

DOI ：10.12142/ZTETJ.201903001

网 络 出 版 地 址 ：<http://kns.cnki.net/kcms/detail/>34.1228.TN.20190605.1023.002.html

网 络 出 版 日 期 ：2019-06-05

收 稿 日 期 ：2018-12-27



1

2

3

思

[2]

边 缘计 算 综述 ： 应 用、现 状 及挑 战 Edge Computing: Applications, State-of-the-Art and Challenges

丁 春 涛 /DING Chuntao ，曹建农 /CAO Jiannong ，杨磊/YANG Lei ，王尚广 /WANG Shangguang （1. 北 京 邮 电 大 学 ，北京 100876 ； 2. 香 港 理 工 大 学 ，香港 999077 ； 3. 华 南 理 工 大 学 ，广东 广 州 510006 ）

(1. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Hong Kong Polytechnic University, Hongkong 999077 ，China; 3. South China University of Technology,

Guangzhou 510006 ，China)

摘 要 ：通过 对 边 缘 计 算 概 念 、典型 应 用 场 景 、研究 现 状 及 关 键 技 术 等 系 统 性 的 介 绍 ，认为 边

缘 计 算 的 发 展 还 处 在 初 级 阶 段 ，在实 际 的 应 用 中 还 存 在 很 多 问 题 需 要 解 决 研 究 ，包括 优 化

边 缘 计 算 性 能 、安全 性 、互操 作 性 以 及 智 能 边 缘 操 作 管 理 服 务 。

关 键 词 ：边缘 计 算 ；安全 性 ；互操 作 性

Abstract : Through the systematic introduction of the concept of edge computing, typical

application scenarios, research status and key technologies, we believe that the

development of edge computing is still in its early stage, and there are still many problems

in practical applications that need to be solved, including optimization of edge computing

performance, security, interoperability, and intelligent edge operations management

services.

Key words: edge computing; security; interoperability

1

科 在 2016—2021 年 的全球 云 指 数 中 指 出 ：接 入 互 联 网 的

设备数量将从 2016 的 171 亿增加到 271 亿 。 每 天 产 生 的 数 据 量 也 在 激 增 ，全 球 的 设 备 产 生 的 数 据 量 从 2016 年 的 218 ZB 增 长 到 2021 年 的 847 ZB。传统的云计算模型是将所 有 数 据 通 过 网 络 上 传 至 云 计 算 中 心 ，利用 云 计 算 中 心 的 超 强 计 算 能 力 来 集 中 解 决 应 用 的 计 算 需 求 问 题 。 然 而 ，云计 算 的 集 中 处 理 模 式 在万物互联的背景下有 3 点不足。

（1）万 物 互联 实 时 性 需 求 。 万 物 互 联 环 境 下 ，随着 边 缘 设 备 数 量

的 增 加 ，这些 设 备 产 生 的 数 据 量 也 在 激 增 ，导致 网 络 带 宽 逐 渐 成 为 了 云 计 算 的 一 个 瓶 颈 。 例 如 文 献 [1] 指 出 ：波 音 787 每 秒 产 生 的 数 据 量 超 过 5 GB，但飞 机 与 卫 星 之 间 的 带 宽不足以支持实时数据传输。

1. 数 据 安 全与 隐 私 。 随 着 智 能 家 居 的 普 及 ，许多 家 庭 在 屋 内 安 装 网 络 摄 像 头 ，直接 将 摄 像 头 收 集 的视频数据上传至云计算中心会增 加泄露用户隐私数据的风险。
2. 能 耗 较 大。 随 着 在 云 服 务 器 运 行 的 用 户 应 用 程 序 越 来 越 多 ， 未来大规模数据中心对能耗的需求

将难以满足。现有的关于云计算中 心的能耗研究主要集中在如何提高 能 耗 使 用 效 率 方 面 。 然 而 ，仅 提 高 能 耗 使 用 效 率 ，仍不 能 解 决 数 据 中 心 巨 大 的 能 耗 问 题 ，这在 万 物 互 联环境下将更加突出。

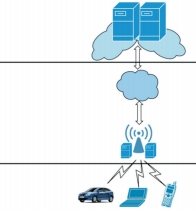
针 对 于此 ，万物互 联应 用需 求 的发展催生了边缘计算模型。边缘 计算模型是指在网络边缘执行计算 的一种新型计算模型。边缘计算模 型中边缘设备具有执行计算和数据 分 析 的 处 理 能 力 ，将原 有 云 计 算 模 型执行的部分或全部计算任务迁移 到 网 络 边 缘 设 备 上 ，降低 云 服 务 器

02

中 兴 通 讯 技 术

2019 年 6 月 第 25 卷 第 3 期

Jun. 2019 Vol. 25 No. 3



[1]

[3]

丁 春 涛 等

边 缘 计 算 综 述 ：应用、现状及 挑 战 ZTE TECHNOLOGYJOURNAL

专 题

的计算负载，减缓网络带宽的压力， 提 高 万 物 互 联 时 代 数 据 的 处 理 效 率 。 边 缘 计 算 并 不 是 为 了 取 代 云 ， 而是对云的补充，为移动计算、物联 网等相关技术提供一个更好的计算 平台。

边缘计算模型成为新兴万物互 联 应 用 的 支 撑 平 台 ，目前 已 是 大 势 所趋。本文中，我们从概念、关键技 术、典型应用、现状趋势和挑战等几 个方面对边缘计算的模型展开详细 介 绍 ，旨在 为 边 缘 计 算 研 究 者 提 供 参考。

1 边 缘 计 算 的 概 念

对 于 边缘 计算 ，不同的 组织 给 出了不同的定义。美国韦恩州立大 学计算机科学系的施巍松等人把边 缘计算定义为：“边缘计算是指在网 络边缘执行计算的一种新型计算模 式 ，边缘 计 算 中 边 缘 的 下 行 数 据 表 示 云 服 务 ，上行 数 据 表 示 万 物 互 联 服 务 ” 。 边 缘 计 算 产 业 联 盟 把 边 缘计算定义为：“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 开发平台，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”。

因 此，边缘 计 算 是 一 种 新 型 计 算 模 式 ，通过 在 靠 近 物 或 数 据 源 头 的 网 络 边 缘 侧 ，为应 用 提供融 合 计 算 、存 储 和 网 络 等 资 源 。 同 时 ，边 缘 计 算 也 是 一 种 使 能 技 术 ，通过 在 网 络 边 缘 侧 提 供 这 些 资 源 ，满足 行 业 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。

1.1 边 缘 计 算 的 体 系 架 构

边缘计算通过在终端设备和云 之 间 引 入 边 缘 设 备 ，将云 服 务 扩 展 到网络边缘。边缘计算架构包括终 端 层 、边缘 层 和 云 层 。 图 1 展 示 了 边缘计算的体系架构。接下来我们 简要介绍边缘计算体系架构中每层 的组成和功能。

1. 终 端 层 。 终 端 层 是 最 接 近 终 端 用 户 的 层 ，它由 各 种 物 联 网 设 备 组 成 ，例如传 感 器 、智能手 机 、智 能车辆、智能卡、读卡器等。为了延 长 终 端 设 备 提 供 服 务 的 时 间 ，则应 该避免在终端设备上运行复杂的计 算 任 务 。 因 此 ，我们 只 将 终 端 设 备 负 责 收 集 原 始 数 据 ，并上 传 至 上 层 进行计算和存储。终端层连接上一 层主要通过蜂窝网络。
2. 边 缘 层 。 边 缘 层 位 于 网 络 的边缘，由大量的边缘节点组成，通 常 包 括 路 由 器 、网关 、交换机 、接入 点、基站、特定边缘服务器等。这些 边缘节点广泛分布在终端设备和云 层 之 间 ，例如咖 啡 馆 、购物中 心 、公 交总站、街道、公园等。它们能够对

云 层

核 心 网

边 缘 层

终 端 层

▲ 图 1 边 缘 计 算 体 系 结 构

终端设备上传的数据进行计算和存 储。由于这些边缘节点距离用户距 离 较 近 ，则可 以 为 运 行 对 延 迟 比 较 敏 感 的 应 用 ，从而 满 足 用 户 的 实 时 性要求。边缘节点也可以对收集的 数 据 进 行 预 处 理 ，再把 预 处 理 的 数 据 上 传 至 云 端 ，从而 减 少 核 心 网 络 的传输流量。边缘层连接上层主要 通过因特网。

（3）云 层 。云 层 由 多 个 高 性 能 服 务 器 和 存 储 设 备 组 成 ，它具 有 强 大 的 计 算 和 存 储 功 能 ，可以 执 行 复 杂的计算任务。云模块通过控制策 略可以有效地管理和调度边缘节点 和 云 计 算 中 心 ，为用 户 提 供 更 好 的 服务。

1.2 边 缘 计 算 的 范 例

与 边 缘计 算类 似 的范 例，如雾 计算、移动边缘计算等，虽然与边缘 计算不尽相同，但它们在动机、节点 设 备 、节点 位 置 等 上 与 边 缘 计 算 范 例 类 似 。 协 同 边 缘 计 算 是 一 种 新 的 计 算 范 例 ，它使 用 边 缘 设 备 和 路 由器的网状网络来实现网络内的分 布式决策。决策是在网络内部通过 在边缘设备之间共享数据和计算而 不是将所有数据发送到集中式服务 器来完成的。这与通常执行集中计 算 的 现 有 计 算 范 例 不 同 ，并且 诸 如 网关的边缘设备仅用于收集数据并 将 数 据 发 送 到 服 务 器 以 进 行 处 理 。 边缘计算与协同边缘计算的对比如 表 1 所示。

1.3 边 缘 计 算 的 优 势

边缘计算模型将原有云计算中 心的部分或全部计算任务迁移到数

2019 年 6 月 第 25 卷 第 3 期

中 兴 通 讯 技 术 Jun. 2019 Vol. 25 No. 3

03

边 缘 计 算

协 同 边 缘 计 算

节 点 设 备

软 件 架 构

邻 近 跳 数

节 点 之 间 通 信

路 由 器 、交换 机 、网关

基 于 移 动 协 调 器

一 跳 或 多 跳

支 持

基 站 的 服 务 器

基 于 移 动 协 调 器

一 跳

支 持

[4,5]

[6]

专 题

边 缘 计 算 综 述 ：应用、现状及 挑 战 ZTE TECHNOLOGYJOURNAL

▼ 表 1 边 缘 计 算 与 协 同 边 缘 计 算 比 较

丁 春 涛 等

将介绍基于边缘计算框架设计的几 个 新 兴 应 用 场 景 ，部分 场 景 在 欧 洲

动 机

支 持 物 联 网 应 用 程 序 的 移 动 性 、 位 置 感 知 和 低 延 迟

允 许 多 个 服 务 提 供 商 合 作 和 共 享 数 据

电信标准化协会（ETSI）白皮书中进 行 了 讨 论 ，如视 频 分 析 和 移 动 大 数

据。还有一些综述论文 介绍了车

节 点 位 置

情 境 感 知

访 问 机 制

从 终 端 设 备 到 云

中

蓝 牙 、Wi-Fi 、移动 网 络

基 站

高

移 动 网 络

辆 互 联 、医疗保 健 、智能建 筑 控 制 、 海洋监测以及无线传感器和执行器 网络与边缘计算结合的场景。

（1）医 疗 保健 。 边 缘 计 算 可 以

据 源 附 近 ，相比 于 传 统 的 云 计 算 模 型 ，边缘 计 算 模 型 具 有 实 时 数 据 处 理 和 分 析 、安全性 高 、隐私 保 护 、可 扩 展 性 强 、位置 感 知 以 及 低 流 量 的 优势。

1. 实 时 数 据处 理 和 分 析 。 将 原有云计算中心的计算任务部分或 全 部 迁 移 到 网 络 边 缘 ，在边 缘 设 备 处 理 数 据 ，而不 是 在 外 部 数 据 中 心 或 云 端 进 行 ；因此 提 高 了 数 据 传 输 性能，保证了处理的实时性，同时也 降低了云计算中心的计算负载。
2. 安 全 性 高。 传 统 的 云 计 算 模 型 是 集 中 式 的 ，这使 得 它 容 易 受 到分布式拒绝服务供给和断电的影 响。边缘计算模型在边缘设备和云 计 算 中 心 之 间 分 配 处 理 、存储 和 应 用 ，使得 其 安 全 性 提 高 。 边 缘 计 算 模型同时也降低了发生单点故障的 可能性。
3. 保护隐私数据，提升数据安 全性。边缘计算模型是在本地设备 上处理更多数据而不是将其上传至 云 计 算 中 心 ，因此 边 缘 计 算 还 可 以 减少实际存在风险的数据量。即使 设 备 受 到 攻 击 ，它也 只 会 包 含 本 地 收 集 的 数 据 ，而不 是 受 损 的 云 计 算

中心。

1. 可 扩 展 性。 边 缘 计 算 提 供 了 更 便 宜 的 可 扩 展 性 路 径 ，允许 公 司通过物联网设备和边缘数据中心 的组合来扩展其计算能力。使用具 有处理能力的物联网设备还可以降 低 扩 展 成 本 ，因此 添 加 的 新 设 备 都 不会对网络产生大量带宽需求。
2. 位 置 感 知。 边 缘 分 布 式 设 备利用低级信令进行信息共享。边 缘计算模型从本地接入网络内的边 缘 设 备 接 收 信 息 以 发 现 设 备 的 位 置 。 例 如 导 航 ，终端 设 备 可 以 根 据 自己的实时位置把相关位置信息和 数 据 交 给 边 缘 节 点 来 进 行 处 理 ，边 缘节点基于现有的数据进行判断和 决策。
3. 低 流 量 。 本 地 设 备 收 集 的 数 据 可 以 进 行 本 地 计 算 分 析 ，或者 在 本 地 设 备 上 进 行 数 据 的 预 处 理 ， 不必把本地设备收集的所有数据上 传 至 云 计 算 中 心 ，从而 可 以 减 少 进 入核心网的流量。

2 边 缘 计 算 的 典 型 应 用

边缘计算在很多应用场景下都 取 得 了 很 好 的 效 果 。 本 节 中 ，我们

辅 助 医 疗 保 健 ，例如 可 以 针 对 患 有 中风的患者辅助医疗保健。研究人 员 最近 提出 了一 种名 为 U-fall 的智 能 医 疗 基 础 设 施 ，它通 过 采 用 边 缘 计 算 技 术 来 利 用 智 能 手 机 。 在 边 缘 计算的辅助 下 ，U-fall 借 助智 能 设备传感器实时感应运动检测。边 缘计算还可以帮助健康顾问协助他 们 的 病 人 ，而不 受 其 地 理 位 置 的 影 响。边缘计算使智能手机能够从智 能 传 感 器 收 集 患 者 的 生 理 信 息 ，并 将 其 发 送 到 云 服 务 器 以 进 行 存 储 、 数据同步以及共享。

1. 视 频 分 析。 在 万 物 联 网 时 代 ，用于 监 测 控 制 的 摄 像 机 无 处 不 在 ，传统的 终端 设备 —— 云服 务 器 架构可能无法传输来自数百万台终 端 设 备 的 视 频 。 在 这 种 情 况 下 ，边 缘计算可以辅助基于视频分析的应 用 。 在 边 缘 计 算 辅 助 下 ，大量 的 视 频 不 用 再 全 部 上 传 至 云 服 务 器 ，而 是在靠近终端设备的边缘服务器中 进 行 数 据 分 析 ，只把 边 缘 服 务 器 不 能处理的小部分数据上传至云计算 中心即可。
2. 车 辆 互 联。 通 过 互 联 网 接 入 为 车 辆 提 供 便 利 ，使其 能 够 与 道 路上的其他车辆连接。如果把车辆 收集的数据全部上传至云端处理会

04

中 兴 通 讯 技 术

2019 年 6 月 第 25 卷 第 3 期

Jun. 2019 Vol. 25 No. 3

[7]

丁 春 涛 等

边 缘 计 算 综 述 ：应用、现状及 挑 战 ZTE TECHNOLOGYJOURNAL

专 题

造 成 互 联 网 负 载 过 大 ，导致 传 输 延 迟，因此，需要边缘设备其本身具有 处 理 视频 、音 频 、信 号 等 数 据的 能 力。边缘计算可以为这一需要提供 相 应 的 架 构 、服务、支持 能 力 ，缩短 端到端延迟，使数据更快地被处理， 避免信号处理不及时而造成车祸等 事故。一辆车可以与其他接近的车 辆 通 信 ，并告 知 他 们 任 何 预 期 的 风 险或交通拥堵。

1. 移 动 大 数据 分 析 。 无 处 不 在的移动终端设备可以收集大量的 数据，大数据对业务至关重要，因为 它可以提取可能有益于不同业务部 门的分析和有用信息。大数据分析 是从原始数据中提取有意义的信息 的过程。在移动设备附近实施部署 边缘服务器可以通过网络高带宽和 低 延 迟 提 升 大 数 据 分 析 。 例 如 ，首 先在附近的边缘服务器中收集和分 析 大 数 据 ，然后 可 以 将 大 数 据 分 析 的结果传递到核心网络以进一步处 理，从而减轻核心网络的压力。
2. 智 能 建 筑控 制 。 智 能 建 筑 控制系统由部署在建筑物不同部分 的无线传感器组成。传感器负责监 测和控制建筑环境，例如温度、气体 水 平 或 湿 度 。 在 智 能 建 筑 环 境 中 ， 部署边缘计算环境的建筑可以通过 传感器共享信息并对任何异常情况 做出反应。这些传感器可以根据其 他无线节点接收的集体信息来维持 建筑气氛。
3. 海 洋 监 测控 制 。 科 学 家 正 在研究如何应对任何海洋灾难性事 件 ，并提 前 了 解 气 候 变 化 。 这 可 以 帮 助 人 们 快 速 采 取 应 对 措 施 ，从而 减 轻 灾 难 性 事 件 造 成 的 严 重 后 果 。

部署在海洋中某些位置的传感器大 量 传 输 数 据 ，这需 要 大 量 的 计 算 资 源和存储资源。而利用传统的云计 算中心来处理接收到的大量数据可 能会导致预测传输的延迟。在这种 情 况 下 ，边缘 计 算 可 以 发 挥 重 要 作 用 ，通过 在 靠 近 数 据 源 的 地 方 就 近 处 理 ，从而 防 止 数 据 丢 失 或 传 感 器 数据传输延迟。

1. 智 能 家 居。 随 着 物 联 网 技 术 的 发 展 ，智能 家 居 系 统 得 到 进 一 步 发 展 ，其利 用 大 量 的 物 联 网 设 备 实 时 监 测 控 制 家 庭 内 部 状 态 ，接收 外部控制命令并最终完成对家居环 境的调控，以提升家居安全性、便利 性 、舒适 性 。 由 于 家 庭 数 据 的 隐 私 性 ，用户 并 不 总 是 愿 意 将 数 据 上 传 至 云 端 进 行 处 理 ，尤其 是 一 些 家 庭 内部视频数据。而边缘计算可以将 家 庭 数 据 处 理 推 送 至 家 庭 内 部 网 关，减少家庭数据的外流，降低数据 外泄的可能性，提升系统的隐私性。
2. 智慧城市。预测显示：一个 百万人口的城市每天将可能会产生 200 PB 的 数 据 。 因 此 ，应 用 边 缘 计 算 模 型 ，将数 据 在 网 络 边 缘 处 理 是 一 个 很 好 的 解 决 方 案 。 例 如 ，在 城 市 路 面 检 测 中 ，在道 路 两 侧 路 灯 上 安 装 传 感 器 收 集 城 市 路 面 信 息 ， 检测空气质量、光照强度、噪声水平 等 环 境 数 据 ，当路 灯 发 生 故 障 时 能 够 即 时 反 馈 给 维 护 人 员 ，同时 辅 助 健康急救和公共安全领域。

3 边 缘 计 算 现 状 和 关 键技 术 目 前 ，边缘计 算 的 发展仍 然处

于初期阶段。随着越来越多的设备 联 网 ，边缘 计 算 得 到 了 来 自 工 业 界

和 学 术 界 的 广 泛 重 视 和 一 致 认 可 。 本 节 中 ，我们 主 要 从 工 业 界 和 学 术 界的角度介绍边缘计算的现状。

3.1 工 业 界

在工业界中，亚马逊、谷歌和微 软等云巨头正在成为边缘计算领域 的 领 先 者 。 亚 马 逊 的 AWS Greengrass 服 务 进 军 边 缘 计 算 领 域 ，走 在 了 行 业 的 前 面 。 AWS Greengrass 将 AWS 扩 展 到 设 备 上， 这样本地生成的数据就可以在本地 设备上处理。微软在这一领域也有 大 动 作 ，该公 司计 划 未 来 4 年 在 物 联 网领 域投入 50 亿美元 ，其中 包括 边 缘计 算项目 。谷歌 宣布了 2 款 新 产 品 ，意在 帮 助 改 善 边 缘 联 网 设 备 的 开 发 。 它 们 分 别 是 硬 件 芯 片 Edge 张 量 处 理 单 元（TPU）和 软 件 堆 栈 Cloud 物 联 网（IoT）Edge。涉 足 边缘 计算领 域的并 不只是 这 3 大 云 巨 头。2015 年 ，思科 、ARM、英特 尔、微软、普林斯顿大学联合成立了 开 放 雾 计 算（OpenFog）联 盟 ；2016 年 11 月 30 日，在北京正式成立了产 学 研 结 合 的 边 缘 计 算 产 业 合 作 平 台 ，推动 运 行技术（OT）和 信 息与通 信技术（ICT）产业开放协作，引领边 缘 计 算 产 业 蓬 勃 发 展 ，深化 行 业 数 字化转型。

3.2 学 术 界

学术界也展开了关于边缘计算 的 研 究 ，边缘 计 算 顶 级 年 会 电 气 和 电 子 工 程 师 协 会（IEEE）/国 际 计 算 机 协 会（ACM）边 缘 计 算 研 讨 会 （SEC）、IEEE 国 际 分布式 计 算 系 统 会 议（ICDCS）、国际 计 算 机通 信 会

2019 年 6 月 第 25 卷 第 3 期

中 兴 通 讯 技 术 Jun. 2019 Vol. 25 No. 3

05

[5]

专 题

边 缘 计 算 综 述 ：应用、现状及 挑 战 ZTE TECHNOLOGYJOURNAL

丁 春 涛 等

议（INFOCOM）等 重 大 国 际 会 议 都 开始增加边缘计算的分会和专题研 讨会。涉及主要关键技术及研究热 点如下：

1. 计 算 卸载。 计 算 卸载 是 指 终端设备将部分或全部计算任务卸 载 到 资 源 丰 富 的 边 缘 服 务 器 ，以解 决 终 端 设 备 在 资 源 存 储 、计算 性 能 以及能效等方面存在的不足。计算 卸载的主要技术是卸载决策。卸载 决策主要解决的是移动终端如何卸 载 计 算 任 务 、卸载 多 少 以 及 卸 载 什 么的问题。根据卸载决策的优化目 标将计算卸载分为以降低时延为目 标 、以降 低 能 量 消 耗 为 目 标 以 及 权 衡能耗和时延为目标的 3 种类型。
2. 移 动 性 管理 。 边 缘 计 算 依 靠资源在地理上广泛分布的特点来 支 持 应 用 的 移 动 性 ，一个 边 缘 计 算 节点只服务周围的用户。云计算模 式对应用移动性的支持则是服务器 位 置 固 定 ，数据 通 过 网 络 传 输 到 服 务 器 ，所以 在 边 缘 计 算 中 应 用 的 移 动 管 理 是 一 种 新 模 式 。 主 要 涉 及 2 个问题：资源发现，即用户在移动的 过程中需要快速发现周围可以利用 的 资 源 ，并选 择 最 合 适 的 资 源 。 边 缘计算的资源发现需要适应异构的 资 源 环 境 ，还需 要 保 证 资 源 发 现 的 速 度 ，才能 使 应 用 不 间 断 的 为 用 户 提 供 服 务 。 另 一 个 问 题 是 资 源 切 换，即当用户移动时，移动应用使用 的计算资源可能会在多个设备间切 换。资源切换要将服务程序的运行 现 场 迁 移 ，保证 服 务 连 续 性 是 边 缘 计算研究的一个重点。一些应用程 序期望在用户位置改变之后继续为 用户提供服务。边缘计算资源的异

构 性 与 网 络 的 多 样 性 ，需要 迁 移 过 程自适应设备计算能力与网络带宽 的 变 化 。 文 献 [8] 中 ，作者通过 选 择 性地将虚拟机迁移到最佳位置来优 化迁移增益和迁移成本间的权衡。

除 了 以 上 2 个 关 键 技术 ，边 缘 计 算 研 究 热 点 还 包 括 网 络 控 制 、内 容缓存、内容自适应、数据聚合以及 安 全 卸 载 等 问 题 。 在 网 络 控 制 方 面 ，文献[9] 的 作 者 提 出 了 一 种 有 效 的 工 作 负 载 切 片 方 案 ，用户 使 用 软 件定义网络处理多边缘云环境中的 数据密集型应用程序。在内容缓存 方 面 ，文 献[10] 的 作 者 提 出 了 一 种 用于自动驾驶服务的两级边缘计算 框 架 ，以便 充 分 利 用 无 线 边 缘 的 智 能来协调内容传输。在内容适应方 面 ，文 献 [11] 的 作 者介 绍 了 一 种 用 于 在 多 用 户 移 动 网 络 中 优 化 基 于 HTTP 的 多 媒 体 传 送 的 新 颖 架 构 。 在 数 据 聚 合 方 面 ，文 献 [12] 的 作 者 提 出 了 混 合 整 数 规 划 公 示 和 算 法 ， 用于物联网边缘网络中传感器测量 数据的能量最优路由和多宿聚合问 题 ，以及 联 合 聚 合 和 传 播 。 在 安 全 卸 载 方 面 ，文 献 [13] 的 作 者 提 出 了 一 种 名 为 MECPASS 的 新 型 协 作 DoS 防 御架 构 ，以减 轻 来 自 移 动 设 备的攻击流量。

4 挑 战

目前边缘计算已经得到了各行 各 业 的 广 泛 重 视 ，并且 在 很 多 应 用 场 景 下 开 花 结 果 ；但边 缘 计 算 的 实 际 应 用 还 存 在 很 多 问 题 需 要 研 究 。 本 文 中 ，我们 对 其 中 的 几 个 主 要 问 题 进 行 分 析 ，包括 优 化 边 缘 计 算性能、安全性、互操作性以及智能

边缘操作管理服务。

1. 优 化 边 缘计 算 性 能 。 在 边 缘 计 算 架 构 中 ，不同 层 次 的 边 缘 服 务 器 所 拥 有 的 计 算 能 力 有 所 不 同 ， 负载分配将成为一个重要问题。用 户 需 求 、延时、带宽 、能耗及 成本 是 决定负载分配策略的关键指标。针 对 不 同 工 作 负 载 ，应设 置 指 标 的 权 重 和 优 先 级 ，以便 系 统 选 择 最 优 分 配策略。成本分析需要在运行过程 中 完 成 、分发 负 载 之 间 的 干 扰 和 资 源 使 用 情 况 ，都对 边 缘 计 算 架 构 提 出了挑战。
2. 安 全 性 。边 缘 计 算 的 分 布 式 架 构 增 加 了 攻 击 向 量 的 维 度 ，边 缘 计 算 客 户 端 越 智 能 ，越容 易 受 到 恶意软件感染和安全漏洞攻击。在 边 缘 计 算 架 构 中 ，在数 据 源 的 附 近 进行计算是保护隐私和数据安全的 一种较合适的方法。但由于网络边 缘 设 备 的 资 源 有 限 ，对于 有 限 资 源 的 边 缘 设 备 而 言 ，现有 数 据 安 全 的 保护方法并不能完全适用于边缘计 算 架 构 。 而 且 ，网络 边 缘 高 度 动 态 的环境也会使网络更加易受攻击和 难以保护。
3. 互 操 作 性。 边 缘 设 备 之 间 的互操作性是边缘计算架构能够大 规模落地的关键。不同设备商之间 需要通过制定相关的标准规范和通 用 的 协 作 协 议 ，实现 异 构 边 缘 设 备 和系统之间的互操作性。
4. 智 能 边 缘 操 作 管 理 服 务 。 网络边缘设备的服务管理在物联网 环 境 中 需 要 满 足 识 别 服 务 优 先 级 ， 灵 活 可 扩 展 和 复 杂 环 境 下 的 隔 离 线。在传感器数据和通信不可靠的 情 况 下 ，系统 如 何 通 过 利 用 多 维 参

06

中 兴 通 讯 技 术

2019 年 6 月 第 25 卷 第 3 期

Jun. 2019 Vol. 25 No. 3



作 者 简 介

丁 春 涛 ，北京 邮 电 大 学 网 络 技 术 研 究 院 在 读 博 士 生 ；主 要 研 究 领 域 为 边 缘 计 算 、云 计 算 、机器学 习 。

曹 建 农 ，香港理 工 大 学 教 授 、 博 士 生 导 师 ，IEEE Fellow ， 并 担 任 中 山 大 学 、上海 交 通 大 学 等 多 所 重 点 大 学 的 客 座 教 授 / 兼 职 教 授 和 博 士 生 导 师 ；主要 研 究 领 域 为 并 行 和 分 布 式 计 算 、无线 网 络 和 移 动 计 算 、大数据 和 云 计 算 、普 适 计 算 、容错计 算 等 ；主持或 参 与 开 发 超 过 90 个 科 研 项

目 ，作为第 一 负 责 人 承 担 并 完 成 超 过 45 个 跨 学 科 和 全 球 合 作 科 研 项 目 。

杨 磊 ，华南理 工 大 学 副 教 授 ； 主 要 研 究 领 域 为 移 动 云 计 算 、边缘 计 算 、物联 网 、大数 据 处 理 等 ；现主 持 国 家 自 然 科 学 基 金 、中央 高 校 业 务 经 费 、CCF- 腾 讯 犀 牛 鸟 创 意 基 金 等 项 目 ；在国 际 主 要 期 刊 和 会 议 上 发 表 论 文 30 余 篇 。

王 尚 广 ，北京邮 电 大 学 教 授 、 博 士 生 导 师 ，担任 国 际 期 刊 《International Journal of Web Science》 的 主 编 及 2 本 SCI 期 刊 的 编 委 ；主要 研 究 领 域 为 服 务 计 算 、边缘 计 算 、云计 算 、群智 计 算 等 ；主 持 完 成 国 家 / 省 部 级 项 目 4 项 ，参与国 家 重 点 研 发 计 划 、 国 家“973 ”课题、“863”课题

等 6 项 ；发表论 文 60 余 篇 。



考 数 据 源 和 历 史 数 据 记 录 ，提供 可 靠的服务是目前需要关注的问题。

5 结 束 语

本 文 主要 从基 本 概念 、应用场 景、研究现状和关键技术、存在的挑 战方面对边缘计算模型进行了系统 性介绍。边缘计算的核心思想是为 应 用 在 网 络 边 缘 侧 提 供 计 算 、存储 和 网 络 等 资 源 ，是一 种 新 的 计 算 架 构。边缘计算架构可以满足用户对 延迟敏感应用的需求和减少核心网 络 的 负 载 压 力 。 值 得 注 意 的 是 ，单 个边缘节点计算和存储资源有限且 安 全 性 低 于 云 计 算 中 心 ，如何 实 现 边 缘 节 点 之 间 的 安 全 、高性 能 协 作 和智能管理是目前亟待探索和研究 的问题。

参 考 文 献

[1] 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. DOI:10.7554/issn1000-1239.2019.2018076

[2] GAO Y Q, GUAN H B, QI Z W, et al. Service Level Agreement Based Energy-Efficient Resource Man agreement in Cloud Data Centers[J]. Computers & Electrical Engineering, 2014, 40(5): 1621-1633. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2013.11.001

[3] SAHNI Y, CAO J N, ZHANG S G, et al. Edge Mesh: A New Paradigm to Enable Distributed Intelligence in Internet of Things[J]. IEEE Access, 2017,(5):16441-16458. DOI: 10.1109/

丁 春 涛 等

边 缘 计 算 综 述 ：应用、现状及 挑 战 ZTE TECHNOLOGYJOURNAL

ACCESS.2017.2739804

[4] ABBAS N, ZHANG Y, TAHERKORDI A, et al.

Mobile Edge Computing: A Survey[J]. IEEE

Internet of Things Journal, 2018, 5(1): 450-

465. DOI:10.1109/jiot.2017.2750180

[5] 施 巍 松 , 孙 辉 , 曹 杰 , 等 . 边 缘 计 算 : 万 物 互 联 时

代 新 型 计 算 模 型 [J]. 计 算 机 研 究 与 发 展 , 2017,

54(5): 907-924. DOI:10.7544/issn1000-

1239.2017.20160941

[6] CAO Y, CHEN S Q, HOU P, et al. FAST: A Fog

Computing Assisted Distributed Analytics

System to Monitor Fall for Stroke Mitigation

[C]//2015 IEEE International Conference on

Networking, Architecture and Storage (NAS).

USA: IEEE, 2015: 2-11. DOI:10.1109/

NAS.2015.7255196

[7] Cisco Visual Networking. Cisco Global Cloud

Index: Forecast and Methodology 2015-2020,

CISCO White Paper[R].2015

[8] SUN X, ANSARI N. PRIMAL: PRofIt

Maximization Avatar Placement for Mobile

Edge Computing[C]//2016 IEEE International

Conference on Communications (ICC).

Malaysia: IEEE, 2016: 1-6. DOI:10.1109/

ICC.2016.7511131

[9] AUJLA G S, KUMAR N, ZOMAYA A Y, et al.

1. ptimal Decision Making for Big Data
2. rocessing at Edge-Cloud Environment: An

SDN Perspective [J]. IEEE Transactions on

Industrial Informatics, 2018, 14(2): 778-789.

DOI:10.1109/tii.2017.2738841

[10] YUAN Q, ZHOU H B, LI J L, et al. Toward

Efficient Content Delivery for Automated

Driving Services: An Edge Computing

Solution [J]. IEEE Network, 2018, 32(1): 80-

86. DOI:10.1109/mnet.2018.1700105

[11] FAJARDO J O, TABOADA I, LIBERAL F.

Improving Content Delivery Efficiency

through Multi-Layer Mobile Edge Adaptation

[J]. IEEE Network, 2015, 29(6): 40-46. DOI:

10.1109/mnet.2015.7340423

[12] FITZGERALD E, PIORO M, TOMASZEWSKI

A. Energy-Optimal Data Aggregation and

Dissemination for the Internet of Things[J].

IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2):

955-969. DOI:10.1109/jiot.2018.2803792

[13] NGUYEN V L, LIN P C, HWANG R H.

MECPASS: Distributed Denial of Service

Defense Architecture for Mobile Networks

[J]. IEEE Network, 2018, 32(1): 118-124.

DOI:10.1109/mnet.2018.1700140

专 题

2019 年 6 月 第 25 卷 第 3 期

中 兴 通 讯 技 术 Jun. 2019 Vol. 25 No. 3

07