

# 边缘计算技术发展对策研究

洪学海<sup>1,2</sup>, 汪洋<sup>2</sup>

(1. 中国科学院计算技术研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院计算机网络信息中心, 北京 100190)

**摘要:** 边缘计算是一项正在兴起的技术, 通过把计算、存储、带宽、应用等资源放在网络的边缘侧, 以便减小传输延迟和带宽消耗。同时, 应用开发者和内容提供商可以根据实时的网络信息提供可感知的服务。移动终端、物联网等设备为计算敏感型的应用提供了必要的前端处理支撑, 例如图像识别、网络游戏等应用, 以利用边缘计算的处理能力分担云端工作负荷。本文介绍了边缘计算的概念、需解决的关键问题、主要研究进展, 边缘计算发展带来的影响以及边缘计算带来的机遇和发展对策。

**关键词:** 云计算; 边缘计算; 雾计算; 移动边缘计算; 物联网; 前端智能

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A

## Edge Computing Technology: Development and Countermeasures

Hong Xuehai<sup>1,2</sup>, Wang Yang<sup>2</sup>

(1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Edge computing is an emerging technology that reduces transmission delays and bandwidth consumption by placing computing, storage, bandwidth, applications, and other resources on the edge of the network. Moreover, application developers and content providers can provide perceptible services based on real-time network information. Mobile terminals, Internet of things, and other devices provide the necessary front-end support for computing sensitive applications, such as image recognition and network games, to share the cloud work load with the processing capability of edge computing. This paper discusses the concept of edge computing, key problems that require solutions, main advances in edge computing, influence of edge computing developments, and opportunities and development countermeasures of edge calculation.

**Keywords:** cloud computing; edge computing; fog computing; mobile edge computing; internet of things; front-end intelligence

### 一、边缘计算的概念

“云、网、端”基本功能的最初设想是, 在云端有一个异常强大的数据中心, 负责数据处理, 网

络端负责数据传输, 而物联网各个节点端负责采集数据, 并通过网络交给云端, 云端再根据数据分析并做决策后再把结果返还给终端。在这种模型中, 云端负责智能计算, 而终端节点负责数据采集以及

收稿日期: 2018-04-18; 修回日期: 2018-04-20

通讯作者: 洪学海, 中国科学院, 研究员, 主要研究方向为高性能计算、云计算和信息技术与信息化战略研究等; E-mail: hxx@ict.ac.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“‘互联网+’行动计划的发展战略研究”(2016-ZD-03); 国家自然科学基金项目(91646127); 中国科学院文献情报能力建设专项——院所协同项目(ICP2017-16)

本刊网址: www.enginsci.cn

决策执行。

然而，这样的设想在实际执行中遇到了不少困难。第一个困难来源于数据传输的开销。物联网节点通常都使用无线网络与云端做数据传输，而如果物联网节点把不加任何处理的原始数据全部传到云端，会导致带宽需求爆炸，网络基础架构没法支撑如此高的带宽需求；开销的另一部分是无线传输的功耗，如果把数据不加任何处理全部传输到云端，那么终端节点的无线传输模块必须支持高速无线传输，这就意味着无线模块需要很大的功耗，与物联网节点低功耗的设想不符。第二个困难在于网络延迟。许多节点执行的任务对于延迟非常敏感，例如，无人驾驶、增强现实技术 / 虚拟现实技术（AR/VR）应用等，在这些应用中由于网络传输带来的延迟（几十毫秒以上，有时候网络信号不好会带来数秒的延迟甚至掉线）使任务无法被接受。针对这些问题，边缘计算技术应运而生。

但是，对于边缘计算的概念，目前还没有一个严格的定义。目前认为的边缘计算的物理边界，如图 1 所示。

施魏松等 [1] 定义的边缘计算是指在网络的边缘执行计算的一种新型计算模式，包含下行的云服务和上行的万物互联服务。我国边缘计算产业联盟（ECC）定义的边缘计算是指在靠近物或数据源头的网络边缘侧，融合网络、计算、存储、应用核心

能力的开放平台，就近提供边缘智能服务，满足行业数字在敏捷联接、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。对于边缘计算，无论是上行互联还是下行云服务以及融合业务计算，其核心理念是“计算应该更靠近数据的源头，可以更贴近用户”，以及将智能计算的任务前置到物端，而不仅仅在云端。在边缘计算概念出现之前，还出现过海云计算、雾计算 [2] 以及近来比较热的移动边缘计算等概念，本质上这些概念描述的应该是同一个问题，即克服云计算和云服务的重负载、长时延、安全隐患等问题，并与云计算和云服务互为补充，靠近用户和数据源，并提供智能计算前置的一种新型计算模型。因此，边缘计算是继分布式计算、网格计算、云计算之后的又一新型计算模型。作者认为边缘计算是以云计算为核心，以现代通信网络为途径，以海量终端为感知前端，通过优化资源配置，使得计算、存储、传输、应用等服务更智能，具备优势互补、深度协同的资源调度能力，是集云、网、端、智四位一体的新型计算模型。

## 二、发展边缘计算要解决的关键问题

在边缘计算中，终端节点不再是完全不负责计算，而是做一定量的计算和数据处理，之后把处理

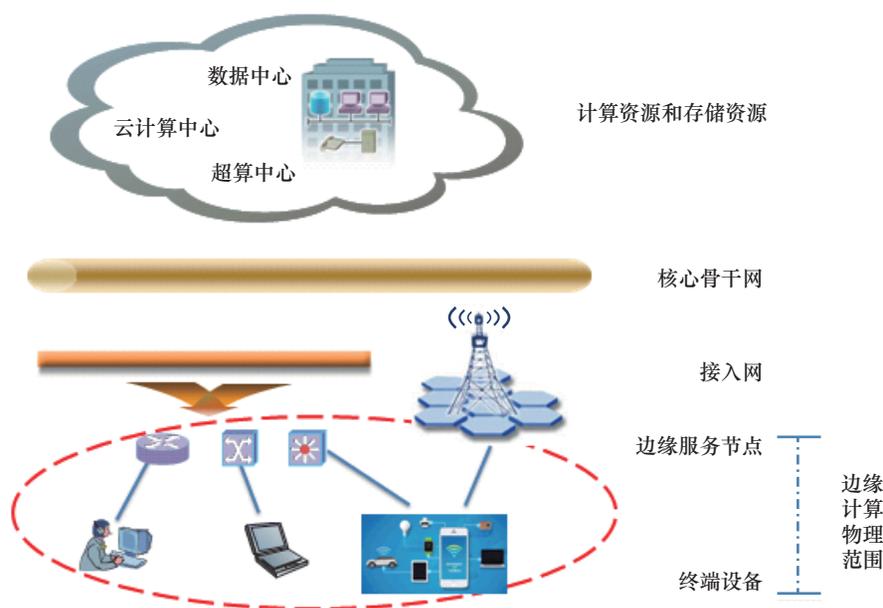


图 1 边缘计算的物理边界

过的数据再传递到云端。这样一来网络延迟和带宽的问题可以解决，因为计算在本地，而且处理过的数据一定是从原始数据中进行过精炼的数据，所以数据量会小很多。当然，具体要在边缘做多少计算也取决于计算功耗和无线传输功耗的折衷——终端计算越多，计算功耗越大，无线传输功耗通常就可以更小，对于不同的系统存在不同的最优值。此外，由于物端数据不是全部都通过网络传输到云端，在某些数据比较敏感的应用场景下，数据安全也得到一定的保障。因此，对于边缘计算，需要解决以下几个主要问题。

#### （一）边缘计算的体系结构问题

目前的雾计算、海云计算、三元计算以及移动边缘计算等，本质上是属于边缘计算的一种形式，它涵盖物联网、移动蜂窝网、车联网、互联网、移动互联网等众多领域，是IT资源设施的优化配置解决方案，包括计算、存储、网络、软件、输入输出（IO）等资源，是算法上的改进、算力上的优化、数据的重新布局。但是由于边缘计算直接应对网络的边缘侧众多的应用场景和应用模式，因此，除研究通用的体系结构来应对这些复杂的应用场景和应用模式之外，还需要针对不同的应用场景和应用模式设计具体的体系结构，如雾计算的体系结构、移动边缘计算的体系结构等，并以此来规划计算、存储、网络、软件等资源的配置，使得具体应用性能、功耗、安全等最优化。

#### （二）边缘计算物端设备的处理器能力问题

在不同的应用场景下，对边缘计算物端的处理器的能力、功耗等需求不同。有的边缘计算是以物端控制为目的的应用，对运算能力需求相对较弱。而有的边缘计算应用是就近物端处理数据，以减少数据网络传输、降低网络延迟和实时信息处理为目的的应用，如高清视频监控等，数据需要就近处理，这对物端计算处理器的运算能力要求相对较高。因此，对边缘计算设备的处理器能力需要针对不同的应用场景，配置相应能力的物端设备处理器。

#### （三）边缘计算的算法与内存设计问题

边缘计算的一个重要的应用场景是将在云端的智能处理能力延展到物端，即计算智能前置。但现

在主流的深度神经网络处理算法程序大小通常为几兆字节甚至几百兆字节，这就给物端计算节点的处理器和内存配置带来了挑战。因为物端计算的处理器和内存一般不可能配置较大的处理器和内存，因此需要进行算法模型的压缩和智能处理算法硬IP化，并配置到物端处理器上。同样需要进一步考虑如果算法无法把模型做到很小，就需要考虑内存内计算（in-memory computing）。

#### （四）边缘计算与云计算的能力资源协同问题

云计算是中心化的计算模式，而边缘计算本质上是去中心化的计算模式。但云计算与边缘计算并不是完全对立的计算架构。在一些应用场景中，运用边缘计算在网络边缘端做数据预处理后再传输到云端，在云端再进行深入大规模分析，使两者各展所长。作为与云计算相互补充和相伴相生的边缘计算，其能力的实现必须与云计算进行有效的协同，才能真正实现边缘计算的目的。在云计算和边缘计算协同的过程中，两者在数据全生命周期中，在哪个阶段进行协同、计算负载如何适度分配、任务如何调度、云端和边缘物端设备协同的协议如何定义等方面，目前还没有一个很好的、统一的模型。

#### （五）边缘计算的系统安全问题

由于边缘计算与物联网、移动互联网、互联网的天然联接，因此必然存在系统安全方面的问题。但由于边缘计算的物端计算一般是能力相对比较弱小的计算系统，它不能像常规的计算系统一样采取多层、多种安全保障措施。有的边缘计算是直接应用于系统控制，其安全问题显得尤其重要，因此，边缘计算系统的系统安全问题研究是一个新的课题。

### 三、边缘计算技术研究主要进展

当前，边缘计算的研究主要集中在移动边缘网络、雾计算、小云（cloudlets）、边缘云、体系结构等方面。美国韦恩州立大学施魏松教授是国内外边缘计算研究的引领者，他从边缘计算基础、边缘计算系统平台和典型应用等多个方面对边缘计算技术的研究给予了描述。文献[3]从融合计算、缓存、通信角度对移动边缘网络做了介绍，文献[4]

介绍了从云计算向用户侧推进的小云计算模型，从雾计算概念角度研究较多，文献 [5] 主要讨论了雾计算在物联网中所扮演的重要角色，文献 [6] 介绍了如何通过雾计算来降低云计算的能耗，文献 [7] 主要探讨了雾计算是否是云计算发展的未来，文献 [8] 主要介绍了雾计算的概念、应用及面临的问题，文献 [9,10] 主要讨论雾计算的安全、隐私和管控方法，文献 [11] 介绍了雾计算平台及其上层应用。文献 [12] 介绍了边缘计算在扩展企业应用到网络边缘发挥的作用，其延迟、效能分析在文献 [13] 中做了介绍。文献 [14] 介绍了边缘计算的兴起、定义、体系结构、研究领域、技术挑战等方面内容。此外，ECC 也在边缘计算的定义、体系结构、产业生态等方面进行了论述。移动边缘计算是迈向 5G 的关键技术之一 [15]，更是一种针对大规模物联网应用的新型编程模型 [16]，文献 [17] 对相关技术做了较为详细的描述。总结来看，这些研究进展集中表现在如下几个方面。

### （一）定义清楚了通用的边缘计算的体系结构

雾计算和边缘计算各有侧重，但本质上描述的是同一类计算模型。当前的研究是将通用的边缘计算体系结构从横向与纵向两个维度定义，即纵向是基础设备层、统一接口层、应用服务层；横向包括动态智能、安全保障、运维管控等。

（1）基础设备层：主要涵盖数以亿计的异构智能终端设备，它们分布在网络的边缘侧，靠近用户。基础设备层是计算、存储、带宽、缓存等资源调配的资源池，为边缘用户提供服务的边缘基础设施。

（2）统一接口层：众多的智能设备存在异构问题，想要高效利用这些资源，必须进行整合，使得这些资源可以有效地进行管理和统一管理。统一接口层的目标就是消除这些异构，使得基础设备能够按照统一、规范的标准接口实现互联互通，从而可以有效地进行资源协同管理。

（3）应用服务层：靠近应用的服务商，是用户服务得以满足的上层应用和系统程序。其作用为协同各方资源进行按需调配，把负载、应用、服务等任务下发、上传、协同给其他资源提供方，以便满足用户的切实需求。

（4）动态智能层：纵向涵盖以上三个横向层次，该层次的目标是能高效、智能、自动化地对其设备、

接口、应用进行管理和控制，脱离人工的繁琐配置和监管，达到计算的智能化。

### （二）移动边缘计算成为研究重点，并提出了统一的边缘计算参考框架

截至目前，移动边缘计算（MEC）已经发展演进为将来移动宽带网络的关键组成部分。同软件定义网络 / 网络功能虚拟化（SDN/NFV）一道，MEC 将成为下一代移动通信网络的关键技术之一。另外，业界对 MEC 技术所达成的共识为：MEC 是物联网（IoT）及低时延、高可靠等垂直行业通信的关键使能者，在多个行业有着众多应用场景。MEC 还被业界视为第五代移动通信（5G）的关键架构概念与技术之一。目前欧洲电信标准协会（ETSI）定义了 MEC 的计算框架（见图 2），并正在加紧推动 MEC 平台和接口的标准化工作。MEC 平台定义了移动边缘主机、移动边缘平台管理、移动边缘编排、虚拟基础设施管理等功能模块 [18,19]。

（1）通过移动边缘主机模块，实现了移动边缘平台能力开放，虚拟基础设施的数据面转发能力开放和移动边缘应用的部署。

（2）通过移动边缘平台管理模块，实现了移动边缘平台网元管理、移动边缘应用生命周期管理、移动边缘应用规则和需求管理。

（3）通过移动边缘编排模块，实现了移动边缘应用在全局范围内的部署和实例化、标准化。

（4）通过虚拟基础设施管理模块，实现了基础设施的虚拟资源统一分配、管理、配置及虚拟资源性能和故障的收集与上报。

### （三）针对边缘计算的使能技术提出了多种解决方案

针对移动边缘计算使能技术，中国联合通信有限公司提出了具体的解决方案。其提出了边缘计算使能技术的三个方面，分别是云与虚拟化、大容量服务器、启用应用程序和服务生态系统。云和虚拟化技术以及大容量服务器都是对边缘计算硬件的能力要求，而应用程序和服务生态系统是将软件和应用程序供应商引入边缘计算市场，并提供丰富的应用，进而产生一个生态系统，即提供丰富的边缘计算应用的 APP 和提供基于开放标准的各类应用程序编程接口（API）开发的编程模型和相关的工具

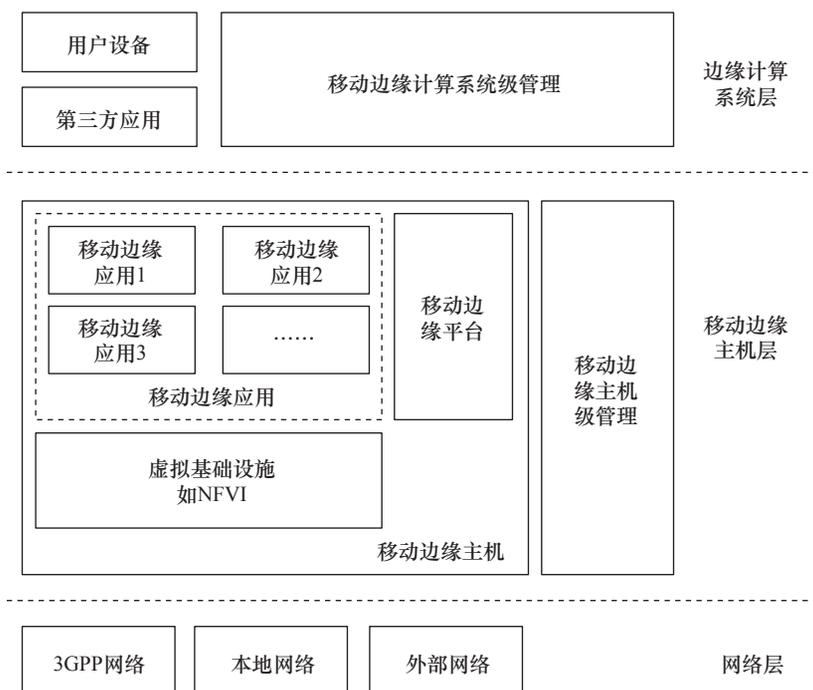


图2 ETSI 定义的 MEC 计算框架图  
注：NFVI: 网络功能虚拟化基础设施解决方案。

链、软件开发包等。

针对边缘计算的物端计算能力方面，现有的思路是针对不同的应用的场景，进行不同的资源配置。以控制为目的的边缘计算，其物端计算节点配置计算能力较弱的微控制单元（MCU）；若对物端计算能力需求较大的一类应用，一种方案是使用新的指令集增加对矢量计算的支持或使用多核做类似单指令多数据流（SIMD）的架构等把 MCU 做强；第二种方案是走异构计算的思路，MCU 还是保持简单的控制目的，计算部分则交给专门的加速器 IP 来完成，目前的人工智能（AI）芯片其实大部分做的就是这样的一个专用人工智能算法加速器 IP。中国科学院计算技术研究所的寒武纪 IP 内嵌在华为手机上即是一例。此外，针对物端计算的内存配置方案也是重点。由于边缘计算的物端计算节点端基于成本、体积和能耗的考量不能加动态随机存取存储器（DRAM），一般用闪存 Flash（同时用于存储操作系统等）作为系统存储器。由于缓存必须在处理器芯片上完成，并且缓存一般较小，算法必须要能把模型做到很小，即“模型压缩”。此外正在研究的内存内计算和使用新型存储器如非易失性的磁性随机存储器（MRAM）、电阻式随机存取存储器（ReRAM）等实现高密度片上内存也将是重要的解决方案。

#### 四、边缘计算技术发展带来的影响

##### （一）边缘云将使云计算中心建设从集中到分散和功能解耦

边缘云是边缘计算在云架构技术体系的表现形式，云计算中心不必把过多的设备统一、集中放到一个区域，而是采用星型结构，多地多中心，把众多的边缘云中心连接起来，这样分布在其他区域的边缘云可以就近为当地用户提供服务，避免过多的带宽消耗、过多的数据传输、过量的访问压力等。这一模式可以均衡负载，缓解资源消耗过高等问题，有效提高运行效率。同时也使得目前的云计算中心功能解耦，即边缘计算可以把基础设施的功能进行有效地划分，每个区域的资源可以专门承担模块化、定制化、单一化的处理任务，降低了应用、数据、服务的耦合度。

##### （二）边缘计算将使计算能力从集中到分散

边缘计算本身是化解云计算压力过大、资源利用不高、可靠性不高、可用性差、带宽资源不足等问题的技术手段，把原本集中式的优势在物联网兴起的新形式下转变成分布式的一种有效途径。因为云计算不能包罗所有的海量智能终端，而且随着边

缘设备计算、存储等能力的增强,原本需要在云侧解决的计算任务,现在在终端侧可以方便地就地解决,这样整体来看计算模型就发生了重大变化,从原来的集中式计算变成了分布式计算。这一趋势将影响信息化建设的若干问题,如云侧的设备投资规模将大大降低、带宽需求降低、存储压力减少等。

### (三) 边缘计算将使 IT 资源从隔离到协同

传统的云计算中心、大数据中心、超算中心等建设规模过于庞大,而且所属用户相互隔离,很难就近使用,这在很大程度上浪费了基础设施投资,资源没有得到充分的利用,浪费了过多的资源。为此,边缘计算可以打破各自为政的信息化建设模式,使得某一组织下的各分支能够互联互通,消除资源孤岛,使得原本隔离的资源可以优势互补、协同计算。

### (四) 边缘计算将使信息系统的安全从单一集中负担到分摊负担

边缘计算建设模式将打破大而全的信息化建设模式,从而很多风险、隐患可以分摊到其他部分,如信息安全。在传统的集中式建设模式下,往往需要安全等级指标,一旦出现问题,整体云计算中心、数据中心将整体受到影响。而边缘计算建设模式可以把这些风险分摊,而且很多数据无需保存到云侧,而是用户自己保存数据,信息泄露的风险将大大降低。

## 五、边缘计算发展的机遇与对策

2017 年 2 月,美国计算机社区联盟(CCC)发布《边缘计算重大挑战研讨会报告》,阐述了边缘计算在应用、架构、能力与服务方面的主要挑战。这些挑战概括起来主要表现在边缘设备的多源、异构、异地性管理、边缘计算的信息服务质量(QoS)保障、边缘端的数据隐私及信息安全保障、云与边缘的分布式协同计算、智能化情景感知能力和统一开放平台等方面。从未来的发展趋势看,物联网、移动互联网、工业互联网的发展将使边缘计算模型逐步打破单一以互联网数据中心(IDC)为中心的云计算模型,并最终形成互补的局面;“云-网-端”基础设施随着海量智能设备在存储、计算、安

全、传输等方面能力的升级,资源配置趋于下沉,与“端”距离更近;边缘计算引起了计算模型“去中心化”的趋势,协同计算将是未来技术的发展方向;海量终端将对人工智能、机器学习等技术产生影响[20],将促进微内核技术的发展,方便算法、模型等嵌入到海量设备的固件当中,使前端智能更具发展前景;边缘计算平台的开放性、通用性、兼容性、交互性、安全性等将是未来需要解决的问题和技术发展趋势[21]。如果这些挑战性的技术问题能够得到突破,将带来“互联网+”发展的新机遇,同样也能够带来产业发展的机遇。无线及移动行业研究机构 iGR 的创始人 Iain Gillott 在 2017 年 9 月 25 日至 27 日举行的全球移动边缘计算大会上表示,边缘计算改变了移动网络的经济形态。据估算,2017—2026 年美国在边缘计算方面的支出将达到 870 亿美元,欧洲则为 1 850 亿美元。因此,为应对新的发展机遇,对我国发展边缘计算技术,建议采取以下对策。

### (一) 加强边缘计算的技术标准和规范建设

边缘计算涉及到海量的终端设备、边缘节点,是数据采集、数据汇聚、数据集成、数据处理的前端,而这些设备往往存在异构性,来自于不同的生产厂商、不同的数据接口、不同的数据结构、不同的传输协议、不同的底层平台等,为此统一的技术规范和标准亟待达成一致。同样这些标准和规范的制定将大大节约边缘云等的建设成本。

### (二) 将边缘计算技术的研发和应用与“互联网+”、云计算、大数据和新一代通信技术等研发计划发展协同起来

边缘计算是与云计算相生相伴的一种技术,并且与大数据、5G 通信和智能信息处理技术等高度联接。因此,我国在制定相关研发计划的时候,要将边缘计算技术和应用的研发活动纳入进去,加快相关核心技术的研发,加快和提升边缘计算技术的成熟度。

### (三) 加强边缘计算的开源生态建设

边缘计算本身由海量的终端设备构成,而众多智能终端可采用统一的开源操作系统,以便形成开源生态环境,这一趋势将会给各厂商提供均等的发

展机会, 利用开源生态来维持核心代码, 以便形成业界认可的技术接口、关键功能、发展路径等。

参考文献

- [1] 施魏松, 刘芳. 边缘计算 [J]. 北京: 科学出版社, 2018.  
Shi W S, Liu F. Edge computing [J]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2018.
- [2] Mung C, Bharath B. 雾计算: 技术、架构及应用[M]. 闫实, 彭木根, 译. 北京: 机械工业出版社, 2018.  
Mung C, Bharath B. Fog computing: Technology, architecture and applications [M]. Translate by Yan S, Peng M G. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [3] Wang S, Zhang X, Zhang Y, et al. A survey on mobile edge networks: Convergence of computing, caching and communications [J]. IEEE Access, 2017, 5(99): 6757–6779.
- [4] Verbelen T, Simoens P, Turck F D, et al. Cloudlets: Bringing the cloud to the mobile user [C]. ACM: ACM Workshop on Mobile Cloud Computing and Services, 2012: 29–36.
- [5] Bonomi F, Milito R, Zhu J, et al. Fog computing and its role in the internet of things [C]. ACM: MCC Workshop on Mobile Cloud Computing, 2012: 13–16.
- [6] Fatemeh J, Kerry H, Robert A, et al. Tucker, “fog computing may help to save energy in cloud computing” [J]. IEEE Journal of Selected Areas in Communications, 2016, 34(5): 1728–1734.
- [7] Firdhous M, Ghazali O, Hassan S. Fog computing: Will it be the future of cloud computing?[C]. The Third International Conference on Informatics & Applications (ICIA2014), 2014.
- [8] Yi S, Li C, Li Q. A survey of fog computing: Concepts, applications and issues [C]. ACM: The 2015 Workshop on Mobile Big Data, 2015: 37–42.
- [9] Dsouza C, Ahn G J, Taguinod M. Policy-driven security management for fog computing: Preliminary framework and a case study [C]. Information Reuse and Integration (IRI), 2014 IEEE 15th International Conference on IEEE, 2014: 16–23.
- [10] Yi S, Qin Z, Li Q. Security and privacy issues of fog computing: A survey [C]. WASA, 2015: 685–695.
- [11] Yi S, Hao Z, Qin Z, et al. Fog computing: Platform and applications [C]. Hot Topics in Web Systems and Technologies (HotWeb), 2015 Third IEEE Workshop on IEEE, 2015: 73–78.
- [12] Davis A, Parikh J, Wehl W E. Edge computing: Extending enterprise applications to the edge of the internet [C]. ACM: The 13th International World Wide Web Conference on Alternate Track Papers & Posters, 2004: 180–187.
- [13] Malandrino F, Kirkpatrick S, Chiasserini C F. How close to the edge? delay/utilization trends in MEC [C]. ACM: ACM Workshop on Cloud-Assisted Networking, 2016:37–42.
- [14] Shi W S, Cao J, Zhang Q, et al. Edge computing: Vision and challenges [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(5): 637–646.
- [15] 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.
- [16] Hong K, Lillethun D, Ramachandran U, et al. Mobile fog: A programming model for large-scale applications on the internet of things[C]. ACM: The Second ACM SIGCOMM Workshop on Mobile Cloud Computing, 2013: 15–20.
- [17] Patel M, Naughton B, Chan C, et al. *Mobile-edge computing introductory technical white paper* [R]. Mobile-Edge Computing (MEC) Industry Initiative, 2014.
- [18] 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2.0》白皮书 [R]. 边缘计算产业联盟, 工业互联网产业联盟, 2017.  
Edge Computing Consortium, Industrial Internet Industry Alliance. *Edge Computing Reference Architecture 2.0 white paper* [R]. Edge Computing Consortium, Industrial Internet Industry Alliance, 2017.
- [19] 吕华章, 陈丹, 范斌, 等. 边缘计算标准化进展与案例分析 [J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(3): 487–511.  
Lv H Z, Chen D, Fan B, et al. Standardization progress and case analysis of edge computing [J]. Journal of Computer Research and Development, 2018, 55(3): 487–511.
- [20] 周宣汝, 赵丽亚, 赵地, 等. 人工智能对科研信息化的推动作用 [J]. 科研信息化技术与应用, 2016, 7(6): 14–26.  
Zhou X R, Zhao L Y, Zhao D, et al. The promotion effects of artificial intelligence on e-science [J]. E-Science Technology & Application, 2016, 7(6): 14–26.
- [21] 杨萃, 袁博, 田野, 等. 基于物联网标识的智能家居服务体系架构设计 [J]. 科研信息化技术与应用, 2015, 6(1): 80–88.  
Yang C, Yuan B, Tian Y, et al. A smart home architecture based on Internet of things identifier [J]. E-Science Technology & Application, 2015, 6(1): 80–88.