



专题：新型网络技术

算力基础设施发展现状与趋势展望

邢文娟, 雷波, 赵倩颖

(中国电信股份有限公司研究院, 北京 102209)

摘要: 数字化技术的发展驱动着算力基础设施更新变革。算力基础设施主要指与云计算、边缘计算、端计算相关的软/硬件算力设施, 以及前沿算力设施(如量子计算等)。首先对基础计算硬件和软件设施进行了探讨, 总结了数据中心朝着多元化、智能化、绿色化的方向发展。然后探讨了云计算、边缘计算和端计算的技术现状和发展趋势, 指出算力基础设施从典型集约式云计算形态, 逐步向云计算-边缘计算-端计算等多级、泛在、融合的趋势发展。最后对于下一代信息革命的关键技术——量子计算的技术现状及发展进行了总结, 为算力基础设施的研究和发展提供借鉴。

关键词: 云计算; 边缘计算; 端计算; 量子计算

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022137

Development status and trend prospect of computing power infrastructure

XING Wenjuan, LEI Bo, ZHAO Qianying

Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Beijing 102209, China

Abstract: The development of digital technology drives the change and revolution of computing power infrastructure. The computing power infrastructure mainly refers to hardware and software infrastructure related to cloud computing, edge computing, end computing, as well as cutting-edge computing power infrastructure such as quantum computing. Firstly, the basic computing hardware and software facilities were discussed, and the development of data center towards diversification, intelligence, and greening was summarized. Secondly, the current technologies and development trends of cloud computing, edge computing and end computing were discussed. The form of the computing power infrastructure has developed from typical intensive cloud computing to multi-level, ubiquitous, converged cloud-edge-end computing. Finally, the current technologies and development of quantum computing were summarized, which was regarded as the key technologies of the next generation information revolution, with a view to provide reference for the research and development of computing power infrastructure.

Key words: cloud computing, edge computing, end computing, quantum computing



0 引言

算力设施是承载算力的载体，构建了计算体系中最重要基础支撑底座。当前数字化技术（如云计算、大数据、人工智能等）加速创新，数字化应用层出不穷，带动信息数据加速增长。根据国际数据公司（International Data Corporation, IDC）的数据，到 2024 年全球数据总量将增长到 142.6 ZB，数据采集、数据存储与管理、数据传输与处理等对算力资源的需求将极大地增加^[1]。同时，算力的发展也为算法、数据和通信提供了有力支撑，驱动技术革新、产业应用创新及数字化经济不断突破，对经济社会的发展发挥着关键性的作用。

从狭义的角度来看，算力基础设施是通过处理数据，实现特定结果输出能力的设备与系统，核心为中央处理器（central processing unit, CPU）、图形处理器（graphics processing unit, GPU）、现场可编程门阵列（field programmable gate array, FPGA）等计算芯片，搭载各类软件服务，并由计算机、服务器、智能终端等承载。算力常用计量单位是 FLOPS（每秒执行的浮点数运算次数），1 EFLOPS 约为 25 万台主流双路服务器，或 200 万台主流笔记本电脑的算力输出。据统计，2020 年全球算力总规模达 429 EFLOPS，我国的算力规模为 135 EFLOPS，预估未来 5 年全球算力规模将以超过 50% 的速度增长，到 2025 年整体规模将达 3 300 EFLOPS^[2]。从广义的角度来看，算力基础设施已成为数字经济时代的新型生产力和支撑数字经济的坚实基础底座。

1 计算基础软硬件的发展

“计算”作为一种人类认知世界的方式，不断推动着科学技术的发展和人类社会的进步。“计算”离不开最重要的两个要素：计算硬件和计算软件，二者是计算系统中相互依存、不可分割的

两部分。

1.1 基础计算硬件

计算硬件是“计算”的载体，指具备计算能力的设备，包括电子计算机、服务器、智能手机、车载系统、智能机器人、基站和通信网元等较完备的计算系统，以及芯片、内存、磁盘和信令单元等有计算能力的器件。本文主要探讨计算芯片的发展。

计算芯片是所有计算设备的物理基础。CPU 被认为是计算机的“心脏”，在计算硬件中占据举足轻重的地位。目前，个人计算机（PC）、服务器以 x86 架构为主，手机、平板计算机等便携式移动设备以及高端服务器、工作站等对系统节能性以及系统运行效率要求较高，通常采用进阶精简指令集机器（advanced RISC（reduced instruction set computer）machine, ARM）架构^[3]。GPU 正在成为通用计算机和超级计算机的重要处理器，同时在智能手机等移动设备端的应用越来越普及^[4]。专用集成电路（application-specific integrated circuit, ASIC）在 AI 设备等专用的智能终端上有着其他芯片无法比拟的巨大优势，未来在边缘计算、增强现实（augmented reality, AR）/虚拟现实（virtual reality, VR）、智能家居等领域将会大量被使用并普及。FPGA 被称为“万能芯片”，在异构计算领域具有优异的可定制性和可重配置特点^[5]，在自动驾驶、数据中心等领域的应用正逐步增加。数据处理器（data processing unit, DPU）是以数据处理为核心的专用数据处理单元，将使计算任务以数据为中心转移，可以有效提升数据中心系统的计算效率，降低通信时延^[6]。

总体来看，我国芯片产业发展薄弱，技术“卡脖子”问题突出。2021 年 1—5 月，我国芯片进口规模达 1.04 万亿元，对外依赖性较强^[7]。制约我国芯片发展的主要因素为芯片设计和制造工艺落后^[8]。当前，我国正加大芯片研发力度，力争在半导体技术和智能芯片领域寻求突破，已涌现出

一些优秀产品,如基于 MIPS 的龙芯、基于 x86 的兆芯、基于 ARM 的天津飞腾、基于 ARM 的华为鲲鹏 920,以及基于 Alpha 架构的成都申威等。基于 RISC 原则的开源指令集架构 RISC-V 也获得国内众多科技企业的关注。

1.2 基础计算软件

计算软件是用户与计算硬件之间的接口,主要包含系统软件和应用软件。用户通过应用软件操作计算设备,应用软件安装在系统软件之上,而系统软件位于硬件之上。

操作系统(operating system, OS)是配置在计算硬件上的第一层最重要的系统软件,为计算设备使用者提供了人机交互的平台。目前,主流的操作系统有 UNIX、Mac OS、iOS、Windows、Linux、Android 等。在个人桌面操作系统领域,美国微软公司的 Windows 占据绝对的统治地位^[9];Linux 在服务器市场占据主导地位^[2];在移动操作系统领域,美国谷歌公司的 Android 和苹果公司的 iOS 占据主导地位。整体来看,国外几家商业巨头在全球市场和我国市场都占据绝对优势。随着我国自主研发能力的突破以及鸿蒙、银河麒麟等操作系统的崛起,我国自主研发的操作系统必将能抢占一席之地。

除操作系统外,主要的系统软件有:语言处理程序、驱动程序、数据库管理系统以及文件系统等。总体来说,传统商业数据库厂商美国甲骨文公司、微软公司和 IBM 公司占据我国市场 60% 以上的份额,而我国商业数据库发展迅速,但总体份额较少,仅占不到 10%,我国数据库内核核心开发人员不足,关键技术亟待突破^[10]。当前,我国厂商在该领域快速发展,如华为推出的分布式数据库 GaussDB、蚂蚁集团数据库平台 OceanBase^[8]。互联网时代信息数据持续爆炸增长,大数据时代已经到来,数据库管理系统将发挥越来越重要的作用。提高数据库管理系统的可靠性、安全性,设计更多元化的数据库管理系统

满足不同的业务需要将是主要的发展方向。

1.3 数据中心

目前业界对数据中心还没有形成统一的定义,但基本形成了一个统一认识:数据中心绝不仅是一些设备的集合,而应该包含计算、存储、通信能力以及环境、安全等配套能力,可以通过内部的设备传递、处理、展示数据信息,最终服务于客户的数据服务系统。

(1) 数据中心的发展

传统数据中心正在向新型数据中心演进,使其具备高算力、高能效、高安全等特点。工业和信息化部在《新型数据中心发展三年行动计划(2021—2023 年)》中,对新型数据中心的定义为:以支撑经济社会数字转型、智能升级、融合创新为导向,以 5G、工业互联网、云计算、人工智能等应用需求为牵引,汇聚多元数据资源、运用绿色低碳技术、具备安全可靠能力、提供高效算力服务、赋能千行百业应用,与网络、云计算融合发展的新型基础设施。

新型数据中心包含云计算数据中心、边缘数据中心、绿色数据中心、智能计算中心以及超级计算中心等。云数据中心已成为算力资源的主流供应者;随着边缘计算的发展,部署在网络边缘、更靠近用户侧的边缘数据中心开始发展;在数据中心能力日益增强、规模越来越庞大的同时,其能耗问题也日益严重,“绿色数据中心”也成为数据中心发展的重要方向;智能计算中心和超级计算中心是新型数据中心的重要模式。

我国总体算力供需格局失衡,东部地区算力应用需求大,算力资源使用异常紧张,西部地区算力资源宽裕,通过“东数西算”工程,构建布局合理的算力数据中心,是未来我国数据中心发展的重要方向^[11]。数据中心能力将成为推动社会数字化发展进一步向前,推动社会产业变革,乃至重构全球竞争格局的关键力量。



(2) 基础数据中心

基础算力主要指基于 CPU 的服务器所提供的计算能力。基础数据中心以 CPU 芯片服务器为主, 提供混合精度 (32 位单精度为主) 的基础通用算力, 主要包含传统互联网数据中心 (Internet data center, IDC) 和云数据中心, 并向新型数据中心如边缘数据中心扩展。2020 年, 我国的基础算力在疫情防控中发挥了重要作用, 有效支撑了相关的数字平台、算法、应用的使用, 其中的“通信行程卡”截至 2021 年 8 月累计服务超 120 亿次, 成为各地疫情防控不可缺少的手段。随着人工智能 (artificial intelligence, AI)、物联网等技术的发展, 整体算力需求结构也在发生变革。基础算力比重在不断降低, 而智能算力与超算算力比重将会不断攀升^[2]。

(3) 智能计算中心

智能算力主要是基于 GPU、FPGA、ASIC 或其他加速器支撑的高并行、高密度计算能力的异构算力, 用于深度学习的半精度浮点算力数 (16 位) 计算是智能计算的主流^[2]。目前智能计算中心主要应用于多模态数据挖掘、智能化业务高性能计算、海量数据分布式存储调度、人工智能模型开发、模型训练和推理服务等场景。目前, 国内外都在加紧对智能计算中心的规划布局, 智能计算中心所产生的大规模生产算力将为智慧医疗、智慧城市、智慧交通等领域落地提供算法、算力和数据服务。

(4) 超级计算中心

超算算力主要指基于超级计算机等计算集群所提供的高性能计算能力。超级计算中心是指具有超级数据存储、处理能力, 能够提供超级计算服务的综合产业化基地, 可进行普通计算机无法完成的工作。超算芯片以 CPU 为主, 可含部分 GPU 加速器, 以提供双精度浮点数 (64 位) 计算能力为主。近些年, 世界各国纷纷加入超算中心布局; 我国超算中心发展迅猛, 目前已拥有 8 所国家级超级计算中心。在 2021 年 6 月最新一期全

球超算前 500 名的排行榜中, 中国以 186 台超算上榜, 上榜数量蝉联世界第一。可以说, 中国的超算水平在计算性能和规模方面都处于全球领先地位。

2 云计算技术现状与发展趋势

业界对于云计算的定义有很多, 其中一个比较统一的认识是, 云计算是一种以虚拟化、通信网络、分布式计算等技术为基础, 以按需分配、资源共享、灵活调整、网络接入为主要特点, 能够提供资源、平台、软件等服务的服务提供模式。

2.1 技术现状

2.1.1 云计算关键技术

(1) 虚拟化技术

虚拟化技术是云计算中最关键、最核心的技术。虚拟化技术是一种资源管理和优化技术, 将计算系统内各种实体资源如 CPU、内存、网络、存储等进行抽象, 消除原本物理资源壁垒, 通过软件的方法重新划分 IT 资源, 实现资源使用者对资源的共享、灵活调度。

计算虚拟化是虚拟化技术的主流方向, 指对服务器、个人计算机主机等计算设备进行虚拟化, 其核心是 Hypervisor, 一种运行在底层物理服务器与虚拟机操作系统之间的中间软件层, 可允许多个操作系统和应用程序共享硬件, 也称为虚拟机监视器 (virtual machine monitor, VMM)。如果将一台物理机进行虚拟化, 原物理机操作系统为 Host OS, 虚拟化出的虚拟机操作系统为 Guest OS。计算虚拟化技术 3 种典型实现架构^[12-13]如图 1 所示, 包括裸金属型架构、宿主型架构和操作系统型架构。

在云计算技术的加持下, 虚拟化技术正在发挥越来越显著的作用, 在医疗、教育、政府、企业等行业都有广泛应用。未来, 如何进一步地提升虚拟化技术的性能, 同时提升虚拟化平台的安

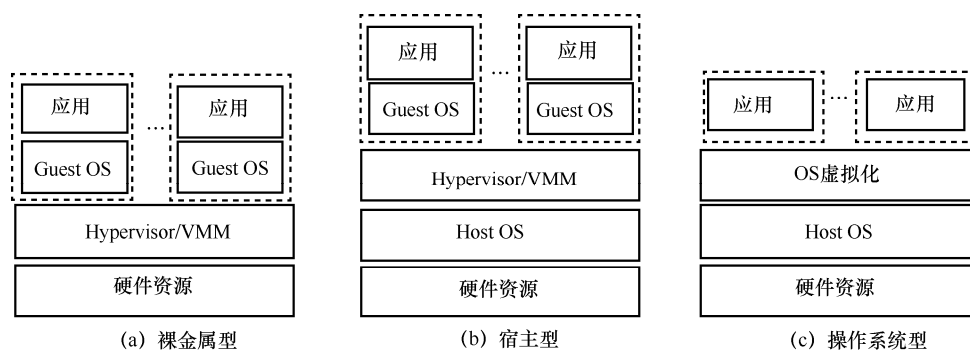


图1 计算虚拟化技术3种典型的实现架构

全性，将是虚拟化技术研究的主要关注点。

(2) 云原生技术

云原生技术是云计算未来的重要发展方向，主要基于容器、微服务、DevOps 三大技术实现。在云原生应用程序设计之初，设计者就考虑将其构建并部署应用于云环境，因此会充分利用云平台的弹性和分布式等优势。微服务是一种软件架构风格，专注于单一责任与功能的小型功能区块，利用模块化的方式组合得到复杂的大型应用程序，微服务为云原生提供松耦合的应用开发框架，使应用具有独立的迭代和部署能力。容器化是微服务的最佳载体，为应用程序提供了隔离的运行空间，每个容器内都包含一个独享的完整用户环境空间，可以为云原生提供一致性的应用环境，目前常用的工具有 Docker、Kubernetes 等。DevOps 将开发和运维整合，以使构建、测试、发布软件变得更快捷、频繁和可靠，可以在软件编码、集成、测试、发布、部署和运维的全生命周期中实现自动化，缩短软件开发周期，提高迭代效率，同时利用云平台设施实现弹性伸缩、动态调度、优化资源利用率。

云原生技术有利于各组织在公有云、私有云和混合云等新型动态环境中构建和运行可弹性扩展的应用。容器、微服务、DevOps 等技术使得云原生能够构建容错性好、易于管理和便于观察的松耦合系统。结合可靠的自动化手段，云原生技术可以实现系统频繁而可预测的重大变更。

2.1.2 云计算服务

云计算按照服务划分，普遍认可的分类为基础设施即服务（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）3 层，云计算服务模式如图 2 所示。

IaaS 在云计算服务层次上位于最底层，为用户提供计算、存储、网络等底层资源服务。OpenStack 是最常见的云基础资源管理平台。PaaS 位于 IaaS 层的上层。用户可根据平台层提供的开发语言、库、IT 组件等，构建所需的配置、应用环境和应用平台，而无须关心底层设施。SaaS 位于 PaaS 层的上层，通过互联网为用户提供软件应用服务，用户无须参与软件的安装、维护、更新等，只需按实际需求和实际使用情况付费。

随着应用需求的日益增多和云计算、AI、大数据等技术的发展，数据即服务（data as a service, DaaS）、AI 即服务（AI as a service, AIaaS）、算力即服务（computing power as a service, CPaaS）等 X 即服务（XaaS）的新型服务形式不断涌现。DaaS 是由数据沉淀、抽象、聚合而形成的新的服务形式，将海量分散数据转化为有价值的信息数据，为不同用户按需提供公共信息数据服务。AIaaS 旨在为用户提供成本更低廉的、基于 AI 技术的解决方案服务。CPaaS 通过网络将多方算力资源高效连接、灵活调度，将算力像电力一样为用户按需供给，随用随取。

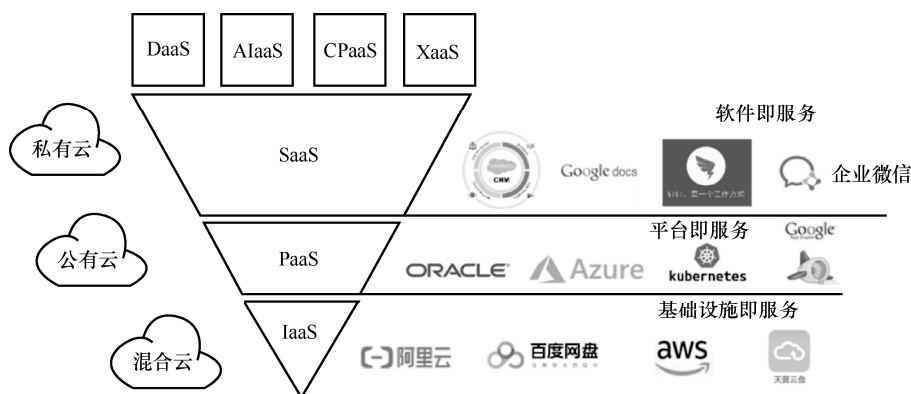


图2 云计算服务模式

2.2 发展趋势

未来云计算产业在应用、架构、技术等方面将发生变革。

(1) 应用方面

我国互联网和信息服务业云原生应用占比有下降趋势，而金融、政务、电信等垂直行业应用正加速发展。

(2) 架构方面

政府机构、企事业单位等上云趋势加速，预计到2023年，中国政府和大型企业上云率将超过60%^[8]，云网融合需求不断增强。2022年1月，国务院印发了《“十四五”数字经济发展规划》，明确提出推进云网协同和算网融合发展，云网融合成为建设数字信息基础设施的重要举措。随着边缘侧业务场景的丰富，边缘计算市场发展迅速，同时，云计算、边缘计算与网络之间实现融合，提供更优化的算力服务也成为重要的发展方向。

(3) 技术方面

云计算安全能力急需提升。传统的安全架构无法满足越来越高的云服务安全需求^[14]，改造或者升级现有的安全架构迫在眉睫，以信任机制为突破的安全体系开始在国内外兴起。另外，云原生技术在提升资源利用率、交付效率、简化运维等方面表现突出，云原生技术正快速发展，云原生架构规模化已显著提升。

3 边缘计算技术现状与发展趋势

2013年，美国太平洋西北国家实验室的Ryan LaMothe在其内部报告中首次提出“Edge Computing（边缘计算）”这一名词^[15]。目前，边缘计算仍处于发展阶段，业界对其的定义有很多种。2015年9月，欧洲电信标准组织（European Telecommunications Standards Institute, ETSI）发布的《移动边缘计算：一项通向5G的关键技术（Mobile Edge Computing: A Key Technology Towards 5G）》中指出^[16]：移动边缘计算在距离用户移动终端最近的无线接入网内提供信息技术服务环境以及云计算能力，旨在进一步减少时延，提高网络运营效率，提高业务分发/传送能力，优化/改善终端用户体验。2016年11月，边缘计算产业联盟（Edge Computing Consortium, ECC）发布了《边缘计算产业联盟白皮书》，将边缘计算定义为^[17]：边缘计算是在靠近物或数据源头的网络边缘侧，融合网络、计算、存储、应用核心能力的分布式开放平台，就近提供边缘智能服务，满足行业数字化在敏捷连接、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。2020年2月，国际标准化组织（International Organization for Standardization, ISO）和国际电工委员会（International Electrotechnical Commission, IEC）发布的技术报告（ISO/IEC TR 23188: 2020）中提到^[18]：边缘

计算是一种将主要处理和数据存储放在网络的边缘节点的分布式计算形式。当前业界基本认可边缘计算是在更靠近用户终端的网络边缘进行计算的服务与技术。

3.1 技术现状

目前, 业界广泛认为边缘计算有 3 种落地形态: 云边缘、边缘云和边缘网关^[19]。具体如下。

(1) 云边缘是云计算服务在边缘侧的延伸, 在逻辑上看仍然是云计算服务的一部分, 业务能力主要依靠云计算中心的数据处理、服务提供能力。

(2) 边缘云是在网络边缘侧构造的, 可以理解为在边缘侧云上进行的计算能力, 数据处理、服务提供等业务能力主要依靠边缘云。

(3) 边缘网关以云化能力重构传统嵌入式网关系统, 在边缘侧提供边缘计算、提供接口转换、通信连接等能力, 云侧部署控制器进行边缘节点的业务编排、资源调度等工作。

本文将边缘计算大体分为 3 层: 基础设施层、平台层和应用层, 其主要参与者有网络运营商、云服务提供商和应用提供商。边缘架构的架构体系^[20]如图 3 所示, 具体如下。

(1) 基础设施层主要包含边缘计算体系所需的物理资源和虚拟资源, 主要有计算资源、存储资源和网络资源, 并具有本地的资源管理能力(如设备管理、网络连接等)。主要参与者有云服务提供商和网络运营商。基础设施层为平台层提供底层基础设施资源。

(2) 平台层位于基础设施层之上, 抽象化底层资源并为上层应用提供部署所需的软/硬件环境。平台层可以提供的服务有行业特色类(如人脸识别、图像渲染等)、网络能力开放类(如定位服务、身份识别等)以及管理类(如路由规则、数据管理、DNS 等)。平台层的典型的参与者为云服务提供商。

(3) 应用层位于平台层之上, 为用户提供边缘应用服务, 其参与者有各行各业的应用提供商及云服务提供商。

3.2 发展趋势

边缘计算的发展趋势有如下几方面内容。

(1) 边缘计算的未来发展离不开云与边缘算力资源的协同发展。因为传统云计算与边缘计算并不是相互对立的, 边缘计算无法完全替代云计算, 两者属于互补关系, 在完成不同应用场景或者同一应用场景的不同任务方面各有侧重, 云边

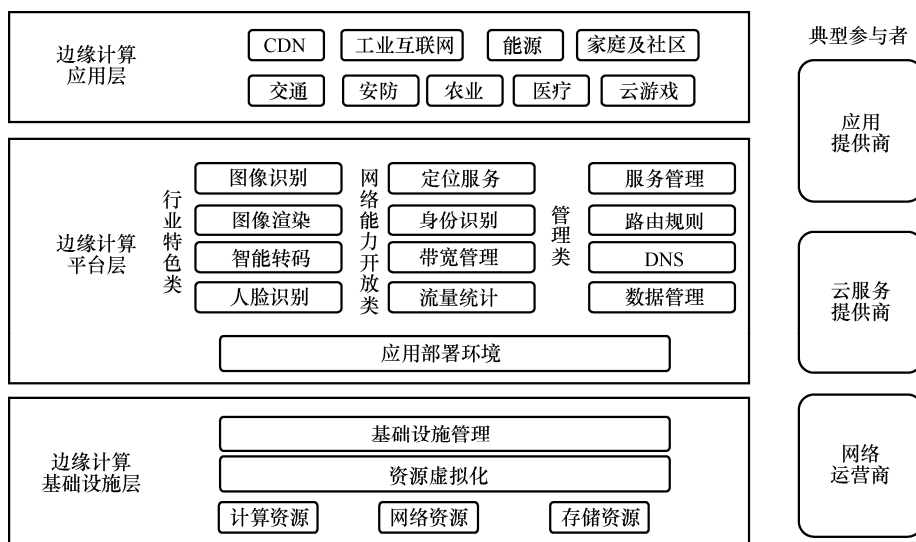


图3 边缘计算的架构体系^[20]



协同将发挥各自优势，最大化应用价值，同时构造更广泛的算力设施。

(2) 边缘计算的安全性问题值得关注。如何增加边缘计算分布式架构的安全性，提升边缘计算节点间、边缘与云之间、边缘与终端间的数据安全传输，以及如何有效地对敏感信息进行隐私保护都是重要的探讨方向。

(3) 网络与云-边-端多级算力深度融合也是未来的一大发展趋势。边缘计算离不开网络的支撑来满足其低时延特性。

(4) 满足数字化业务智能需求的边缘智能服务也是一个重点研究方向。

4 端计算技术现状与发展趋势

端指的是靠近用户的一端或者用户终端，端算力泛指各种用户终端设备所携带的计算能力。随着数字化技术的发展及网络通信功能的日益强大，终端设备越来越离不开人们的日常生活。典型的端计算设备从个人计算机、智能手机，到智能家居、智能可穿戴设备以及各种物联网终端设备，随处可见终端设备的身影。未来 10 年，物联网连接设备的数量预计将增长 3 倍，从 2019 年的约 110 亿台增长到 2030 年的约 300 亿台，端算力规模将极大增加^[21]。

4.1 技术现状

目前，存在两种类型的端计算架构：一是以

浏览器为核心的弱端或“瘦端计算”；二是“云-端计算”或“胖端计算”。谷歌提出的“瘦端计算”表示，最理想的端计算设备是一个纯粹的浏览器“瘦”客户机，甚至可以更“瘦”。终端只具备最基础的硬件设施和轻量级的操作系统，所需功能几乎都通过云端实现，终端本身通常只具备基础的显示或者初级的计算存储功能。与谷歌试图将所有计算和应用搬到“云”里不同，微软提出“云-端计算”的平衡理念：“云”和终端都承担一部分计算和应用，称为“胖端计算”。由于互联网化带来的计算革命，PC 功能和定义将发生很大改变，PC 将走向 PC+，个人计算能力也将被运用到手机、电视机、汽车、传感器等领域。计算的架构将从过去集中于 PC 或服务器的某一“端”走向“云+端”，即 Cloud+Client (“C+C”)。端计算可以减缓云计算在网络时延、数据丰富程度、隐私安全和算力成本等方面的不足^[22]。整体来看，云计算与端计算协同互补的“胖端计算”发展趋势越来越明显。

4.2 发展趋势

新型数字化应用场景中，云-边-端多级算力协同融合的架构将会发挥重要的作用，云-边-端算力融合场景如图 4 所示。云-边-端融合架构可以根据业务的特点和需求，使用云端强大的算力和海量存储的支持，同时可将部分时延敏感型业务部署到边缘侧或终端。

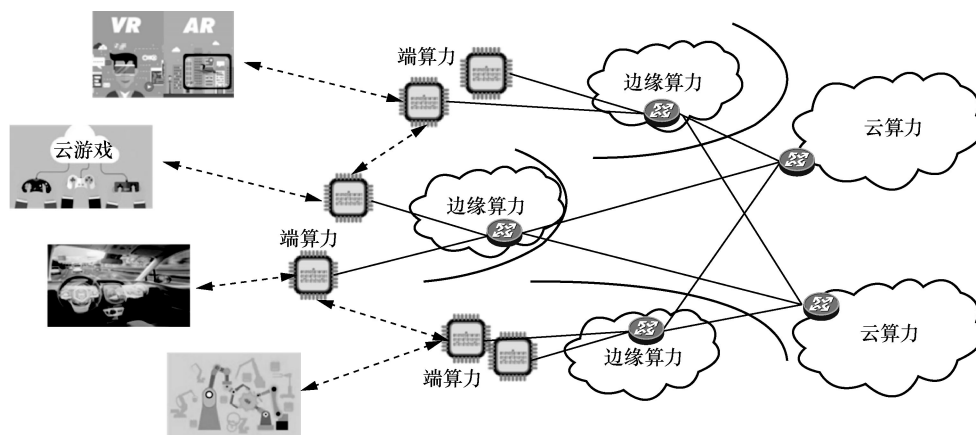


图 4 云-边-端算力融合场景

总体来看,云-边-端融合有以下 4 个方面的好处。

- 缓解数据量暴涨给传输和云端处理带来的压力,满足应用对端侧高响应、低时延的要求。
- 边端设备能够在本地收集和处理部分数据,而不再将数据传输到云端处理,敏感信息不需要经由网络传输,数据安全得到了保障。
- 将云、边缘、端侧算力结合,为数字化应用场景提供更广泛的算力基础设施。
- 云-边-端多级分布式算力依靠通信网络无缝协同,为应用提供更便捷的算力调度方式,算力网络化成为必然。算力网络化将改变算力供需结构,提高算力利用率,满足多级算力协同调度需求,为用户按需匹配所需算力资源^[23]。

5 量子计算技术现状与发展趋势

“量子力学之父”马克斯·普朗克(Max Planck)提出的能量子概念,量子物理世界的序幕就此展开。而同在 20 世纪,电子计算机的诞生对世界同样产生了巨大的影响。两个学科的交叉结合诞生了一个新学科——量子计算^[24]。量子计算是一种遵循量子力学规律调控量子信息单元进行计算的新型计算模式^[25]。

5.1 技术现状

经典计算使用经典比特,即二进制的 0 和 1 作为存储和运算的基本单元,每个计算单元(比特)总是处于 0 或 1 的确定状态。而量子计算的计算单元称为量子比特,它不仅有两个完全正交的状态 0 和 1,同时由于量子叠加特性,还有 0 和 1 同时存在的叠加态。这使得量子计算具有传统计算无法比拟的“超并行”的运算方式和超强的运算能力,量子计算已进入快速发展的新阶段。当前,超导量子计算体系发展迅速,已经达到百

量子比特的规模,率先实现超越经典计算的量子霸权。此外,离子阱量子体系、光量子计算体系、量子点量子计算体系、冷原子体系等也非常具有发展潜力^[25-26],具体如下。

(1) 超导量子基于超导量子电路,利用超导约瑟夫森结的量子特性,具有非常高的可扩展能力和设计加工自由度,操控也非常方便。超导量子比特调控速度可以在相干时间内实现几千个单比特门。超导量子计算机方案是目前国际上进展最快的方案,现有实现包括:谷歌公司的 Sycamore(悬铃木)、IBM 公司的具有 127 个量子比特的“鹰”、中国科学技术大学(简称中科大)的“祖冲之”等原型机,该技术路线在未来较易实现规模化。

(2) 离子阱量子比特基于离子(带电的原子)实现,通过在超高真空环境中使用电磁场将离子囚禁在阱里而形成量子比特。离子阱技术路线的优势在于相干性好,在所有量子计算候选系统中,其相干时间几乎最长,最高可达 10 min。此外,还有可纠缠量子比特数目多、逻辑门保真度高等优点。

(3) 光量子是除超导量子 and 离子阱之外研究进展较快的技术路线。我国光量子计算研究处于国际领先水平,中科大分别于 2020 年和 2021 年成功研制“九章”及“九章 2.0”。

(4) 半导体量子点计算机结合了当前的半导体工业技术,由于半导体量子比特体积较小,与超导技术和光量子技术等相比,更容易实现芯片化,因此在未来可以快速实现产业化。但是,当前半导体量子比特的数量较少,且相干性较弱,制约了该技术的进一步发展。

5.2 发展趋势

目前,物理学界普遍的共识是,量子计算机不可能完全取代经典计算机,但针对一些特定领域或特定任务,量子计算能比经典算法更快速、更有效地完成任务。目前的量子计算机只实现了“量子优越性”,距离实现通用还有很长的距离。



我国“十四五”规划明确提出，聚焦量子信息等领域组建国家级研发实验室，研制量子计算原型机与量子模拟机。量子计算已经成为全球新一轮科技竞争和产业发展变革的前沿阵地。

6 结束语

算力基础设施已成为科学技术革新和社会发展的坚实基础，是数字经济时代核心竞争力的体现。在未来社会，提高算力基础设施的算效水平、能效水平尤为重要，算力基础设施正在向着智能化、绿色化、高密度等方向发展。另外，推进多级算力、异构算力与信息通信网络的深度融合，促进算力资源全面覆盖，满足算力资源高效连接、按需分配、灵活调度，也是未来算力基础设施发展的重要方向。

参考文献：

- [1] IDC. 未来算力推动企业迈向数字化 2.0: 未来算力十大趋势[R]. 2021.
IDC. Computing power drives enterprises towards digital 2.0: ten trends of computing power in the future[R]. 2021.
- [2] 中国信息通信研究院. 中国算力发展指数白皮书[R]. 2021.
China Academy of Information and Communications Technology. White paper on China computing power development index[R]. 2021.
- [3] 吴文琪. 计算机中央处理器的研究[J]. 电子技术与软件工程, 2017(3): 157-158.
WU W Q. Research on central processing unit[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2017(3): 157-158.
- [4] 韩俊刚, 刘有耀, 张晓. 图形处理器的历史现状和发展趋势[J]. 西安邮电学院学报, 2011, 16(3): 61-64.
HAN J G, LIU Y Y, ZHANG X. GPU: the past, present and future[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2011, 16(3): 61-64.
- [5] 刘焰强, 戚正伟, 管海兵. FPGA 加速系统开发工具设计: 综述与实践[J]. 软件学报, 2020, 31(10): 3087-3099.
LIU Y Q, QI Z W, GUAN H B. FPGA acceleration system development tools: survey and practice[J]. Journal of Software, 2020, 31(10): 3087-3099.
- [6] 中国科学院计算技术研究所等. 专用数据处理单元 (DPU) 技术白皮书[R]. 2021.
Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, et al. Technical white paper of data processing unit[R]. 2021.
- [7] 陈寒冰. 数字经济时代算力网络建构的国际比较与镜鉴[J]. 新疆社会科学, 2021(5): 56-65.
CHEN H B. International comparison and mirror of computing power network construction in digital economy era[J]. Social Sciences in Xinjiang, 2021(5): 56-65.
- [8] 国务院发展研究中心国际技术经济研究所. 中国云计算产业发展白皮书[R]. 2019.
Institute of International Technology and Economy, Development Research Center of The State Council. White paper on the development of cloud computing industry in China [R]. 2019.
- [9] Statcounter. Operating System Market Share[EB]. 2021.
- [10] 中国电子信息产业发展研究院(赛迪). 先进计算产业发展白皮书[R]. 2021.
China Center for Information Industry Development. White paper on the development of advanced computing industry [R]. 2021.
- [11] IDC. 算力西移下数据中心发展新格局[R]. 2021.
IDC. New Pattern of data center development under the shift of computing power to the west[R]. 2021.
- [12] 周文繁, 尹培培. 虚拟化技术研究综述[J]. 有线电视技术, 2019, 26(5): 41-44.
ZHOU W C, YIN P P. Overview of virtualization technology research[J]. CATV Technology, 2019, 26(5): 41-44.
- [13] 修长虹, 梁建坤, 辛艳. 虚拟化技术综述[J]. 网络安全技术与应用, 2016(5): 18-19.
XIU C H, LIANG J K, XIN Y. Overview of virtualization technology[J]. Network Security Technology & Application, 2016(5): 18-19.
- [14] 中国信息通信研究院. 云计算白皮书[R]. 2021.
China Academy of Information and Communications Technology. White Paper on cloud computing [R]. 2021.
- [15] 施巍松, 张星洲, 王一帆, 等. 边缘计算: 现状与展望[J]. 计算机研究与发展, 2019, 56(1): 69-89.
SHI W S, ZHANG X Z, WANG Y F, et al. Edge computing: state-of-the-art and future directions[J]. Journal of Computer Research and Development, 2019, 56(1): 69-89.
- [16] ETSI. Mobile edge computing: a key technology towards 5G[R]. 2015.
- [17] 边缘计算产业联盟. 边缘计算产业联盟白皮书[R]. 2016.
Edge Computing Consortium. White paper of edge computing consortium[R]. 2016.
- [18] ISO. 2020(en): Information technology — cloud computing — edge computing landscape: ISO/IEC TR 23188[S]. 2020.
- [19] 边缘计算产业联盟. 边缘计算与云计算协同白皮书 2.0[R]. 2020.
Edge Computing Consortium. Edge computing and cloud computing collaboration version 2.0[R]. 2020.
- [20] 雷波, 陈运清. 边缘计算与算力网络: 5G+AI 时代的新型算力平台与网络连接[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
LEI B, CHEN Y Q. Edge computing and computing power

- network—a new computing power platform and network connection in the era of 5G+AI[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.
- [21] 广东省新一代通信与网络创新研究院, 清华大学, 北京邮电大学, 等. 6G 无线热点技术研究白皮书[R]. 2020. Guangdong Communications & Networks Institute, Tsinghua University, Beijing University of Posts and Telecommunications, et al. White paper on wireless hotspot technology research of 6G[R]. 2020.
- [22] 彭晓晖, 张星洲, 王一帆, 等. Web 使能的物端计算系统[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(3): 572-584. PENG X H, ZHANG X Z, WANG Y F, et al. Web enabled things computing system[J]. Journal of Computer Research and Development, 2018, 55(3): 572-584.
- [23] 赵倩颖, 邢文娟, 雷波, 等. 一种基于域名解析机制的算力网络实现方案[J]. 电信科学, 2021, 37(10): 86-92. ZHAO Q Y, XING W J, LEI B, et al. A solution of computing power network based on domain name resolution[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(10): 86-92.
- [24] 吴楠, 宋方敏, Xiangdong LI. 通用量子计算机: 理论与组成与实现[J]. 计算机学报, 2016, 39(12): 2429-2445. WU N, SONG F M, LI X D. Universal quantum computer: theory, organization and implementation[J]. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(12): 2429-2445.
- [25] 龙桂鲁. 量子计算机的研发进展与未来展望[J]. 人民论坛·学术前沿, 2021(7): 44-56. LONG G L. The development and prospect of quantum computer[J]. Frontiers, 2021(7): 44-56.
- [26] 付震宇, 刘凌旗, 陈羽臻, 等. 量子计算技术发展路线与趋势分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(8): 813-819.

FU Z Y, LIU L Q, CHEN Y Z, et al. Development route and trend analysis of quantum computing technology[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2021, 16(8): 813-819.

[作者简介]



邢文娟 (1989—), 女, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要研究方向为未来网络、算力网络等。



雷波 (1980—), 男, 中国电信股份有限公司研究院正高级工程师, 主要研究方向为未来网络架构、新型 IP 网络技术等。



赵倩颖 (1991—), 女, 中国电信股份有限公司研究院工程师, 主要研究方向为未来网络、算力网络等。