,and control[C]//IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). 2019;1-6.

[47] Cisco. 2020 Global Networking Trends Report [EB/OL]. [https://www.cisco.com/c/m/en\\_us/solutions/enterprise-networks/networking-report.html#](https://www.cisco.com/c/m/en_us/solutions/enterprise-networks/networking-report.html#).

[48] CARDARELLI E,DIGANI V,SABATTINI L,et al. Cooperative cloud robotics architecture for the coordination of multi-AGV systems in industrial warehouses[J]. Mechatronics,2017, 45:1-13.

[49] CHEN Y D. Industrial Application Based on Edge Computing: Automatic Guided Car Control System[J]. Computer Integrated Manufacturing System,2019,25(12):3191-3198.

[50] DING K,CHEN D S,WANG Y,et al. Smart Factory Industrial Internet of Things Architecture and Autonomous Production Control Technology Based on Cloud-Edge Collaboration[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2019, 25 (12): 3127-3138.

[51] People’s Daily Online. 2019 National Fire Report [EB/OL]. <http://society.people.com.cn/n1/2020/0111/c1008-31544259.html>.

[52] LONG C,CAO Y,JIANG T,et al. Edge computing framework for cooperative video processing in multimedia IoT systems[J]. IEEE Transactions on Multimedia,2017,20(5):1126-1139.

[53] WU X,DUNNE R,ZHANG Q,et al. Edge computing enabled smart firefighting: opportunities and challenges[C]// Proceedings of the Fifth ACM/IEEE Workshop on Hot Topics in Web Systems and Technologies. 2017;1-6.

[54] ZHANG Q,ZHANG Q,SHI W,et al. Distributed collaborative execution on the edges and its application to amber alerts[J]. IEEE Internet of Things Journal,2018,5(5):3580-3593.

[55] XIAO Y,JIA Y,LIU C,et al. Proceedings of the IEEE [J]. 2019,107(8):1608-1631.

[56] ROMAN R,LOPEZ J,MAMBO M J F G C S. Mobile edge computing,fog et al. : A survey and analysis of security threats and challenges[J]. Future Generation Computer Systems,2018,78: 680-698.

[57] MUKHERJEE M,MATAM R,SHU L,et al. Security and privacy in fog computing: Challenges[J]. IEEE Access, 2017, 5: 19293-19304.

[58] LYU L,NANDAKUMAR K,RUBINSTEIN B,et al. PPFA: Privacy preserving fog-enabled aggregation in smart grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2018,14(8):3733-3744.

[59] SHI W,DUSTDAR S J C. The promise of edge computing[J]. Computer,2016,49(5):78-81.

[60] HONG C H,VARGHESE B J A C S. Resource management in fog/edge computing: a survey on architectures, infrastructure, and algorithms [J]. ACM Computing Surveys, 2019,52(5): 1-37.



**LI Hui**, born in 1997, postgraduate. His main research interests include Internet of things, edge computing, cloud computing and deep learning.



**CHENG Lu-xi**, born in 1988, Ph.D. His main research interests include Internet of vehicles, big data, edge computing and cloud computing.