

第 1 章

边缘计算综述

随着智能设备的快速普及和物联网技术的迅猛发展,许多新兴应用(如虚拟现实、元宇宙、超高清视频和自动驾驶)对网络算力提出了越来越高的要求。为了向用户提供高质量的计算服务,研究者们对传统的云计算模式进行了拓展,提出了边缘计算的概念。本章将对边缘计算进行概述,内容包括边缘计算的兴起、边缘计算的定义、边缘计算框架及边缘计算的发展现状。

1.1 边缘计算的兴起

1.1.1 时代背景

随着智能社会的发展和人们对算力需求的不断提高,智能化已经渗透社会各个行业和人们的日常生活。边缘设备已经延伸到社会的各个方面,如智能家居、智慧汽车、智能摄像头、智能机器人、智能穿戴设备等。据思科(中国)有限公司估计,到 2025 年,物联网设备的数量可能超过 750 亿台,这些设备产生的数据量是 2020 年产生的数据量(即 310 亿)的 2.5 倍^[1],根据国际数据中心预测,全球网络数据流量将从 2018 年的 33 泽字节(zetta byte, ZB)增长到 2025 年的 175 泽字节。对上述数据进行处理势必需要消耗大量算力,然而,受限于设备自身体积和制造成本,现有的移动终端难以提供令人满意的计算和存储服务。因此,移动设备有限的算力已经成为制约工业智能、医疗保健及自动驾驶等新兴应用落地的瓶颈之一。

此外,各式各样的物联网设备配备了先进但是异质性的传感器,用以满足各种对时延和服务质量敏感的物联网应用,如虚拟现实、超高清视频和无人驾驶车辆(UAV)等。管理这些海量、异质、分布式的物联网设备,并以特定的性能提供服务,需要具有高可用性和弹性的基础设施^[2]。传统的云基础设施无法满足需求,在这样的背景下,边缘计算应运而生。边缘计算作为新的计算架构,将云计算服务下沉到更接近数据源的地方,从而降低了时延和带宽成本,并提高了云计算的弹性和可用性。

1.1.2 发展动机

边缘终端将产生越来越多的数据,因此,提升网络边缘设备的算力能在很大程度上提高数据处理效率。本节总结了关于推动边缘计算发展的重要动机。

(1) **云服务推动**。传统云计算中的计算任务都放在云端,边缘设备将数据统一发送到云端处理后,云端将数据处理的结果回传到边缘设备侧^[3]。然而,随着边缘设备产生的数据量不断增长,网络带宽成为云计算模式发展的一大瓶颈。将所有数据发送到云端进行处理不仅会极大地延长业务处理时间,还会对当前网络带宽的可靠性带来挑战。反之,在边缘侧处理数据不仅可以确保较少的业务时延,减少网络拥塞,还能更好地保护用户数据隐私。

(2) **物联网拉动**。在不久的将来,越来越多的电子设备将被纳入物联网。边缘设备的数量将超过数十亿,边缘侧产生的海量数据如果采用传统云计算架构来处理,将会对网络传输造成极大的压力^[4]。而且这些庞大规模的物联网数据很多没必要进入云端,可直接在网络边缘侧处理。因此,云计算架构无法有效应对物联网的海量数据处理和业务响应需求。首先,云计算处理边缘侧的海量数据必然占用大量传输带宽,容易造成网络拥塞。其次,将边缘数据上传至云端,容易造成数据隐私泄露的风险。最后,边缘设备由于硬件条件有限,大多数物联网终端节点有能源约束,海量数据上传会消耗大量能耗,因此,将一些计算任务下沉到边缘侧将在一定程度上降低数据传输所需要的能耗。

(3) **从数据消费者到生产者的转变**。边缘侧前端设备通常在云计算模式中充当数据消费者,如用手机观看在线视频。但是,随着智能化应用越来越广泛,这些前端设备也开始逐渐扮演数据生产者。从数据消费者转换为数据生产者需要更多外围服务的支持。例如,很多应用允许用户拍照或录制视频,然后通过云服务分享数据,如微博、微信和短视频。然而,传统云计算模式直接上传大分辨率图片或视频片段会占用大量带宽,更合理有效的方法是在边缘设备上传云端前将视频片段调整到合适的分辨率,或者是在本地直接处理。并且,由于边缘设备所收集的数据往往是私有数据,在边缘侧处理数据而不上传到云端可以更好地保护用户隐私^[5]。

(4) **去中心化的云计算和低时延计算**。集中式云计算并不是地理分布式应用的理想策略。为了提高服务质量,越来越多的应用程序供应商将数据处理下沉到靠近数据源的边缘节点上进行^[6]。边缘设备产生海量数据流,在远程的云端处理会影响实时决策的时效性。在实时应用中使用目前的云基础设施会导致边缘设备和云之间出现严重的时延问题,这不符合对时延敏感应用的要求。海量数据同时涌向远程云端极有可能造成网络拥塞,从而影响用户满意度。同样地,多媒体应用也面临类似的时延问题。在这种情况下,将数据处理下沉到靠近用户的边缘节点可以最大限度地减少网络时延。

(5) **边缘设备硬件限制的解除**。与传统云服务器计算和存储资源相比,边缘设备的硬件资源受到一定程度的限制。边缘设备主要分为两种类型:由人携带的设备和放置在环境中的其他设备。这两类边缘设备的主要作用是通过捕捉文本、音频、视频、触摸或运动等形式的感官输入来获得实时数据,然后由云服务来处理传输的数据^[7]。然而,这些设备由于其硬件限制,无法进行复杂的分析。因此,数据往往需要被传输到云端,以满足计算处理要求,并将数据处理结果回传到边缘设备。然而,随着边缘设备计算性能和存储性能的快速提升,更多的数据处理将转移到边缘侧,这种趋势已经日渐明显。

1.1.3 发展历程

云计算(如亚马逊云、谷歌云、阿里云、中国电信天翼云等)通过搭建远程云数据中心(data center, DC)来扩展网络计算、存储和管理能力。云计算的数据中心通常与网络设备相距较远,从而导致网络的时延性能差,且云计算的集中式处理机制会使网络存在单点故障隐患,并且不具备位置感知能力。为满足智能手机、平板计算机、工业机器人等物联网移动设备日益增长的计算密集型应用需求,移动云计算将移动设备与云计算进行整合,其中移动设备通过无线网络按照即付即用的方式,使用云服务提供商的计算和存储等服务,能够缓解移动设备计算能力不足和存储容量有限等问题。然而,移动云计算仍存在由远程集中式数据中心导致的传输时延较长、核心网负载压力较大及回程链路阻塞等问题,无法满足物联网移动设备的低时延应用需求。

边缘计算通过将云计算服务下沉至靠近移动设备的网络边缘侧,解决传统集中式云计算存在的长传输时延问题,并提升数据处理的可靠性和安全性。边缘计算主要分为三种模式:微云、雾计算和移动边缘计算。下面分别加以介绍。

1) 微云

2009年,卡内基梅隆大学的 Mahadev Satyanarayanan 提出了微云的概念^[8],与传统的云计算中心组成了“设备-微云-云计算”三层网络架构。微云作为中间层的边缘计算节点,通过将云计算服务下沉至网络边缘侧,能够为火车站、购物中心等热点区域的移动设备提供计算和存储服务。此外,移动设备主要通过 Wi-Fi 连接至微云,并将其计算任务卸载至微云的虚拟机(virtual machine, VM)执行处理。基于 Wi-Fi 的接入方式对设备的移动性支撑较差,存在 Wi-Fi 网络与蜂窝网络间的切换问题,难以保证移动应用的服务质量(quality of service, QoS)需求。

2) 雾计算

2012年,思科公司将雾计算定义为一种支持垂直行业应用的系统级水平架构^[9],即将数据的计算与存储等功能下沉至数据源与云端间的边缘节点(即雾节点),能够缓解传输至云端进行分析处理导致的负载压力大及时延较高等问题。雾计算中的雾节点可放置的设备比较灵活,可以是交换机、路由器、基站、移动终端等

具备计算处理和存储能力的网络设备。雾计算具有分布式计算与存储能力,可以与云计算形成优势互补,如雾计算处理时延敏感的计算任务,云计算负责计算密集型的计算任务。

3) 移动边缘计算

2014年,欧洲电信标准协会(European Telecommunications Standards Institute, ETSI)提出移动边缘计算技术,即在蜂窝网络的无线接入网(radio access network, RAN)侧提供云计算能力和信息技术(information technology, IT)服务^[10]。通过靠近网络终端的边缘服务器配置,移动边缘计算能够实现高带宽、低时延的无线接入和计算处理。将云计算的数据处理能力部分下沉到移动网络边缘侧的分布式计算方式能够缓解云计算的负载压力和回程阻塞^[11]。移动边缘计算以移动蜂窝网络为部署方式,能够充分利用蜂窝网络的广泛覆盖特性,实现对物联网应用的有效支撑。

1.2 边缘计算架构与基本特征

1.2.1 边缘计算架构

根据ETSI的定义,边缘计算系统主要由终端和边缘服务器构成,其典型系统架构如图1-1所示。边缘计算架构是一种联合网络结构,通过在终端设备和云计算之间引入边缘设备,将云服务下沉到网络边缘。云-边缘协作的结构一般分为终端层、边缘层和云计算层。下面简单介绍一下边缘计算系统架构中各层的构成和功能。

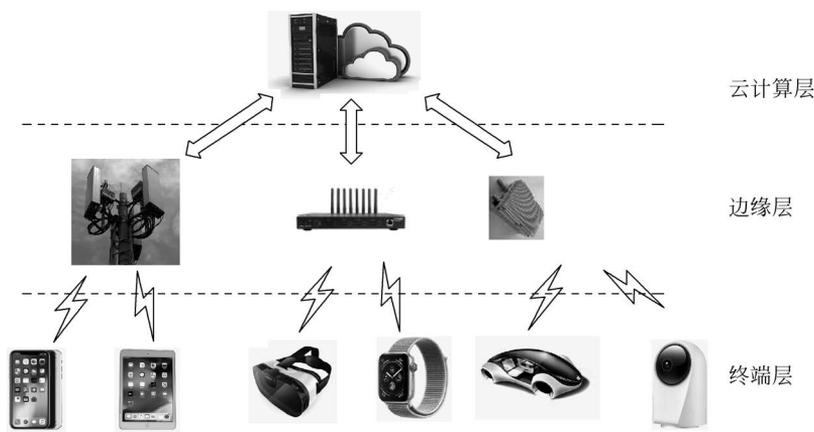


图 1-1 边缘计算系统架构示意图

1) 终端层

终端层由连接到边缘网络的各类设备组成,包括移动终端和物联网设备(如传

感器、智能手机、智能汽车、摄像头等)。在终端层,设备不仅是数据消费者,还是数据提供者。为了减少终端服务时延,只考虑各种终端设备的感知,不考虑计算能力。因此,数以亿计的终端层设备采集各类原始数据并上传到上层,在那里进行存储和计算。

2) 边缘层

边缘层是三层架构的核心,位于网络的边缘,由广泛分布在终端设备和云之间的边缘节点组成。它通常包括基站、接入点、路由器、交换机、网关等。边缘层支持终端设备的向上接入,并存储和计算终端设备上传的数据。与云端连接,将处理后的数据上传到云端。由于边缘层离用户很近,所以数据传输到边缘层更适合实时数据分析和智能处理,比云计算更高效、安全。

3) 云计算层

在云-边缘计算的联合服务中,云计算层仍然是最强大的数据处理中心。云计算层由一些高性能服务器和存储设备组成,具有强大的计算和存储能力,在需要大量数据分析的领域,如定期维护和商业决策支持,可以发挥良好的作用。云计算层不仅可以永久存储边缘层上报的数据,还可以完成边缘计算层无法处理的计算密集型任务和整合全局信息的处理任务。此外,云计算层还可以根据控制策略动态调整边缘计算层的部署策略和算法。

1.2.2 边缘计算的基本特征

由于离用户更近,边缘计算相比于传统云计算在很多方面具有天生的优势。边缘计算的基本特征主要体现为以下几个方面。

1) 邻近性

边缘计算服务器的位置一般很靠近终端设备。近距离的通信不仅可以显著降低服务时延,还可以有效减少终端设备在数据传输过程中的能量消耗。另外,由于终端数据在本地处理,不需要上传到云计算中心,因此可以在很大程度上缓解核心传输网络的拥塞。

2) 隐私保护

边缘计算中的本地化处理策略和分布式部署特性可以有效降低远程数据传输和数据集中化处理导致的隐私泄露风险。不仅如此,用户端还可以根据安全性的要求,对任务的卸载策略进行更加精细化的调整,从而保护自身隐私不被泄露^[12]。

3) 鲁棒性

边缘计算中的本地化处理使得边缘服务器和与之关联的用户形成一个相对独立的子系统。当一个边缘服务器或者某个区域的通信网络出现故障时,其他边缘服务器仍然能够正常工作。和数据中心的单点故障风险相比,边缘计算具有更高的鲁棒性。

4) 位置和上下文感知

边缘服务器利用采集到的无线网络信号,能够快速获取用户的有关信息,包括用户数量、用户位置、无线网络环境、设备使用情况及资源利用率等,基于上述实时且精确的信息,服务提供商和各类应用可以为用户提供差异化的定制服务,以提升用户满意度并增加自身营收。

1.3 边缘计算关键技术概述

边缘计算的关键技术主要包括不同层次的计算卸载、网络控制、资源管理、安全与隐私保护等。本节只对这些关键技术做简要概述,后续的章节会对每项关键技术做详细介绍和说明。

1.3.1 计算卸载

计算卸载指的是资源受限的设备,将计算密集型任务从终端设备部分或全部迁移到资源丰富的基础设施,以解决移动设备在存储性能、计算性能和能源效率方面的不足。计算卸载技术不仅可以减轻核心网络传输的压力,还可以减少由于数据远距离传输所引起的业务处理时延。移动边缘计算可以在用户设备(user equipment, UE)上运行新的复杂应用,而计算卸载是其中的关键技术。

1.3.2 网络控制

网络功能虚拟化(network function virtualization, NFV)、软件定义网络(software defined network, SDN)和网络切片是推动移动边缘计算网络构建与部署的关键技术。NFV 是指通过虚拟化技术以软件方式配置网络功能, NFV 能够部署在通用硬件设备上而无须专用定制。将 NFV 技术应用至移动边缘计算支撑的物联网中,能够达到根据物联网应用需求动态调整网络资源的目的,以灵活的方式提升移动边缘计算网络对物联网多样化应用需求的支持。SDN 主要以软件方式设计可编程网络控制器,并将控制面和数据面分离。逻辑集中式的 SDN 控制器能够实现灵活低时延的网络控制与管理。SDN 与 NFV 能够以软件模块实现网络功能可编程部署,并简化网络的配置、控制与处理,通过与移动边缘计算网络相结合,实现以较低的成本支撑物联网的多种应用需求,以及推动边缘计算网络的部署与控制。

1.3.3 资源管理

在完成卸载决策后,我们必须考虑合理的资源分配问题,也就是在哪里卸载。如果 UE 的计算任务是不可分割的,或者可分割但分割的部分是强相关的,在这种情况下,需要将卸载任务卸载到同一个边缘服务器上;而对于可以分割但分割部

分不相关的计算任务,可以卸载到多个 MEC 服务器上。目前,资源分配节点主要分为单节点分配和多节点分配。

1.3.4 安全与隐私保护

边缘计算的安全性是研究的热点之一。网络边缘数据涉及个人隐私。虽然附近数据处理的概念也为数据安全和隐私保护提供了更好的结构化支持,但边缘计算的分布式架构增加了攻击载体的维度。由于传统的数据及网络安全保护系统目前还未普及到边缘设备,目前的状况是边缘设备越智能,越容易受到恶意软件的感染和安全漏洞的影响。可见,现有的数据安全保护方法并不完全适用于边缘计算系统架构。此外,网络边缘的高度动态环境也使网络更加脆弱,难以保护。

1.4 边缘计算的发展现状

近年来,边缘计算作为产业数字化转型的核心技术,已经成为全球各国的发展共识,从政策引导、标准研制、应用示范等多个维度进行统筹部署和协同推进,国际竞争日趋激烈。

发达国家主要从三方面积极营造边缘计算发展环境:一是强化技术标准引领,美国国家科学基金会和美国国家标准局将边缘计算列入项目申请指南,持续推进其关键技术研究^[13],ITU-T SG20、IEC/ISO JTC1 SC41、IEEE 均成立了边缘计算研究小组,以推动边缘计算标准化工作^[14]。二是加大产业投资力度,欧盟 *Networld 2020* 将边缘计算作为重要研究部分列入其中,预计到 2026 年年底,欧盟在边缘计算领域的投资支出将达到 1850 亿美元^[15]。三是加强应用示范引导,日本成立 EdgeCross 协会,推动边缘计算在垂直行业落地,韩国目前已经在 8 个主要城市部署边缘计算节点,在 VR/AR、车联网、无人机与安防监控等场景进行应用试点。通过这些实际应用的示范,日韩希望引导更多的企业部署和应用边缘计算技术。

我国高度重视边缘计算的发展,主要聚焦三个维度:一是强化技术供给,工信部发布《关于推动工业互联网加快发展的通知》《工业互联网网络建设及推广指南》《国家车联网产业标准体系建设指南》等文件,推动建立统一、综合、开放的工业互联网边缘计算标准体系,鼓励相关单位在边缘计算领域进行技术攻关,加速产品研发与产业化。目前,我国边缘计算标准体系初步建立,中国通信标准化协会(CCSA)已经针对边缘计算开展了体系化的标准研究工作,形成在研标准近 30 项。二是加强融合应用,国务院、工信部及各地方政府均出台了相关政策,大力促进边缘计算等新兴前沿技术在工业互联网、车联网等垂直领域中的应用研究与探索,形成了一批可复制的应用模式,在全国范围内推广。目前,边缘计算在工业、农业、交通、物流等领域的试点部署日益广泛并已取得明显的效益。三是打造产业生态,工

业互联网产业联盟、边缘计算产业联盟、中国通信学会边缘计算委员会等平台的产业汇聚和支撑作用显著发挥。2020年,中国信息通信研究院联合产业各方成立边缘计算创新实验室,旨在打造“产学研用”相结合的技术产业开放平台及推动边缘计算发展的创新载体。同时,针对边缘计算发展存在产业碎片化及供给侧研发方向不明确等问题,工业互联网产业联盟启动我国首个边缘计算产业促进项目“边缘计算标准件计划”,加速边缘计算产品形态整合归类及功能规范化。

目前,各国边缘计算发展态势较为均衡,全球边缘计算仍处于发展初期。美、日发达国家和跨国巨头依托其云计算技术的既有优势积极布局边缘计算发展,试图引导全球产业链的技术、标准、应用模式。我国加强研究布局、积极构筑边缘计算自主技术产业生态,避免形成新的路径依赖。

1.5 本章小结

本章首先介绍了边缘计算发展的时代背景及发展动机,分别从云服务、物联网及数据消费者向生产者的转变等角度描述,并介绍了边缘计算发展的历程,帮助读者更好地理解边缘计算的产生及其演变过程。接着介绍边缘计算的架构和基本特征及其中使用到的关键技术描述,并在最后对边缘计算的发展现状进行简单概述。

思考题

- 1.1 简述边缘计算的发展历程。
- 1.2 简述边缘计算的架构。
- 1.3 简述边缘计算的基本特征。
- 1.4 简述边缘计算的关键技术。

练习题

请尝试描述边缘计算和元宇宙、深度学习的深度结合场景。

第2章

边缘计算的应用场景

本章对边缘计算常见的几个应用场景进行简要介绍,包括智慧城市、智能家居、智能交通、智慧医疗和工业互联网。

2.1 智慧城市

智慧城市(smart city)起源于传媒领域,是指在城市规划、设计、建设、管理与运营等领域中,通过物联网、云计算、大数据、空间地理信息集成等智能计算技术的应用,使城市管理、教育、医疗、房地产、交通运输、公用事业和公众安全等组成城市的关键基础设施组件和服务互联、高效和智能,从而为市民提供更加美好的生活和工作服务,为企业创造更有利的商业发展环境,为政府赋能更高效的运营与管理机制。当前智慧城市正处于实现智能化的道路上,其演进阶段是信息化、数字化、智能化,国内外各大城市也在积极发展,同时,这也是高级别城市的目标。

智慧城市的特点就是数据的全面感知,通过信息化和数字化把城市的大部分数据进行关联、分析,进而实现决策的智能化、科学化。随着边缘计算的实施,分布于各地的传感器和智能设备不必再将数据上传至“城市大脑”云计算中心来处理,而是就近通过边缘计算节点进行预处理、分析、联合控制、告警,及时对数据做出反馈,这样可以与“城市大脑”实现轻量级解耦。即使云计算中心出现异常故障,各个子系统也能实现一定程度的自治,将有效缓解“城市大脑”计算、存储等方面的压力。因此,在智慧城市中,物联网传感器、网络、视频监控等智能系统可以使用边缘计算来提供更快的响应和更安全的城市智能应用。

2.2 智能家居

智能家居(smart home)是以住宅为平台,利用综合布线技术、网络通信技术、安全防范技术、自动控制技术、音视频技术将与家居生活有关的设施集成,构建高

效的住宅设施与家庭日程事务管理系统,提升家居的安全性、便利性、舒适性、艺术性,并实现环保节能的居住环境。物联网的发展使家庭环境变得更加智能,几乎所有的智能家居都可以接入物联网,市场上也出现了越来越多的智能家居,如扫地机器人、智能灯光、智能门窗等。在云计算主导的时代,家居所感知产生的数据主要是通过无线网络发送到云数据中心,一些计算密集型任务由云端统一进行处理。而随着边缘计算的发展,家居终端本身就拥有一定的计算能力,家居产生的带有隐私的数据不需要传输到云端而在家庭范围内即可完成处理,使得家居更加智能和安全。

边缘计算逐渐被引入智能家居系统中,用以解决设备管理问题。首先,针对多种异构设备进行统一命名及接口接入云端管理,为智能家居控制程序的开发提供完备的抽象;其次,将智能设备的实时请求发送到就近的边缘节点,边缘节点迅速响应数据处理请求,动态规划智能设备的运行策略。当种类繁多、功能细分的智能设备通过网络进行连接和控制时,便出现了以智能家庭网关为核心的计算节点,作为边缘节点,可以实现边缘自治,并脱离了云端联合智能设备,能够保证家庭数据安全,提高家庭智能设备管理的效率。因此,基于边缘计算的智能家居成为未来发展的趋势。

2.3 智能交通

智能交通系统(intelligent traffic system,ITS)又称智能运输系统(intelligent transportation system),是将先进的科学技术(信息技术、计算机技术、数据通信技术、传感器技术、电子控制技术、自动控制理论、运筹学、人工智能等)有效地综合运用于交通运输、服务控制和车辆制造,加强车辆、道路、使用者之间的联系,从而形成一种保障安全、提高效率、改善环境、节约能源的综合运输系统。ITS是通过车联网实现的,由智能车辆、RSU、传感单元、环境监测系统、交通监测和监控系统等子系统组成,具有感知、分析、控制和通信能力^[16]。

近年来,随着车联网和自动驾驶技术的飞速发展,车辆具有智能化和网络化的发展趋势。虽然现有的车辆和道路监测系统都配备了足量的传感器来获取交通信息,但是出于成本上的考虑,这些传感器的计算能力非常有限,因此这些采集到的信息往往只能用于简单的监控和预警,而无法进行更加深入的处理分析。为了解决这一问题,研究者们将车联网和边缘计算进行融合,提出了车载边缘计算(vehicular edge computing,VEC)的概念。通过在路边单元等基础设施上部署边缘服务器,VEC可以为车辆提供高质量的计算服务,从而提升自动驾驶和辅助驾驶的性能。除此之外,VEC还可以对收集到的实时交通信息进行汇总和处理,从而为车辆规划最优的出行路线。