



边缘计算

EDGE
COMPUTING

施巍松 刘一芳 编著
孙辉 裴庆祺



科学出版社

边缘计算

施巍松 刘 芳 编著
孙 辉 裴庆祺



科学出版社

北 京

内 容 简 介

随着万物互联趋势的不断加深,数据的增长速度远远超过了网络带宽的增速。同时,智能制造、无人驾驶等众多新型应用的出现,对延迟提出了更高的要求。通过将数据从数据源到云计算中心数据路径之间的任意计算、存储和网络资源,组成统一的平台为用户提供服务,边缘计算作为一种新的计算模式,使数据在源头附近就能得到及时有效的处理。这种模式不同于云计算要将所有数据传输到数据中心,绕过了网络带宽与延迟的瓶颈。在产业界和学术界的合力推动下,边缘计算正在成为新兴万物互联应用的支撑平台。

本书分别从边缘计算的需求与意义、边缘计算基础、边缘计算典型应用、边缘计算系统平台、边缘计算的挑战、边缘计算系统实例以及边缘计算安全与隐私保护等多个方面对边缘计算进行了阐述。

本书非常适合作为高等院校计算机、通信、物联网、信息安全、电子机械相关专业的教学参考书,也可以作为从事边缘计算的开发人员和科研人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

边缘计算/施巍松等编著. —北京:科学出版社,2018

ISBN 978-7-03-056144-2

I. ①边… II. ①施… III. ①无线电通信—移动通信—计算
IV. ①TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 317795 号

责任编辑:赵丽欣 常晓敏 / 责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉 / 封面设计:蒋宏工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行

各地新华书店经销

*

2018年1月第 一 版

开本:889×1194 1/16

2018年1月第 一 次印刷

印张:12 1/4

字数:300 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62135763-2010

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前言

数据的爆发式增长是大数据时代下的主旋律，随着万物互联趋势不断加深，数据的增长速度远远超过了网络带宽的增速。同时，智能制造、无人驾驶等众多新型应用的出现对延迟提出了更高的要求。通过将数据源到云计算中心数据路径之间的任意计算、存储和网络资源，组成统一的平台为用户提供服务，边缘计算（edge computing）作为一种新的计算模式，使数据在源头附近就能得到及时有效的处理。这种模式不同于云计算要将所有数据传输到数据中心，绕过了网络带宽与延迟的瓶颈。在产业界和学术界的合力推动下，边缘计算正在成为新兴万物互联应用的支撑平台。

边缘计算与同样备受关注的万物互联和云计算是什么关系呢？边缘计算模型是随着万物互联的飞速发展及广泛应用，不断扩大的数据规模以及数据处理的计算需求而产生的，边缘计算将让万物更智能，支持构建健硕的边缘应用生态。边缘计算并不是为了取代云计算，而是对云计算的补充和延伸，为移动计算、物联网等提供更好的计算平台。边缘计算模型需要云计算中心的强大计算能力和海量存储的支持，而云计算也同样需要边缘计算中边缘设备对于海量数据及隐私数据的处理，从而满足实时性、隐私保护和降低能耗等需求。

当谈起“边缘计算”时，我们到底在说什么？边缘计算的概念比较抽象，人们总是在谈“边缘”，但却往往觉得“不落地”。边缘计算如此重要，目前还未见对边缘计算技术进行全面、深入剖析的出版物。本书第一作者施巍松教授是边缘计算这一研究领域的早期提出者之一和主要倡导者，也是 ACM/IEEE 国际边缘计算研讨会（SEC）的创始人，其他三位作者也都是国内比较早开始从事边缘计算研究的科研人员。了解到广大读者渴望弄清边缘计算本质和细节的迫切心情，我们集中力量编写了这本书，希望能帮助有兴趣了解和研究边缘计算的读者缩短学习的过程，共同推进该领域的发展。

本书共分8章。第1章介绍边缘计算的概念、起源及发展历史；第2章对边缘计算的基本概念、模型、关键技术进行剖析，分析边缘计算与云计算、边缘计算与大数据之间的关联，探讨边缘计算的优势与面临的挑战；第3章给出基于边缘计算模型的几种实际应用案例，通过这些案例可以展望边缘计算在万物互联背景下的研究机遇和应用前景；第4章从智慧城市、智能汽车、智能家居、个人计算服务、协同平台等方面，介绍边缘计算的系统平台；第5章从可编程性、程序自动划分、命名规则、数据抽象、服务管理、数据隐私保护及安全、优化指标、理论基础以及商业模式等方面，进一步探讨边缘计算的挑战性关键问题；第6章简述目前新兴的多个边缘计算系统实例，并重点介绍 Cloudlet、ParaDrop 和 Firework 三个有代表性的边缘计算系统；第7章从安全目标、安全威胁与挑战、主要安全技术等方面探讨边缘计算的安全，并从隐私保护、态势感知、设备更新、安全协议等角度，分析边缘计算为物联网安全带来的新机遇；第8章为结束语。

本书非常适合作为高等院校计算机、通信、物联网、信息安全、电子机械相关专业的教学参考书，也可以作为从事边缘计算的开发人员和科研人员的参考资料。对于不同需求的读者，可以直奔感兴趣的内容而

去。希望了解边缘计算的概念、本质和发展趋势的读者，可以重点阅读第 1、2 章；希望学习边缘计算技术原理的读者，可以将重点放在第 2、3、4、6 章；希望从事边缘计算研发的同仁，可重点阅读第 4、5、6 章；关心边缘计算安全和隐私问题的读者，可重点阅读第 1、7 章。

本书的顺利完成离不开中美两国团队的协同工作和辛勤付出。团队成员为本书的顺利完成花费了大量的时间和精力，也为本书提供了许多宝贵的原材料，在此一并表示感谢，他们是：中国团队成员李尤慧子博士（杭州电子科技大学）、任领美博士（山东科技大学）、陈彦明博士（安徽大学）、张庆阳博士研究生（安徽大学）、刘伟硕士研究生（安徽大学）、梁旭硕士研究生（安徽大学）、徐殷（安徽大学）、张星洲博士研究生（中国科学院计算技术研究所）、赵梓铭硕士研究生（国防科技大学）、郭烨婷硕士研究生（国防科技大学）、吴卫硕士研究生（西安电子科技大学）、白磊博士研究生（西安电子科技大学）；美国团队成员曹杰博士研究生（美国韦恩州立大学）、张权博士研究生（美国韦恩州立大学）、许蓝予博士研究生（美国韦恩州立大学）。

此外，需要特别感谢科学出版社的赵丽欣女士，没有她的大力支持，这本书不会这么快和读者见面。

由于边缘计算技术非常前沿，加之时间仓促，很多内容无法面面俱到，同时书中难免存在谬误，恳请读者批评指正。意见和建议请发到 weisong@wayne.edu，欢迎和我们探讨边缘计算相关的任何问题。

施巍松 刘芳 孙辉 裴庆祺

2017 年 12 月

目 录

第 1 章 边缘计算的需求与意义	001
1.1 什么是边缘计算	001
1.2 边缘计算的产生背景	003
1.3 边缘计算的发展历史	006
1.3.1 分布式数据库模型	006
1.3.2 对等网络	007
1.3.3 内容分发网络	007
1.3.4 移动边缘计算	008
1.3.5 雾计算	008
1.3.6 海云计算	009
1.3.7 边缘计算的发展现状	009
本章小结	010
参考文献	010
第 2 章 边缘计算基础	013
2.1 分布式计算	013
2.2 边缘计算的基本概念	015
2.3 边缘计算的关键技术	017
2.3.1 计算迁移	017
2.3.2 5G 通信技术	018
2.3.3 新型存储系统	018
2.3.4 轻量级函数库和内核	019
2.3.5 边缘计算编程模型	020
2.4 边缘计算与云计算	020
2.4.1 云计算的概念	020
2.4.2 云计算特点	021
2.4.3 边缘计算与云计算	021

2.5 边缘计算与大数据	023
2.6 边缘计算的优势与挑战	024
本章小结	026
参考文献	027
第3章 边缘计算典型应用	029
3.1 智慧城市	029
3.2 智能制造	030
3.3 智能交通	032
3.4 智能家居	034
3.5 协同边缘	036
3.6 云计算任务前置	038
3.7 边缘计算视频监控系统	040
3.8 基于边缘计算的灾难救援	044
本章小结	048
参考文献	048
第4章 边缘计算系统平台	052
4.1 面向智慧城市的边缘计算系统	052
4.1.1 面向智慧城市的边缘计算系统框架	053
4.1.2 智慧城市中边缘计算任务迁移及调度	055
4.2 面向智能汽车的边缘计算系统	061
4.2.1 为什么需要 EdgeOS _V	061
4.2.2 车载应用的划分	064
4.2.3 OpenVDAP	065
4.2.4 OpenVDAP 结构	068
4.2.5 第三方服务举例	068
4.2.6 相关研究	069
4.2.7 面临的问题	071
4.3 面向智能家居的边缘计算系统	072
4.3.1 为什么需要 EdgeOS _H	072
4.3.2 EdgeOS _H 架构	073
4.3.3 EdgeOS _H 的功能性问题	074
4.3.4 面临的问题	077
4.4 面向个人计算的边缘计算系统	078
4.4.1 EdgeOS _P 整体架构	079
4.4.2 EdgeOS _P 的软件结构	081

4.4.3	EdgeOS _p 的典型应用实例	085
4.4.4	面临的问题	086
4.5	协同平台	088
4.5.1	协同平台背景模型	089
4.5.2	协同平台的典型应用举例	092
4.5.3	面临的问题	094
	本章小结	094
	参考文献	094
第 5 章	边缘计算的挑战	099
5.1	可编程性	099
5.2	程序自动划分	101
5.3	命名规则	101
5.4	数据抽象	103
5.5	调度策略	103
5.6	服务管理	104
5.7	隐私保护及安全	106
5.8	优化指标	106
5.9	理论基础	108
5.10	商业模式	108
	本章小结	109
	参考文献	109
第 6 章	边缘计算系统实例	111
6.1	边缘计算系统概览	111
6.1.1	Cloudlet	111
6.1.2	PCloud	113
6.1.3	ParaDrop	114
6.1.4	Cachier 与 Precog	115
6.1.5	FocusStack	118
6.1.6	SpanEdge	119
6.1.7	AirBox	121
6.1.8	CloudPath	122
6.1.9	Firework	124
6.1.10	海云计算	125
6.1.11	边缘计算开源系统	127
6.1.12	边缘计算代表性商业系统	129

6.1.13 边缘计算系统的比较	130
6.2 Cloudlet	132
6.2.1 计算迁移	132
6.2.2 资源发现与选择	134
6.2.3 动态 VM 合成	137
6.3 ParaDrop	138
6.3.1 整体架构	138
6.3.2 服务降落伞	139
6.3.3 ParaDrop 工作流	141
6.3.4 系统分析	142
6.4 Firework	144
6.4.1 Firework 概念	144
6.4.2 整体架构	145
6.4.3 可编程性	146
6.4.4 范例分析	148
本章小结	149
参考文献	150
第7章 边缘计算安全与隐私保护	153
7.1 安全概述、基础和目标	153
7.2 安全威胁及挑战	155
7.2.1 物理安全	157
7.2.2 网络安全	158
7.2.3 数据安全	160
7.2.4 应用安全	163
7.3 主要安全技术	165
7.3.1 身份认证	165
7.3.2 访问控制	167
7.3.3 入侵检测	169
7.3.4 隐私保护	170
7.3.5 可信执行	172
7.3.6 安全多方计算	173
7.4 边缘计算为物联网安全带来的机遇	174
7.4.1 隐私保护	174
7.4.2 态势感知	175
7.4.3 设备更新	175

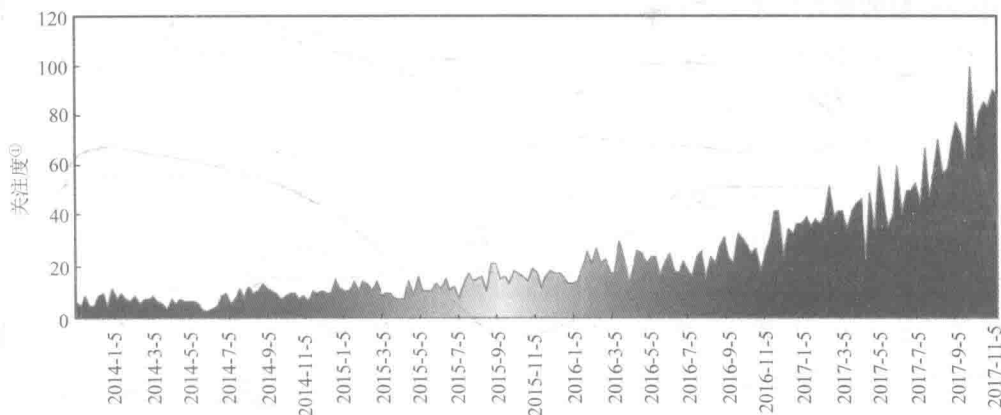
7.4.4 安全协议	176
7.5 边缘计算安全实例	177
7.5.1 边缘计算的数据保护模型	177
7.5.2 海豚攻击：听不见的声音命令	178
7.5.3 ContextIoT：基于边缘计算的权限访问系统	179
7.5.4 Octopus：基于边缘计算的物联网安全认证	180
本章小结	181
参考文献	182
第8章 结束语	184

第1章 边缘计算的需求与意义

边缘计算是什么？为什么要提出边缘计算？边缘计算与云计算和大数据处理之间是何种关系？本章将通过边缘计算的概念、起源及发展历史揭开边缘计算的神秘面纱，带读者进入万物互联时代下新型计算模式——边缘计算。

1.1 什么是边缘计算

从2014年至今近几年的趋势来看，边缘计算（edge computing）的关注度持续走高，如图1-1所示。特别是从2016年开始，边缘计算关注度得到迅速提高，这表明边缘计算在当前信息科技发展中的重要性愈加凸显出来。



① 图中数字代表相对于图表中最高点的搜索热度，例如，热度最高得120分

图 1-1

Google Trends 中边缘计算关注度趋势图

对于到底什么是边缘计算，目前还没有一个严格统一的定义，不同研究者从各自的视角来描述和理解边缘计算。本书给出一种定义，供读者参考。

边缘计算是指在网络边缘执行计算的一种新型计算模式，具体对数据的计算包括两部分：下行的云服务和上行的万物互联服务。边缘计算中的“边缘”是相对的概念，是指从数据源到云计算中心路径之间的任意计算、存储和网络资源。可以把这条路径上的资源看作是一个“连续统”（continuum），从一端（数据源）到另一端（云中心），根据应用的

具体需求和实际场景，边缘（edge）可以是这条路径上的一个或多个资源节点，如图 1-2 所示。

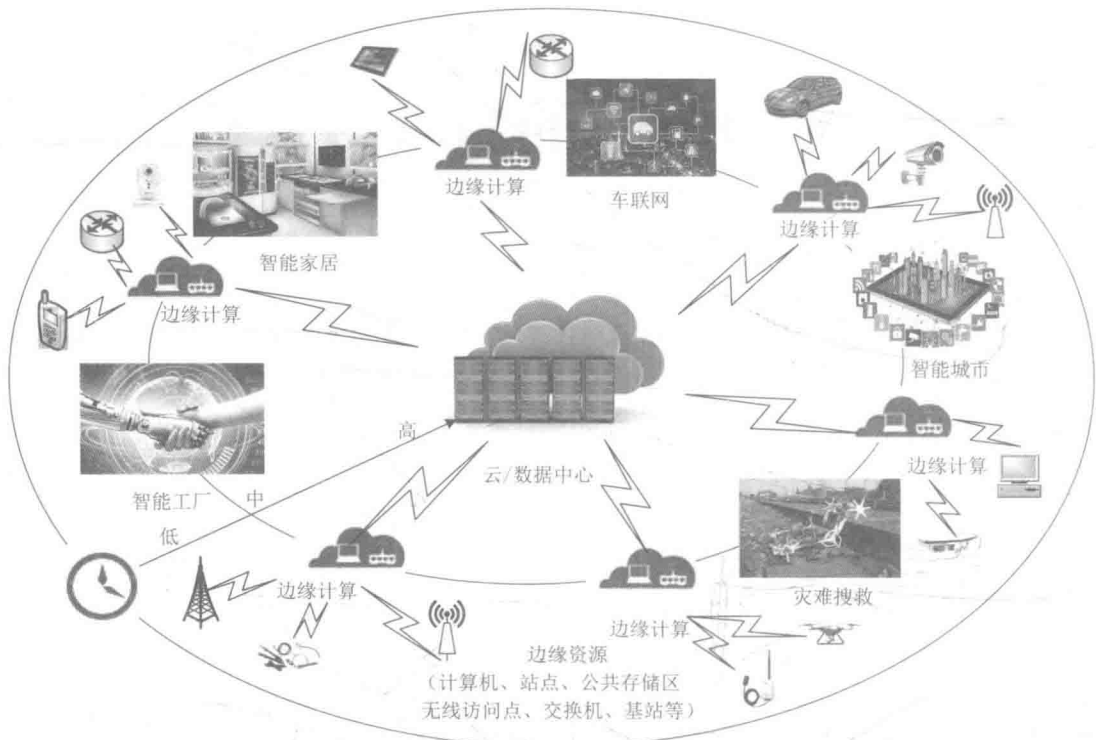


图 1-2
边缘计算是一个连续统
(continuum)

边缘计算的核心理念是“计算应该更靠近数据的源头，可以更贴近用户”。边缘计算中的“边缘”与数据中心相对，这里“贴近”一词包含多种含义。首先可以表示网络距离近，由于网络规模缩小，带宽、延迟、抖动等不稳定因素都易于控制与改进。还可以表示为空间距离近，这意味着边缘计算资源与用户处在同一个情景之中（如位置），根据这些情景信息可以为用户提供个性化的服务（如基于位置信息的服务）。空间距离与网络距离有时可能并没有关联，但应用可以根据自己的需要来选择合适的计算节点。

网络边缘的资源主要包括手机、个人电脑等用户终端，WiFi 接入点、蜂窝网络基站与路由器等基础设施，摄像头、机顶盒等嵌入式设备，Cloudlet 等小型计算中心等。这些资源数量众多，相互独立，分散在用户周围，将其称之为边缘节点。边缘计算就是要将空间距离或网络距离上与用户临近的这些独立分散的资源统一起来，为应用提供计算、存储和网络服务。

如果从仿生的角度来理解边缘计算，可以做这样的类比：云计算相当于人的大脑，边缘计算相当于人的神经末端。当针刺到手时总是先下意识地收手，然后大脑才会意识到针刺到手，因为将手收回的过程是由神经末端直接处理的非条件反射。这种非条件反射加快人的反应速度，避免受到更大的伤害，同时让大脑专注于处理高级智慧。未来是万物互联的时代，不可能让云计算成为每个设备的“大脑”，而边缘计算则是让设备拥有自己的“大脑”。

1.2 边缘计算的产生背景

近年来,物联网、大数据、云计算、智能技术的快速发展,给互联网产业带来深刻的变革,也对计算模式提出新的要求。

物联网(Internet of Things, IoT)技术^[1]旨在利用射频识别技术、无线数据通信技术、全球定位系统等,按物联网约定的通信协议将实物与互联网连接起来,进行信息交换,以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理互联网资源。随着计算机技术和网络通信技术的发展,物联网的概念得到较大的延伸,即定义为几乎所有信息技术与计算机、网络技术的结合,实现实物与实物之间数据信息的实时共享,实现具有智能化的实时数据收集、传递、处理和执行。“无人参与的计算机信息感知”的概念开始逐渐应用到可穿戴医疗、智能家居、环境感知、智能运输系统、智能制造等领域中^[2, 3]。物联网技术涉及的关键技术主要包括:

① 传感器技术 从自然信源获取信息,并对之进行处理(变换)和识别的技术。传感器技术也是计算机应用中的关键技术,通过对被测对象的某一确定的信息进行感受(或响应)与检出,并使之按照一定规律转换成可输出信号。

② RFID 标签 RFID(radio frequency identification)无线射频识别技术是将无线射频技术和嵌入式技术融为一体的综合技术,通过射频信号自动识别目标对象并获取相关数据,识别工作无须人工干预,可工作于各种恶劣环境,在自动识别、物流管理等方面有着广阔的应用前景。

③ 嵌入式系统技术 是综合计算机软硬件、传感器技术、集成电路技术、电子应用技术的复杂技术。经过几十年的演变,以嵌入式系统为特征的智能终端产品随处可见:小到人们身边的MP3,大到航天航空的卫星系统。嵌入式系统正在改变着人们的生活,推动着工业生产以及国防工业的发展。如果把物联网用人体做一个简单比喻,传感器相当于人的眼睛、鼻子、皮肤等感官,网络就是神经系统用来传递信息,嵌入式系统则是人的大脑,在接收到信息后要进行分类处理。

如今,随着物联网的快速发展和4G/5G无线网络的普及,万物互联(Internet of Everything, IoE)^[4]的时代已经到来。思科(Cisco)于2012年12月提出万物互联的概念,这是未来互联网连接和“物联网”发展的全新网络连接架构,是在物联网基础上的新型互联的构建,增加了网络智能化处理功能和安全功能。万物互联通过分布式结构,融合以应用为中心的网络、计算和存储的新型平台,以IP驱动的设备、全球范围内更高的带宽接入和IPv6,可支持高达数亿台连接到互联网上的边缘终端和设备。相比物联网而言,万物互联除了“物”与“物”的互联,还增加了更高级别的“人”与“物”的互联,其突出特点是任何“物”都将具有语境感知的功能、更强的计算能力和感知能力。

将人和信息融入互联网中，网络将具有数十亿甚至数万亿的连接节点。万物互联以物理网络为基础，增加网络智能，在互联网的“万物”之间实现融合、协同以及可视化的功能。

基于万物互联平台的应用服务需要更短的响应时间，同时也会产生大量涉及个人隐私的数据。例如，装载在无人驾驶汽车上的传感器和摄像头实时捕捉路况信息，每秒产生约1GB数据^[5]。据研究机构IHS预测，到2035年，全球将有5400万辆无人驾驶汽车^[6]；波音787每秒将产生大约5GB的数据，并要求对这些数据进行实时处理^[7]；以北京市电动汽车监控平台为例，该平台可以对1万辆电动汽车7×24小时不间断实时监控，并以每辆车每10秒一条的速率，向各企业平台实时转发监控数据^[8]；以社会安保为例，美国部署3000余万个监控摄像头，每周生成超过40亿小时的海量视频数据。中国用于打击犯罪的“天网”监控网络，已在全国各地安装超过2000万个高清监控摄像头，对行人和车辆实时监控和记录^[9]。

自2005年概念被提出，到如今的广泛应用，云计算已经改变了人们日常工作和生活的方式，如software as a service (SaaS)被广泛应用到谷歌、Twitter、Facebook、百度等著名IT企业的数据中心。可扩展的基础设施和支持云服务的处理引擎技术已对应用服务程序的运行方式产生巨大影响，如谷歌的文件系统(google file system)^[10]、MapReduce编程模型^[11]、Apache基金会开发的分布式系统Hadoop^[12]、加州大学伯克利分校AMP实验室开发的内存计算框架Spark^[13]等。但是，物联网等应用背景下的数据在地理上分散，并且对响应时间和安全性提出更高的要求。云计算虽然为大数据处理提供高效的计算平台，但是目前网络带宽的增长速度远远赶不上数据的增长速度，网络带宽成本的下降速度要比CPU、内存这些硬件资源成本的下降速度慢很多，同时复杂的网络环境让网络延迟很难有突破性提升，因此传统云计算模式将难以实时高效地支持基于万物互联的应用服务程序，需要解决带宽和延迟这两大瓶颈^[14]。

随着万物互联的飞速发展及广泛应用，边缘设备正在从以数据消费者为主的单一角色转变为兼顾数据生产者和数据消费者的双重角色，同时网络边缘设备逐渐具有利用收集的实时数据进行模式识别、执行预测分析或优化、智能处理等功能。在边缘计算模型中，计算资源更加接近数据源端，网络边缘设备已经具有足够的计算能力来实现源数据的本地处理，并将结果发送给云计算中心。边缘计算模型不仅可以降低网络传输中带宽的压力，加快数据分析处理，同时能降低终端敏感数据隐私泄露的风险。目前，大数据处理已经从以云计算为中心的集中式处理时代（本书把2005~2015这10年称之为集中式大数据处理时代），正在跨入以万物互联为核心的边缘计算时代（本书称之为边缘式大数据处理时代）。集中式大数据处理时代，更多的是集中式存储和处理大数据，其采取的方式是建造云计算中心，并利用云计算中心超强的计算能力来集中式解决计算和存储问题。相比而言，在边缘式大数据处理时代，网络边缘设备会产生海量实时数据，据思科互联网业务解决方案集团预测，到2020年，连接到网络的无线设备数量将达到500亿台^[15]，如图1-3所示。根据思科全球云指数^[16]的预估，到2019年，物联网产生数据的45%将在网络边缘存储、处

理、分析，而全球数据中心数据流量预计总量将达到 10.4 泽字节 (Zettabyte, ZB)。并且，这些边缘设备将部署在支持实时数据处理的边缘计算平台，为用户提供大量服务或功能接口，用户可通过调用这些接口来获取所需的边缘计算服务。



图 1-3
边缘设备类型
及数量的发展
趋势图^[10]

因此，线性增长的集中式云计算能力已无法匹配爆炸式增长的海量边缘数据，基于云计算模型的单一计算资源已不能满足大数据处理的实时性、安全性和低能耗等需求。在现有以云计算模型为核心的集中式大数据处理基础上，亟待需要以边缘计算模型为核心，面向海量边缘数据的边缘式大数据处理技术。二者相辅相成，应用于云中心和边缘端大数据处理，解决万物互联下云计算服务不足的问题（更具体的讨论见 2.4 节）。

相比于云计算，边缘计算可以更好地支持移动计算与物联网应用，具有以下明显的优点：

- 极大缓解网络带宽与数据中心压力：思科在 2015~2020 年的全球云指数中指出，随着物联网的发展，2020 年全球的设备将会产生 600ZB 的数据，但其中只有少量是关键数据，大都是临时数据，无需长期存储（设备所产生的数据量比需要存储的数据量高两个数量级）^[16]。边缘计算可以充分利用这个特点，在网络边缘处理大量临时数据，从而减轻网络带宽与数据中心的压力。
- 增强服务的响应能力：移动设备在计算、存储和电量等资源上的匮乏是其固有的缺陷，云计算可以为移动设备提供服务来弥补这些缺陷，但是，网络传输速度受限于通信技术的发展，复杂网络环境中更存在链接和路由不稳定等问题，这些因素造成的延迟过高、抖动过强、数据传输速度过慢等问题严重影响云服务的响应能力^[17]。而边缘计算在用户附近提供服务，近距离服务保证较低的网络延迟，简单的路由也减少网络的抖动。同时，5G 时代正在到来，多样化的应用场景和差异化的服务需求，对 5G 网络在吞吐量、延迟、连接数目和可靠性等方面提出挑战。边缘计算技术和 5G 技术相辅相成，边缘计算技术正以其本地化、近距离、低时延等特点，助力 5G 架构变革，而 5G 技术将是边缘计算系统降低数据传输延时、增强服务等响应性能的必要解决方案。
- 保护隐私数据，提升数据安全性：物联网应用中，数据的安全性一直是关键问题，

调查显示约有 78% 的用户担心他们的物联网数据在未授权的情况下被第三方使用^[18]。云计算模式下所有的数据与应用都在数据中心, 用户很难对数据的访问与使用进行细粒度的控制。而边缘计算则为关键性隐私数据的存储与使用提供基础设施, 将隐私数据的操作限制在防火墙内, 提升数据的安全性 (更具体的说明见第 7 章)。

1.3 边缘计算的发展历史

边缘计算的发展与面向数据的计算模型的发展是分不开的。随着数据规模的增大, 人们对数据处理的性能、能耗等方面的需求不断提高。为了解决面向数据传输、计算和存储过程中的计算负载和数据传输带宽的问题, 在边缘计算产生之前, 研究者也探索如何在靠近数据的边缘增加数据处理的功能, 即计算任务从计算中心迁移到网络边缘的研究, 主要典型模型包括: 分布式数据库模型、P2P 模型、CDN 模型、移动边缘计算模型、雾计算模型以及海云计算。本书按每种技术的产生顺序来阐述不同模型, 同时介绍边缘计算产生的历史。

1.3.1 分布式数据库模型

分布式数据库模型是数据库技术和网络技术两者结合的结果。大数据时代, 数据种类和数量的增长使分布式数据库成为数据存储和处理的核心技术。分布式数据库部署在自组织网络服务器或分散在互联网、企业网或外部网、以及其他自组织网络的独立计算机上。数据存储在多台计算机上, 分布式数据库操作不局限于单台机器, 而允许在多台机器上执行事务交易, 以此来提高数据库访问的性能^[19]。

分布式数据库已成为大数据处理的核心技术。按照数据库的结构, 分布式数据库包括同构系统和异构系统。前者数据库实例的运行环境具有相同的软件和硬件, 并具有单一的访问接口; 后者的运行环境中硬件、操作系统和数据库管理系统以及数据模型等均有所不同。按照处理数据类型, 分布式数据库主要包括 SQL (关系型)、NoSQL (非关系型)、基于可扩展标记语言 (XML) 以及 NewSQL 分布式数据库。其中, NoSQL 和 NewSQL 分布式数据库使用最为广泛。NoSQL 分布式数据库^[20]主要为满足大数据环境下, 海量数据对数据库高并发、高效存储访问、高可靠性和高扩展性的需求, 将其分为键值存储类数据库、列存储数据库、文档型数据库、图形数据库等。NewSQL 分布式数据库^[20]是一种具有实时性、复杂分析、快速查询等特征的, 面向大数据环境下海量数据存储的关系型分布式数据库, 主要包括 Google Spanner, Clustrix, VoltDB 等。SQL 分布式数据库是针对表式结构的关系型分布式数据库, 典型代表有微软分布式数据库和 Oracle 分布式数据库。基于 XML 的分布式数据库主要存储以 XML 为格式的数据, 本质上是一种面向文档的类似于 NoSQL

的分布式数据库^[21]。

相比于边缘计算模型,分布式数据库提供大数据环境下的数据存储,较少关注其所在设备端的异构计算和存储能力,主要用于实现数据的分布式存储和共享。分布式数据库技术所需的空間较大且数据的隐私性较低,对基于多数据库的分布式事务处理而言,数据的一致性技术是分布式数据库要面临的重要挑战^[22]。边缘计算模型中数据位于边缘设备端,具有较高的隐私性、可靠性和可用性。万物互联时代,“终端架构具有异构性,并需支持多种应用服务”将成为边缘计算模型应对大数据处理的基本思路。

1.3.2 对等网络

P2P 计算(peer-to-peer computing, P2P)^[23]不仅与边缘计算紧密相关,而且还是较早将计算迁移到网络边缘的一种文件传输技术。P2P 的术语于 2000 年首次被提出,并用于实现文件共享系统。此后,逐渐发展成为分布式系统的重要子领域,其中分散化、最大化可扩展性、容忍较高层节点流失以及恶意行为防止已经成为 P2P 主要的研究主题,该领域的主要成就包括:①分布式哈希表,后来演变为云计算模型中 key-value 分布式存储一般范式;②广义 Gossip 协议,已被广泛地用于非简单信息扩散的复杂任务处理类应用中,如数据融合和拓扑管理;③多媒体流技术,表现形式有视频点播、实时视频、个人通信等。但是,P2P 多数被用于非法文件共享和相关诉讼的广泛媒体报道,基于 P2P 模式的一些商业技术未得到实际认可。

边缘计算模式与 P2P 技术具有很大程度的相似性,但前者对后者在新技术和新手段上进行拓展,将 P2P 的概念扩展到网络边缘设备,涵盖 P2P 计算和云计算的融合。

1.3.3 内容分发网络

内容分发网络(content distribution networks, CDN)^[24]是 1998 年阿卡迈(Akamai)公司提出的一种基于互联网的缓存网络,通过在网络边缘部署缓存服务器来降低远程站点的数据下载延时,加速内容交付,得到学术界和工业界的高度关注而快速发展。如亚马逊^[25]、阿卡迈等公司拥有比较成熟的 CDN 技术,阿卡迈公司^[26]利用 CDN 技术研发的中国 CDN^[27],为我国用户交付获得期望的性能和体验,同时也降低提供商的组织运营压力。近年来,研究人员实现一种新的体系结构模型——主动内容分发网络(active content distribution networks, ACDN)^[28],作为对传统 CDN 的一种改进,帮助内容提供商免于预测预先配置的资源 and 决定资源的位置。ACDN 允许应用部署在任意一台服务器上,通过设计一些新算法,根据需要进行应用在服务器间的复制和迁移。我国学术界研究 CDN 优化技术,如清华大学团队设计和实现的边缘视频 CDN^[29],其提出利用数据驱动的方法组织边缘内容热点;基于请求预测的服务器峰值转移的复制策略,实现把内容从服务器复制到边缘热点上为用户提供服务。产业界也涌现出许多 CDN 服务公司,如蓝汛(chinacache)^[30]、网宿^[31]等。