

 THE **LINUX** FOUNDATION

STATE OF THE  
**EDGE**

2021

边缘计算市场和生态报告

[stateoftheedge.com](https://stateoftheedge.com)



# 导言

# 内容摘要

---

这份2021年边缘状况报告探讨了当今的边缘计算生态系统，重点关注关键基础设施、网络、软件和硬件日益互联的领域。与以前的报告一致，这些见解由独立专家提供，旨在教育和推进这一领域。本报告还基于以前的版本，更新了市场规模数据以及行业领导者的想法。

## 一些最重要的发现包括：

- 尽管受新冠肺炎的影响（在某些情况下是由新冠肺炎的影响所驱动），但2020年仍在继续部署新的边缘基础设施和应用。与去年的报告相比，百分之七十的地区部署预计有所增加。
- 需要大量的基础设施投资来支持不断增长的设备和基础设施边缘需求。我们估计在2019年至2028年期间，累计高达8000亿美元的资本支出将用于新增和替换IT服务器设备和边缘计算设施。这些支出将相对平均地用于设备边缘和基础设施边缘的设备。
- 作为云计算的自然延伸，边缘云结构越来越被视为“第四次工业革命”的关键推动力。在第四次工业革命中，物联网（Internet of Things, IoT）的广泛部署、全球共享经济和零边际成本制造业的增加提供了前所未有的通信驱动机会，具有巨大的规模经济。
- 随着超大规模数据中心提供商和电信服务提供商与区域数据中心、传统托管解决方案、微边缘数据中心、无线塔和网络设备的供应商争抢位置，边缘基础设施的基本选择正在扩展。在很大程度上，所有这些参与者的投资回报将取决于他们建立的伙伴关系的有效性。
- 随着边缘部署的扩展和新的硅选项的出现，架构决策成为资本支出和运营支出的重要因素。英特尔、AMD和英伟达竞争激烈，而诸如智能网卡（Smart Network Interface Card, SmartNIC）、现场可编程门阵列（Field-Programmable Gate Array, FPGA）和数据处理单元（Data Processing Unit, DPU）之类的加速选项旨在提高人工智能（Artificial Intelligence, AI）和机器学习（Machine Learning, ML）算法的性价比。
- 软件定义广域网（Software-Defined Wide Area Networking, SD-WAN）和安全访问服务边缘（Secure Access Service Edge, SASE）代表了边缘应用的关键虚拟网络技术。这些技术为企业连接性带来的安全性、弹性和会话感知同样适用于托管在网络边缘的用例。
- 虽然将出现一部分需要5G连接的边缘用例，但5G并不是主流边缘应用的要求。许多企业边缘应用都利用有线网络，而4G-LTE及其变体长期演进类别M1（Long Term Evolution category M1, LTE-M）和窄带物联网（Narrowband IoT, NB-IoT）足以满足当前大多数无线连接的需求。公民宽带无线电服务（Citizens Broadband Radio Service, CBRS）和共享频谱解决方案也很有吸引力。

- 来自Amazon Web Services、Google Cloud、Microsoft Azure、VMware和IBM（Red Hat）等主要参与者的混合和多云解决方案正在将云体验扩展到遥远的地方，并承诺提供一致的应用和运营体验。
- 得益于一些举措，例如Google于2020年12月推出了一个由来自30多家独立软件供应商（Independent Software Vendor, ISV）的200多个应用组成的生态系统，现成的边缘应用和市场正在变得可用。IBM和Amazon Web Services的类似举措，以及“多合一”定价模型，表明云式消费是如何影响边缘的。
- 开源项目使组织能够加速采用和部署边缘应用。这些社区还促进了整个行业的标准化，在降低供应商依赖所带来的风险的同时，加快了创新步伐。
- 保守地预测，基础设施边缘部署的全球IT功耗将从2019年的1吉瓦增加到2028年的40吉瓦以上，复合年增长率（Compound Annual Growth Rate, CAGR）为40%。预计到2028年，全球基础设施边缘的37%将用于与移动和住宅消费者相关的用例，其余63%将支持医疗保健、制造、能源、物流、智慧城市、零售和运输等垂直市场的应用。

# 前言

---

## 进入超连接时代

我们正处于从移动互联网向超连接时代的过渡之中。在这个时代，无论是一个简单的消费者门铃还是一个复杂的机器人制造设备，我们物理世界中几乎每一个物体都可以有计算和连接功能。随着这些智能设备数量的增长，它们将推动自动化和个性化，从而改变许多行业。

这种超连接性还将导致从垂直集成的、行业特定的解决方案过渡到水平平台。在水平平台上，所有系统都可以处理相关数据，并为基于人工智能（Artificial Intelligence, AI）的自动化交换知识。有人推测这将是下一次工业革命的推动力，人工智能、机器学习和分布式账本技术将推动计算、通信和业务流程的去中心化。

虽然提到物联网（Internet of Things, IoT）是司空见惯的事情，但实际上我们将拥有一个系统互联网。在系统互联网中，从跨各种网络和云平台的最终用户“边缘”设备（智能手机，家电，电视，汽车，机器人，传感器等）开始，服务于不同系统内不同垂直应用的设备需要直接通信以自主、安全地交换知识，而不会出现单点故障。

我们正在目睹软件的创新，包括LF Edge领导的开源生态系统中的许多创新。不难发现，在不久的将来，混合边缘云将支持API优先的微服务，并提供用于身份验证、授权和身份管理的集成服务，而无需考虑设备类型、操作系统和网络的差异。跨软件系统的集成将创建一个开放的生态系统，提供可伸缩性、可扩展性和互操作性以及所需的灵活性，以适应未来我们不断变化的需求。

Linux基金会的边缘状态项目已成为业界开源研究的先行者，这种合作帮助推动了我们的生态系统的发展。

我希望在2021年，除了将客户端和服务器的功能委托给不同设备，我们需要将视野扩展到更广阔的地方。我们需要将边缘的边界扩展到智能手机、物联网设备甚至智能传感器等客户端设备。这些设备不仅当下具有托管微服务的能力，而且基于摩尔定律以及处理器架构的发展，未来将具有更强大的功能。

在构建应用时，我们还应该开始考虑边缘外与云内的对比。这种方法将为超连接世界带来更好的效率、数据隐私、控制和可扩展性。在超连接世界中，数字与融入我们物理世界的方方面面。



**Fay Arjomandi**

MIMIK创始人兼首席执行官

2020“边缘领域年度最佳女性”

# 联合主席序

---

无论我们谈论的是公司合作、网络互连还是开源项目的发展，边缘的互联和合作性质从未如此明显。

在本报告的先前版本中，我们明确或含蓄地指出，边缘机会的复杂性将需要密切的合作。事实上，边缘状态项目的中立和社区驱动的方法源于对这种合作的预期。

合作的必要性和参与的优势在过去一年变得更为明显。在边缘生态系统的所有部分，协作一直在帮助将新的想法、技术和商业解决方案推向市场。因此，对边缘计算市场规模的预测不断增长。

为了提供一个理解边缘计算生态系统的框架，我们围绕四个关键创新领域编写了本报告：**关键基础设施、硬件、网络和组网**以及**软件**。我们请四位独立专家提供他们的见解，使我们有机会了解每个领域与边缘计算相关的最显着的变化。此外，十几位领导人贡献了“边缘明信片”（你会发现简明扼要的思想领导力文章），以帮助我们进一步理解边缘的含义。

通常，为未来做准备的最佳方法包括了解势头在哪里形成。然而，正如我们的作者所报道的那样，我们发现到处都有明显的变化。即使在传统上“缓慢而稳定”的领域，如硅或物理基础设施，一系列戏剧性的转变正在促使新格局的形成。

边缘行业因其本身的复杂性，已成为一个快速发展、强大且高要求的行业。通过在这份年度报告中分享我们的观察，我们粗略地描绘了我们的行业快速响应、协作、开放和互联的未来。

## 行动呼吁

如果您的组织参与边缘计算，作为供应商、服务提供商、集成商、数据中心运营商和/或应用开发人员组成的不断扩展的生态系统的一部分，我们希望帮助您推广您的解决方案。我们鼓励您参与[LF Edge Landscape](#)项目，以确保您的公司的利益得到了维护，并通过参与[LF Edge项目](#)加入蓬勃发展的边缘计算社区。



**Matt Trifiro**

Vapor IO公司首席  
营销官，报告联合  
主席



**Jacob Smith**

Equinix公司战略与营销副总裁，  
报告联合主席

第一章

# 一年中的诸多变化

**Phil Marshall**

*Tolaga Research* 首席研究官

去年，《2020年边缘状况》报告提出了用例驱动的市场预测，预测了2019年至2028年边缘基础设施的增长和价值。边缘计算市场是动态变化的，它受到越来越多具有关键服务需求的用例的推动，这些需求包括低延迟性能、更低的带宽需求以及数据安全性和主权。为了跟上市场的变化，2020年的预测已经更新，以反映当前的市场预期。

需要大量的基础设施投资来支持不断增长的设备和基础设施边缘需求。我们估计在2019年至2028年期间，累计高达8000亿美元的资本支出将用于新增和替换IT服务器设备和边缘计算设施。这些支出将相对平均地用于设备边缘和基础设施边缘的设备。

## 边缘分类

尽管边缘计算有各种各样的定义，但是Linux基金会的LF Edge已经创建了一种正式的分类法，该分类法获得了许多赞誉，并被广泛采用。LF Edge分类法通过包括互联网在内的物理基础设施的连续体，从集中式数据中心到设备均实现了边缘计算的可视化。

通过在这一连续体中的关键点定位服务，开发人员可以更好地满足其应用的延迟要求。图1总结了从离散分布式设备到集中式数据中心的边缘计算连续体，以及定义每个类别边界的关键趋势。这包括架构师需要的越来越复杂的设计权衡，以使计算资源更接近物理世界。

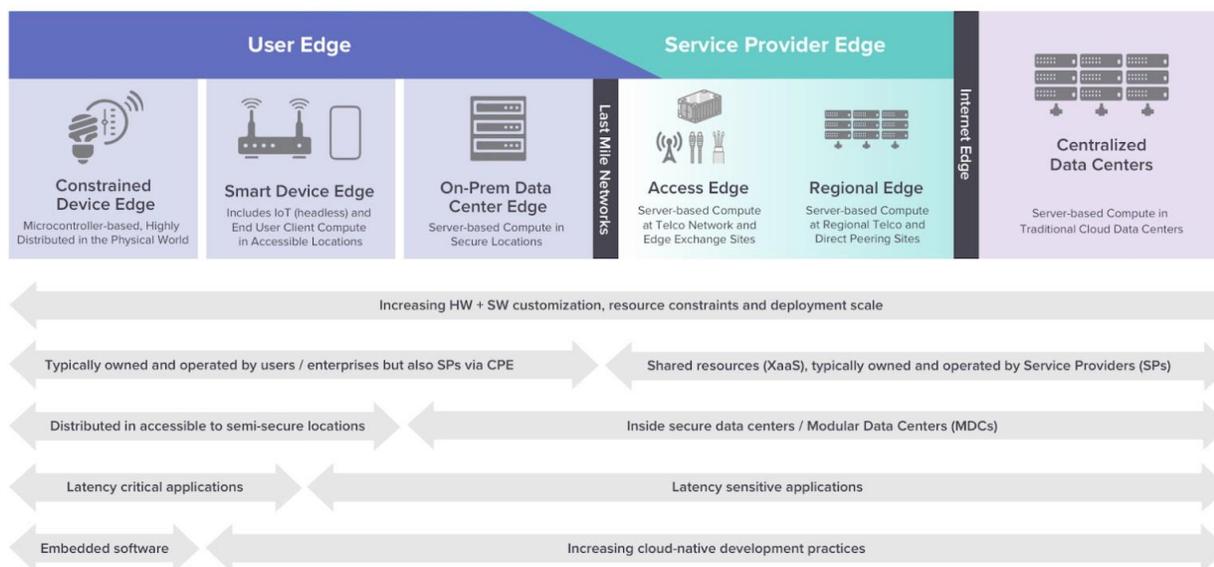


图1  
LF Edge提供的边缘连续体

## 将全球云汇集在一起

真正改变世界的应用需要的将不仅是在相同有限地理区域内的少数几个数据中心。由于延迟、地理或数据主权的原因，应用将关心是否处于高度分布式的云中。具有大量计算工作量的广告技术公司将需要更接近最终用户。远程桌面公司将需要高级别的地理分布。这些应用大多数已经在构建，还有更多的应用还在开发中。

事实证明，世界上每个地理区域内最好的空间、电源和连接性都由该地区的一个数据中心公司拥有和运营。东京最好的数据中心归日本公司所有。法兰克福最好的数据中心归德国公司所有。

然而，尽管他们拥有令人难以置信的空间、电源、连接性、虚拟化和计算功能，但这些数据中心公司中很少有能够达到提供托管服务的程度，而托管服务是现代云原生应用所需的标志。未来是将许多不同市场中现有的数据中心整合在一起，为每个数据中心提供部署托管服务的方法，并创建一个真正的全球云。

有关Jonathan对这个话题的更多看法，请在Over the Edge播客中观看他对Matt Trifiro的[采访](#)。本文是由该播客改编而来。



**Jonathan Seelig**

Ridge联合创始人兼首席执行官

LF Edge模型专注于跨越最后一公里网络的两个主要边缘层，即“服务提供商边缘”和“用户边缘”，每一个都被进一步细分为子类别。**用户边缘**包括：

- 独立的端点设备，如智能手机、可穿戴设备和汽车；
- 网关设备，如物联网聚合器、交换和路由设备；
- 本地服务器平台。

服务提供商边缘由计算平台组成，它与下列设备并列部署：

- 容纳网络接入设备的接入站点，如蜂窝无线基站、x数字用户线（x Digital Subscriber Line, xDSL）和x无源光网络（x Passive Optical Network, xPON）接入站点；
- 聚合集线器，如容纳分布式天线系统（Distributed Antenna System, DAS）并作为接入站点传输连接的初始聚合的集线器；
- 区域数据中心和中心局，通常在其中部署访问控制器、交换设备和其它服务网关功能。

## 关于边缘预测

该预测模型聚焦于涵盖11个垂直领域的43个用例，包括CSP、企业IT、住宅和移动消费者服务、零售、医疗、汽车、商用无人机、智能电网、智慧城市和制造业。其它垂直领域，例如教育和金融服务以及设备边缘的投资，将推动其它边缘计算市场机会的发展，而这些机会均未包含在预测中。

该预测将部署在服务提供商边缘的IT服务器设备的功耗用作说明边缘扩展的主要指标。服务器功耗代表在边缘运行的所有设备的额定功率，尽管它不表示实际消耗的电能，但实际消耗的电能要少得多，并取决于部署的设备的电源占空比。

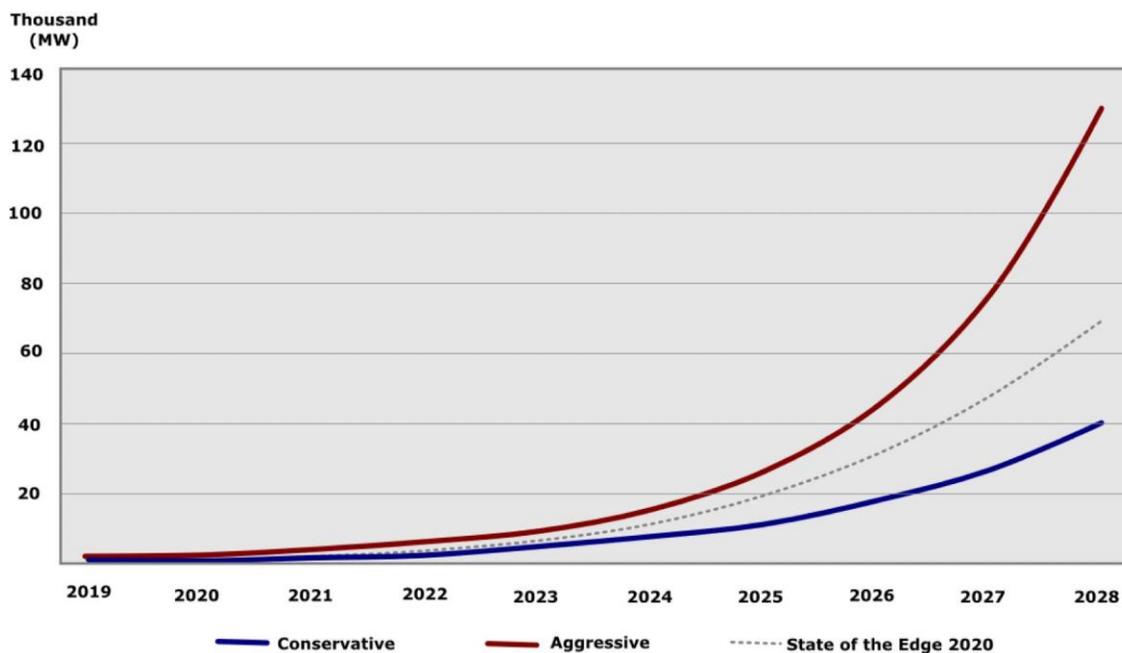


图2  
全球基础架构边缘IT总功耗

## 变化的世界

自SOTE-2020出版以来，世界已经发生了巨大变化。新冠肺炎大流行已经破坏了全球现状，并预示着数字化“拥有”和“没有”的世界。有些领域的数字服务正在蓬勃发展，而其它领域，如旅游业，则日趋衰落。不过，总体而言，该流行病正在加速数字化转型和服务采用。消费者和企业正在使用数字解决方案来克服流行病挑战，例如封锁、社交距离和脆弱的供应链。流行病过后，对于消费者和企业发现持续价值的用例来说，永久改变是不可避免的。然而，准确地预测哪些数字用例将占上风是很有挑战性的。

为了解决这种不确定性，已经对基础设施边缘制定了保守和乐观的预测。保守预测，全球IT总功耗将从2019年的1,078兆瓦增加到2028年的40,380兆瓦，复合年增长率（Compound Annual Growth Rate, CAGR）为40%。激进预测，到2028年将达到120,840兆瓦，复合年增长率为70%。这些预测与SOTE-2020报告中的预测相当，该报告预测2019年至2028年的复合年增长率为60.4%。

## 区域审查

在全球所有区域，基础设施边缘正在扩张。扩张的速度取决于预测中评估的各种宏观经济、地理、地缘政治和经济因素。预计到2028年，全球基础设施边缘覆盖的37.7%将在亚太地区。亚太地区具有巨大的多样性，遍及世界上一些最贫穷和最富有的国家。预计包括中国、日本和韩国在内的国家将成为该地区边缘计算应用的重要贡献者。

预计到2028年，欧洲将拥有全球基础设施边缘覆盖的29%，其中一半以上在西欧。德国、法国和英国等国家预计将成为欧洲基础设施边缘部署的主要贡献者。

预计到2028年，全球基础设施边缘的20.5%将部署在北美。北美的部署预示着基础设施边缘的早期采用，这得益于其高科技行业以及互联网和云计算的主导地位。但是，从中期来看，亚太和欧洲对全球基础设施边缘的需求将不断增加，这主要是由于其人口众多。到2028年，在其它地区中，全球基础设施边缘的7%将部署在拉丁美洲，并将在巴西和墨西哥等国家进行大量投资。预计2028年剩余的5.8%将部署在中东和非洲地区。

## 转移边缘计算优先级

2020年，数字服务的应用速度提升，出现了特定用例，以应对由新冠肺炎大流行带来的挑战。预计这种加速的应用将对边缘计算市场和即将到来的用例产生长期影响。预计到2028年，全球基础设施边缘覆盖的36.5%将用于与移动和住宅消费者相关的用例。这比《SOTE-2020》报告中预测的45.1%份额有所下降，反映出其它垂直行业采用边缘服务的比例有所增加。

预计到2028年，11.9%的全球基础设施边缘将与企业IT用例相关。

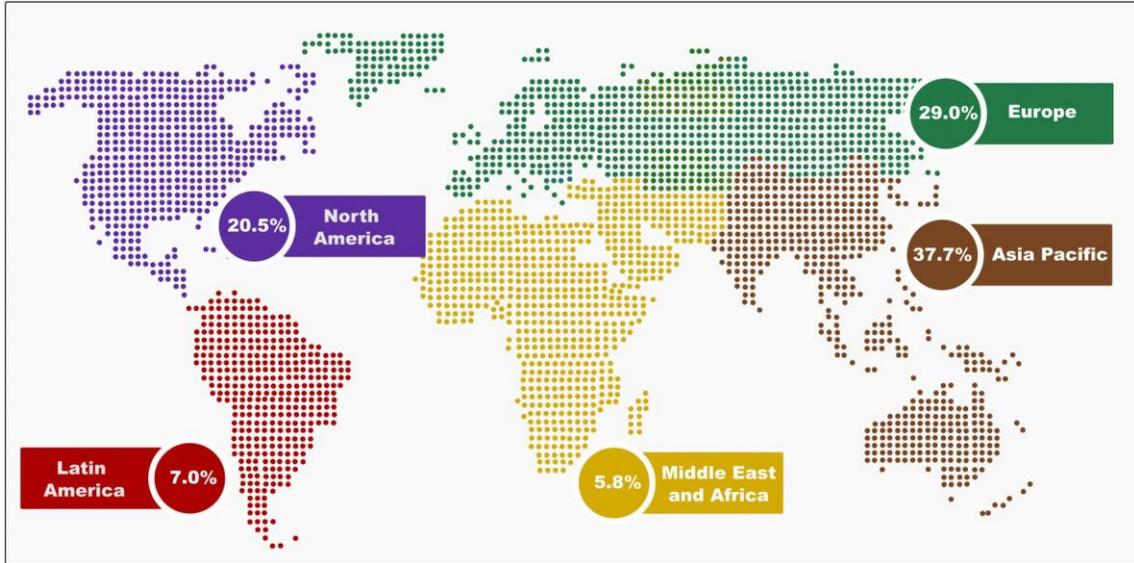


图3  
边缘部署的区域分布

从短期到中期来看，企业IT的基础设施边缘需求将由云服务用例驱动，这些用例将通过边缘计算功能得到补充和增强。

但是，预计从长期来看，“边缘原生”用例将驱动基础设施边缘需求，这些用例仅在边缘计算功能可用时才能发挥作用。这些边缘原生用例取决于关键技术（例如增强现实和虚拟现实）以及自治系统（例如用于闭环企业IT功能的自治系统）的成熟度。

CSP在虚拟化和云化网络时推动了早期基础设施边缘需求。最初，核心网和承载网已使用NFV和SDN等标准进行虚拟化。这通常是端到端网络转型的前兆，该转型融合了接入网虚拟化，如云无线接入网（Cloud Radio Access Network, C-RAN）。此外，CSP在地理位置分散的网络基础设施中具有独特的位置，非常适合基础设施边缘实施。许多CSP正在实施多接入边缘计算（Multi-access Edge Computing, MEC）技术，以带来各种以网络为中心的功能。这通常是与第三方合作的，包括亚马逊云服务（Amazon Web Services, AWS）、Microsoft Azure和Google云平台（Google Cloud Platform, GCP）等云服务提供商。预计到2028年，10.9%的基础设施边缘部署将支持CSP用例。

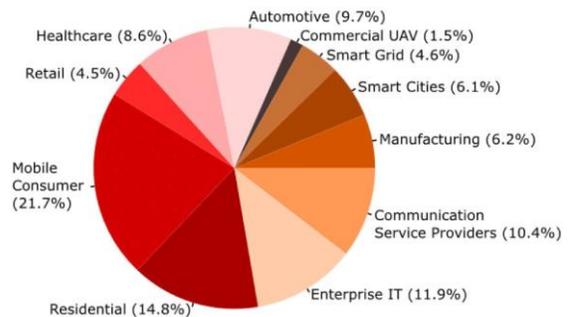


图4  
全球基础设施边缘力量

2020年，数字医疗得到了加速发展，其解决方案可应对新冠肺炎大流行带来的挑战。由于法规和安全要求，数字医疗创新

## 关注成本

我个人的看法——我们都需要给运营商看这笔钱。当谈到边缘计算时，他们不想看到有关超大规模用户在云中制造什么的策略。他们不想听到每个汽车都是自动驾驶，每个人都戴着VR眼镜的奇幻世界。如果运营商的投资打算用于在电信边缘部署基础设施，他们需要一些容易实现的目标，以使他们能够迅速收回投资。运营商希望在六个月内看到这笔钱。

今天要找到这些业务案例非常艰巨，因为它总是依赖于具体情况。他们就在那里，但是没有标准的公式说明每个电信公司都应该这样做，以使自己处于正确的位置并赚钱。当然，你可以把你的网站提供给Amazon、Google和AWS，你就要赚钱，这不一定是个错误的决定。然而，我认为在很多情况下，这并不是运营商愿意选择的方向。

如果你能向他们展示一种不给超大规模用户带来巨大价值损失的替代方案，并且允许边缘计算为自己买单，运营商会说：“好吧，我参与其中。”我认为他们看到了所有新兴技术的前景，如果有了正确的起点，他们将看到如何开始建设一个更广阔的未来。

有关Alex对这个话题的更多看法，请在Over the Edge播客中观看他对Matt Trifiro的[采访](#)。本文是由该播客改编而来。



**Alex Reznik**  
ETSI MEC ISG主席

通常受到限制。但是，这一流行病使特定的用例成为关注焦点，例如与远程医疗和辅助生活有关的应用。预计到2028年，8.6%的全球基础设施边缘将支持医疗保健用例。这比SOTE-2020预测的6.8%显著增加。

制造商一直在推行多年战略，以工业4.0等框架为幌子实施数字服务。制造商的数字服务优先级取决于他们的市场条件、运营目标、产品复杂性、精度和定制需求，以及棕地和绿地制造设施的范围。

例如，汽车行业面临着来自特斯拉等公司的巨大破坏，电动汽车需求激增。电动汽车需要新建的绿地制造设施。由于这些设施都是新开发的，它们通常整合了先进的数字运营，利用了自动化、无线连接和自主系统（例如自主移动机器人）的进步。这就需要广泛的边缘计算功能，而其中绝大部分应归功于设备边缘，特别是运营技术（Operational Technology, OT）。但是，跨越单独工厂边界以外的地理区域的用例，如仓储、供应链和物流，也需要基础设施边缘功能。预计到2028年，6.2%的全球基础设施边缘将支持与制造相关的用例。

智慧城市已经出现了很多年，现在正在使用一系列数字服务，例如与安全监控、城市运营（如废物管理）和交通管理相关的数字服务。随着越来越多的城市实施数字服务，它们的价值主张能被更好地理解，并且在其它地方更容易证明其合理性。尽管设备边缘可以满足许多智慧城市用例的需求，但据预测，到2028年，全球基础设施边缘的6.1%将支持智慧城市的用例。这些用例包括智能建筑、照明和交通管理以及用于公共安全、场馆和城市运营的其它数字服务。

随着电子商务解决方案的普及，传统零售公司面临着巨大的创新压力。在新冠肺炎大流行后，有利于电子商务的永久性消费者行为变化可能会盛行，并将继续损害传统零售业。服务的连续性对于零售而言非常重要，尤其是对于通常依赖于设备边缘功能的销售点付款系统而言非常重要。基础设施边缘解决方案用于一系列用例，包括数字标牌和户外数字媒体（Digital Out-of-Home, DOOH）体验、沉浸式店内解决方案、邻近营销和供应链优化。预计到2028年，全球基础设施边缘的4.6%将与传统零售用例相关。

借助智能电网、微电网和分布式能源存储的能源利用技术和可再生能源的发展，正在推动设备和基础设施边缘的边缘计算需求。预计到2028年，4.6%的全球基础设施边缘将支持与智能电网相关的用例。

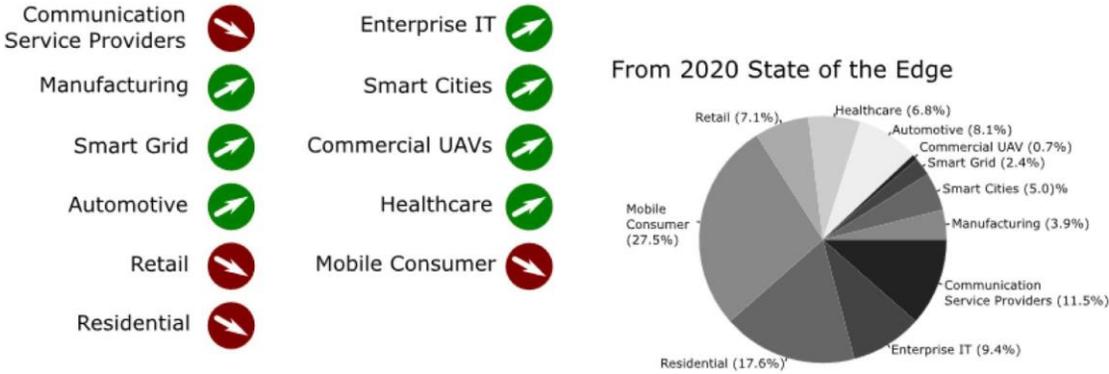


图5  
与2020年边缘状态预测的比较

商用无人机（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）在越来越多的用例中被使用，特别是随着自动驾驶系统和超视距（Beyond Line-of-Sight, BLOS）操作的普及。商用无人机广泛用于农业、制造业、房地产、供应链和物流以及智慧城市等行业。预计到2028年，全球基础设施边缘的1.5%将支持商业无人机用例，其中包括制图和测量、摄影测量以及3D和数字高程建模。

自2019年制定SOTE-2020报告预测以来，对基础设施边缘的需求预期已发生变化。这些变化反映了新冠肺炎大流行的持久影响，以及随着边缘计算市场的不断成熟，边缘计算前景发生的变化。虽然2019年的预测在当前全球基础设施边缘预测的范围内，但边缘计算在各种用例和垂直领域中的分布发生了变化。特别是，在最新预测中，全球基础设施边缘在CSP、零售、住宅和移动消费者用例的覆盖比例有所下降，而其它垂直领域的用例的百分比都有所上升。在这些增长中，值得注意的是：

- 制造业的覆盖比例从3.9%增长到6.2%，因为公司增强了供应链和库存管理能力，并利用了自动化技术和自治系统。
- 医疗保健的覆盖比例从6.8%增长到8.6%，这得益于对远程医疗、数字数据管理和辅助生活的期望的提高。
- 智慧城市的覆盖比例从5.0%增长到6.1%，在监控、公共安全、城市服务和自治系统等领域的数字基础设施的预期支出将会增加。

### **充满希望的未来**

随着数字服务的成熟和分布式计算资源需求的增长，预计边缘计算在未来几年中将有惊人的发展。大量用例依赖于边缘计算，并且随着市场的发展，这种情况将继续增加。设备和基础设施边缘都将发挥重要作用。基础架构边缘的早期市场动力来自CSP，因为他们的网络进行了虚拟化。但是，从长远来看，我们预计移动和住宅消费者用例将占全球基础设施边缘需求的35-40%。

当前的全球大流行说明了不可预见的事件会如何对边缘计算等新兴市场产生巨大影响。针对本报告制定的预测反映了基于当下条件的长期市场预期。在监控市场进展时，我们将继续特别关注触发事件和法规，生态系统利益相关者的优先级和参与度，以及边缘计算计划以及相关技术开发的运营和商业影响。边缘计算是一个令人兴奋的市场。尽管面临着挑战，但它拥有强大的基础。这一基础的背后是有着令人信服的价值主张的强大用例。



第二章

# 边缘的关键基础设施

**Philbert Shih**

结构研究有限公司总经理

仅当底层关键基础设施性能高、冗余且无缝集成时，才可以进行边缘计算。俗话说，一条链的强度取决于它最薄弱的环节，这句话用来形容基于互联网的计算机基础设施来说，再合适不过了。每一块拼图都有自己的作用，如果其中的一个出现故障，事情就会很快出错。在边缘，关键基础设施是多种多样，形态不一，且与供应商没有关联。每一层都建立在另一层之上，并形成协同关系。从底层大规模数据中心到它所容纳的云基础设施；到连接最终用户并将数据从核心移动到边缘的多个连接源；再到能够支持所有这些复杂需求的不动产。在边缘，每个关键基础设施构建模块本身都很重要，但是它们作为单个集成生态系统的一部分协同工作。

## 数据中心

公有云基础设施的全球爆炸式增长和边缘计算的出现改变了第三方数据中心市场。旨在满足传统企业需求的大规模数据中心根本无法满足边缘计算和公共云的下一级需求。因此，出现了新型的关键基础设施来满足这些需求。

---

## 机架密度

几乎所有数据中心设计的关键点都可以归结为三个要素：空间、电源和散热。这个行业在其发展过程中一直致力于在不给冷却系统带来重大负担的情况下，往更小的空间里装载更多的能量。在这一过程中，冷却系统本身也变得越来越高效。所有这些优化的最终结果是提高了数据中心能够处理的IT设备的密度。

“机架密度”中的“机架”是指标准的7英尺设备机架，这种机架几乎在世界各地的每个数据中心中都能找到，而“密度”是指该机架中可以装入多少设备。因此，机架密度成为表示数据中心功率密度的一种方式，这一概念正被扩展到新的形态。

作为比较，典型的企业数据中心每个机架的平均功率可能为6-12千瓦，而一些超大规模数据中心的处理密度高达每机架50千瓦。在不同机架的基础上，一个机架密度为50千瓦的数据中心可以提供四倍于典型企业数据中心的功率。

在边缘，机架密度变得很重要，因为空间稀缺且昂贵。密度越高，我们在边缘能做的就越多。

超大规模数据中心通常以园区为单位构建，并为少数客户提供服务。一个典型的园区环境由几个兆瓦级数据大厅组成，这些数据大厅是为满足超大规模客户的增长需求而量身定制的。这些数据中心往往更新式且专门用于处理大容量需求，以及提供日益复杂的云计算功能所需的功率密度。超大规模数据中心提供商的实例包括Compass数据中心、CyrusOne、Digital Realty、Equinix和Vantage数据中心。由于云计算的应用没有放缓的迹象，

## 边缘“百味”

针对边缘，我的主要观点是有些争议性的：延迟可能不是我们最初考虑的全部和最终结果。实际上，数据主权、安全、控制和互连等因素比几年前人们所想的更重要。

我看到的是，不同边缘世界的观点正在缓慢融合——从云和数据中心世界、电信世界，直到物联网和设备世界的某项观点——尽管我仍然发现人们经常相互交谈。

当我开始谈论边缘时，我总是在衡量人们在事物中的位置。有些人将边缘视为三线城市中的兆瓦级数据中心。其他人认为边缘是传感器上的毫瓦处理器。还有另一个分歧点。对于某些用例，微秒级的进步便很重要。对其它用例，只要今年的延迟比去年的延迟低，那就很好了。我认为边缘在延迟时间和功率上可能有9个数量级，人们会说，“这就是边缘。”不同量级的边缘适用于不同的对话。

如果说有一件事你可以预见，那就是边缘会很混乱。基于实用主义，一切都将变得非常不优雅，这种实用主义被现实世界的收购和尴尬搞砸了：地方当局的规划限制、重叠的司法管辖范围、产权和现有制度等问题。

有关Dean对这个话题的更多看法，请在Over the Edge播客中观看他对Matt Trifiro的[采访](#)。本文是由该播客改编而来。



**Dean Bubleby,**  
Disruptive Analysis的  
创始人兼总监  
**@disruptivedean**

超大规模数据中心持续快速增长。从边缘的角度来看，这种发展很重要，因为边缘计算需要以一种共生关系与现有的超大规模云基础设施集成。应用功能和架构变得更加分散，并将在核心和边缘之间分裂。

**区域数据中心**已经存在了一段时间了，但随着云基础设施移至边缘，其重要性日益凸显。这些设施经常出现在二线市场，从基础设施的角度来看，这些市场通常不饱和。区域数据中心很少达到超大规模数据中心的规模和密度，但是它们在二线大都市中的位置使它们可以方便地以较小的增量交付基础设施。此类提供商的实例包括DataBank、Flexential和TierPoint。

**面向互连的数据中心**提供的数据中心容量也配备了广泛的互连能力。Cologix、Equinix和QTS等提供商拥有密集的网络生态系统和客户想要连接的云入口。通过互连结构可用的网络和云密度越大，最终用户创建混合环境或在核心和边缘之间构建的选项和灵活性就越多。面向互连的数据中心存在于各种规模的市场中，但在一线和二线市场最为常见。互连将使核心和边缘能够协同工作，并将支持分布式架构。

**微型模块化边缘数据中心**是规模较小的设施，包括街边机柜到容纳有限数量服务器基础设施的类似货物集装箱的结构。微型模块化数据中心在工厂中构建，形态比典型数据中心更小，移动和部署相对容易，这使得它们非常适合在边缘放置IT基础设施。这些专用边缘数据中心足够小，可以安装在非典型数据中心位置，例如商业建筑的屋顶、停车场、商业园区、大学校园、无线塔周围的不动产或光纤路线的横截面上。它们的规模使得多位置快速部署成为可能，例如在主要城域中创建多个可用性和故障切换区域，或支持延迟敏感服务，例如Open RAN（O-RAN）。在过去的一年里，微型数据中心已经从概念走向现实。EdgeMicro、EdgePresence和VaporIO等运营商已与合作伙伴一起在无线塔或体育场等主要人口群中的高流量位置附近部署微型数据中心。共同点是靠近无线和地面连接，从而实现最高性能和将流量回传到核心网的能力。

在数据中心行业不断发展和成熟的同时，最深刻的转变之一是从单站点冗余到多站点高可用性。虽然优质设施和存在不足的设施之间一直存在着意味深长的分离（在所有这些不同类型的数据中心中），但新的观点认为大型设施中常见的2n+1冗余在边缘环境中既不具有成本优势，也不具有空间优势。相反，边缘数据中心开始依赖实时监控和基于软件的故障切换来保持可靠性。像Kubernetes这样的软件系统旨在跨不同环境（包括边缘）管理和扩展基于容器的应用。基于软件的韧性与关键基础设施相结合，确保如果出现问题，运营将无缝过渡。它是关于构建和设计的，因此不仅可以最大限度地减少停机时间，而且还可以将大部分情况完全排除在外。

街边机柜代表了边缘最小的数据中心形态。设计这些机柜的目的是在极度偏远的位置进行部署，并容纳现代数据中心设备的四分之一到两个完整机架。街边机柜比微型模块化或全尺寸数据中心更容易部署，因为它们资本密集度较低，对许可的要求较少，并且通常可以使用现场已有的可用电源。

## 无线塔和电缆头端

无线塔和电缆头端已迅速成为边缘计算生态系统的关键基础设施组件。这些设施提供了连接的关键点，因为它们是第一公里网络的“起点”。正因为如此，围绕这些设施的不动产是边缘计算基础设施驻留的理想场所。将计算基础设施放置在靠近无线塔或电缆头端的位置，可以最大限度地减少最后一公里网络与位于同一物业边缘数据中心内的应用的主要处理功能之间的距离。以这种方式获得边缘计算最终结果是显著降低延迟并提高性能。

无线塔、电缆头端和类似设施基本上是下一代应用架构的前沿。端到端应用将在边缘执行实时流程并连接回核心网，以实现性能不太敏感的功能，例如存储、存档和分析，这些功能本身在核心网中执行。

靠近无线塔、电缆头端和关键光纤聚合点的不动产的重要性日益提高，这为生态系统带来了一种新的参与者：土地所有者。类似于业主在自己的土地上建立大规模数据中心，为早期的托管和云基础设施提供商提供服务，土地所有者正在为边缘计算基础设施提供战略性用地，这种方式增量小，分布多（当边缘生态系统更加成熟时）。土地所有者提供不动产，微型数据中心运营商提供托管设施，然后云提供商、系统运营商和最终用户提供在这些设施中运行的IT设备和应用。

边缘设施还将创建新型互连和对等互连。类似于数据中心如何成为网络的目的地和汇合点，无线塔和电缆头端的微型数据中心将为边缘计算提供动力，它们通常位于地面连接路径的十字路口。这些位置将成为本地互连和边缘交换的重心，为数据创建新的高效路径。

## 地面（光纤）连接

除了数据中心和边缘设施，地面连接也是关键基础设施价值链的支柱。边缘站点被部署在方便光纤接入的位置，并且可以将流量从边缘路由到核心网并返回。要解决如何将更多服务提供商和供应商引入生态系统这一难题，这是关键的一点。与运营商中立数据中心提供互连的方式类似，边缘数据中心也在做同样的事情。主要区别是识别和获取最佳光纤路径的复杂性。在高度集中化的公有云世界中，能够处理的路径较少。在边缘世界中，计算和存储增量较小的多个位置将需要更多的路线，因为边缘不仅转移到不饱和的市场，还要向全球其它新兴市场以及从连接的角度来看相对欠发达的地区转移。

## 非地面（卫星）连接

非地面连接是这一新兴价值链的另一部分。绕地球轨道运行的卫星捕获并存储可通过地面站天线检索到的数据，例如天气模式和自然灾害信息。然后，这些数据穿过地面网络，最终由运行在超大规模和边缘计算基础设施上的应用功能进行处理和分析。与云基础设施集成的基于卫星的连接还处于起步阶段，但预示着未来的发展方向。计算功能将在边缘和核心网之间以及跨多个位置分布，数据和最终用户从多个连接源连接：无线、地面和非地面。

## 组网和互联

随着在边缘生成大量数据，我们需要新的组网能力和基础设施来支持边缘应用的容量和延迟需求。Lumen和Verizon等传统组网服务提供商正在扩展边缘的网络容量，而Vapor IO等初创企业正在实施下一代网络、边缘交换点，并创建新的、更直接的网络路由。

互连，即网络的物理和虚拟连接，就像互联网基础设施生态系统的结缔组织。互连服务可通过第三方数据中心运营商获得，并使客户能够在数据中心内和跨数据中心集成基础设施环境——无论是在本地云还是在公有云、私有云和裸机云中。公有云基础设施的兴起提高了互连服务的重要性，因为越来越多的组织希望利用云提供的规模和全面的工具集。他们不一定完全转向云，但他们看到了针对特定工作负载进行云连接和扩展的优势。驻留在数据中心中的互连结构现在具有连接到同一园区中的多个云基础架构平台或能够高效抵达的专用网络连接的入口。

边缘的兴起将需要互连，以从其传统的集中式互联网交换（Internet Exchange, IX）模型（通常位于主要城市的主要位置）迁移到边缘交换模型。位于边缘的最终用户和设备远离主要IX点，流量到达这些位置所需的距离会降低性能并显著增加传输成本。为了解决这个问题，网络互连需要在靠近最终用户的最后一公里网络附近的边缘数据中心进行。我们将看到边缘交换的出现，允许在边缘进行对等互联和数据共享，而不必涉及核心网。边缘互连不在孤岛中运行。边缘互连将允许更多流量保留在本地，但它也将成为传统IX的相互依赖的扩展。边缘的关键基础设施不仅需要数据中心，还需要集中式云计算部署中的流量交换。应用也将相应地构建。边缘的应用将看到边缘（实时处理）和核心网（主要应用功能、分析、归档）之间的功能拆分，数据将通过互连服务来回移动。在核心网拥有一个交换点，该交换点也与边缘绑定，将提高性能并提高成本效益。

## SERVICE PROVIDERS

支持边缘计算的关键基础设施生态系统的最后一个组成部分是基础设施服务提供商的集合。主要有三个群体：数据中心运营商、最后一公里运营商以及云和边缘计算服务提供商。

## 三部分覆盖

应用需要强大的数据基础设施和可靠的数据层。在边缘，问题在于如何以完全分布式的方式使可能跨越数百个位置的数据层可靠。我看到这个行业的三个部分正在同时迅速成熟，正朝着一个将创造价值爆炸的奇点靠拢。

第一部分是资本。在这个问题上，资本变得越来越聪明，并且越来越明白其重要性。资本正在基础设施层以及我们需要的智能软件堆栈中部署。资本正在选择能够全面解决问题的数据和计算方面的平台。

第二部分是客户。他们也越来越聪明了。当我们开始谈论边缘的前景时，客户摸不着头脑，因为他们认为他们所面临的只是延迟问题。情况已经发生了变化，客户现在意识到还有其它问题需要他们花费真金白银，他们需要有目的地提高性能。

第三部分是关于云的丑陋秘密：进入云很容易，但退出云真的很难。如果您尚未构建具有可扩展性的应用，那么像草率编码这样的事情在云中会花费很多钱。相较于云，边缘是一个能够以更低成本吸收和处理某些事物的地方。

有关Chetan对这个话题的更多看法，请在[Over the Edge](#)播客中观看他对[Matt Trifiro](#)的[采访](#)。本文是由该播客改编而来。



**Chetan Venkatesh,**  
Macrometa Corp首席  
执行官兼联合创始人

这第三组在边缘位置采购、部署和租赁服务器基础设施，无论是小型增量，如微型数据中心，还是在战略边缘位置上的更传统的设施。许多这些计算服务提供商已将资源投入到高级软件管理平台的开发中。这使得边缘计算服务能够像云计算一样按需远程交付。计算服务提供商是早期边缘部署中最常见的租户，这并非巧合：他们直接与最终用户客户合作，并最终托管和管理放置在边缘的工作负载和应用。边缘计算服务提供商有不同的形态和规模。有一些初创公司正在进入边缘计算游戏领域（如Ridge和被Equinix收购的Vapor IO、EdgePresence和Packet）。有些内容分发网络（Content Delivery Network, CDN）已经拥有数据中心的参与，并希望将其部分容量转换为边缘计算基础设施（例如，Fastly和Limelight Networks）。成熟的云和托管提供商也在进军边缘计算（如DediPath和Hivelocity）。

## 伙伴关系

归根结底，正是伙伴关系将所有这些不同的部分结合在一起。无线塔运营商曾考虑拥有数据中心（并且有少数的收购案例），但他们进入市场的最有效方式是合作。微型数据中心供应商正在与托管和管理云基础设施的服务提供商合作，并将其作为租户。与此同时，微型数据中心运营商正在与无线塔公司合作，以访问塔站点的不动产。即使在大流行的情况下，真正的实时部署也在2020年上线。

所有这些关键基础设施中的运营商中立性至关重要，也是边缘发挥作用的唯一途径。它确保了多样性和选择，最大限度地增加了不同类型的应用要求所需的路径、位置、性能水平和服务提供商选项的数量。

边缘生态系统内的合作伙伴关系不会完全跨越这三个部分。还会有其它组合。公有云不会引领边缘基础设施的构建，但他们希望确保自己是价值链的一部分，成为与边缘紧密集成的核心，以及在边缘基础设施上运行的交付软件。这种想法使AWS与微型数据中心提供商Vapor IO以及Crown Castle合作，后者可以访问广泛的无线和地面光纤覆盖区域。他们还与电信提供商合作，在5G网络聚合点接入和放置边缘基础设施。预计未来几年会发展出更多的伙伴关系和更好的生态系统。组成是多种多样的，需要高度的协调。

## 投资回报

构建边缘计算基础设施将需要大量的支持资金。目前，资本的流动相当保守，但也押注了构建新形态的微型数据中心运营商和区域边缘数据中心提供商。随着边缘势头的增强，这些提供商代表了该行业更直接的上行空间。资本押注这些基本要素是有道理的。它们需要大量的资本支出来建立，但一旦该行业开始出现，它们将稳定并产生有意义的回报。资本还支持正在构建管理平台的服务提供商，这些平台将使边缘计算成为可能。这是一个重要的机会，但可能产生的结果范围更广。考虑到有利的一面，随着该行业的蓬勃发展，边缘计算平台的战略价值对希望投资并最终收获资产的大量战略实体来说变得清晰，资金将继续朝这个方向流动。

边缘生态系统中关键基础设施的状态可以用流动来形容。其中一些类别相对较新，在液体冷却、浮动数据中心和卫星通信传输领域正在试验新技术。由于与云计算的联系，已经有一个可以建立的基础。取得进展也更加有可能。在许多方面，我们需要做的是针对新的需求和场景调整熟悉的模型，而不是重新发明轮子。挑战在于如何将所有这些不同的部分组合在一起。边缘计算生态系统仍在发展中，协调和伙伴关系将决定其推进的速度。



第三章

# 边缘硬件

**Mary Branscombe**

自由技术撰稿人

边缘计算包括跨越广泛位置和条件的系统组合，并支持各种用例。某个用例可能需要高功率GPU来实现人工智能（Artificial Intelligence, AI），而另一个用例则可能需要低功耗来延长电池寿命。设备的位置，例如微型边缘数据中心或壁挂式工业机柜，对硬件施加了不同的限制。所有这些因素都致使边缘硬件变得广泛，这些硬件将在2021年继续保持多样化。

---

## 锐化边缘：LF边缘分类和框架。

[最近的一份白皮书](#)面向对边缘计算的技术和业务方面感兴趣的读者，介绍了由Linux基金会（Linux Foundation, LF）及其附属组织LF Edge托管的一组开源软件项目。它概述了LF Edge分类和框架，并描述了公司参与这些项目并从中受益的机会，从而加快边缘计算应用的开发、部署和变现。

---

### 服务器和处理器平台的主要趋势

部署在边缘的硬件历来是专门为特定工作负载构建的，通常是内容分发网络或物联网。随着边缘计算的普及和新的用例的出现，通用基础设施也被部署来运行类似云的工作负载。IDC预测到2023年，边缘网络将占有已部署云基础设施的60%以上<sup>1</sup>。除了已经推动边缘增长的趋势之外，大流行对劳动力和运营实践的影响将继续加速边缘位置的基础设施、应用和数据资源的交付，这一影响将贯穿2021年和未来几年。

熟悉的数据中心公司和云提供商将添加边缘产品，但形态将越来越多样化。例如，许多首批规模边缘部署系统都是使用微模块化边缘数据中心构建的，而这些系统正迅速被新的形态（如街边机柜和灯杆附件）所增强。为了满足整体连续性需求，特别是在需要计算的网路中的不同点，边缘硬件将有所不同，从电信中心办公室的全尺寸机架到工厂生产线上或通过专用5G连接的仓库中的智能摄像头，或者加固的户外地点，如赛道、石油钻塔、工厂、办公室，甚至飞机和船舶都能成为微型数据中心。

IT和运营技术（Operational Technology, OT）越来越融合，这种趋势在边缘尤为明显。

2021年也将带来更多的变化：ARM服务器处理器、AI处理芯片、GPU、智能网卡（Smart Network Interface Controller, SmartNIC）和现场可编程门阵列（Field-Programmable Gate Array, FPGA）板将越来越普遍。在边缘执行的更广泛的工作负载将增加硬件的异构性，从而产生更广泛的CPU，以及新型硬件和网络加速器。

基于ARM的芯片在边缘的物联网设备中一直很常见，但是ARM新的Neoverse平台的目标产品包括服务器、存储处理器以及网络硬件。AWS在其基于ARM的Graviton实例上投入了大量资金，这有助于验证ARM作为通用服务器处理器架构的价值。AWS还发布了其Outposts超融合系统的1U版本，其中包括Graviton2处理器。微软正在开发自己的基于ARM的硬件，用于CDN和其它边缘场景，但尚未将其用到自己的数据中心之外的地方。Apple最近发布的基于ARM的M1处理器可能会增加对该领域的关注，消费者可以看到功率和性能的提升（并为数百万软件开发人员提供架构的轻松本地访问），从而更好地全面了解ARM的平台能力。

与此同时，英特尔正在推动为物联网创建的Atom、Pentium和Xeon D SoC，作为竞争对手在用户边缘设备中与ARM和AMD竞争，例如用于工业应用的摄像头内分析和实时检查。FPGA、Xeon和ARM内核都出现在SmartNIC中，英伟达热衷于将其更名为DPU：数据处理单元为I/O、存储、安全甚至虚拟化以及网络加速提供CPU卸载，并可与GPU功能结合作为多用途硬件加速器。在中国供应商的推动下，开源的RISC-V硅架构也有可能在这里发挥作用。

近年来，超大规模云提供商已转向FPGA，用于网络卸载以释放可出售给客户的CPU资源，并且越来越多地用于AI加速，因为硬件可以重新编程以适应机器学习算法的改进。没有多少组织具备自己构建和运行类似FPGA系统的技术能力，但随着它们被打包到SmartNIC、DPU或其它加速器中，它们将变得更易于访问。而且其电源效率更像是ASIC（Application-Specific Integrated Circuit，专用集成电路）而不是GPU，因此非常适合边缘计算。

英特尔、英伟达和AMD也在采取措施为数据中心（包括边缘）提供完整的硬件和软件堆栈。英特尔将推出首款独立GPU，以及物联网专用硬件、人工智能加速硬件、FPGA和智能网卡、旨在提高CPU推理速度的Xeon指令以及基于硅光子的可组合网络交换机。所有这些选项都由英特尔的oneAPI编程模型联系在一起。

为了与垂直堆栈竞争，AMD和英伟达正在进行重大收购。英伟达已经购买了Mellanox的SmartNIC和网络技术，并宣布有意收购ARM。这将允许英伟达作为获得许可的IP提供GPU和张量核加速，除了提供自己的集成硬件选项（如EGX边缘AI平台），并配有软件即服务（Software-as-a-Service, SaaS）Fleet Command控制平面。

AMD收购Xilinx将为其带来FPGA，包括Alveo SmartNIC和加速器，该公司一直将其定位为英伟达GPU的竞争。而另一种广泛应用于ARM核心SoC中的专业硬件加速技术也不会消失。

对于任何需要实时而不是事后连接物理世界和数字世界的行业来说，硬件加速的增长反映了人工智能和其它计算密集型工作负载在（需要收集和处理数据的）边缘的重要性。这只会随着生成的数据量的增长而增加。2018年，只有10%的企业生成数据是在传统集中式数据中心或云服务之外创建和处理的。到2025年，预计75%的数据将在工厂、医院、零售店和城市的边缘创建<sup>2</sup>，其中大部分数据在边缘进行处理、存储和分析<sup>3</sup>。

## 边缘的独特硬件要求

许多边缘数据甚至可能永远不会到达云端。货船上的传感器已经从数百个增加到数万个。我们永远不会通过卫星连接将所有数据推送到云端。我们需要能运行机器学习模型的云计算能力。

但是等等，它会变得更有趣.....

受天气和港口交通的影响，货船最多只能在港口停留一到两天。您将如何安排技术人员安装硬件？答案是：你做不到。数据中心硬件在此边缘用例中不起作用。



**Jeffrey Ricker**  
Hivecell首席执行官

在接下来的几年里，边缘硬件将会普遍存在。形态和硅结构的前寒武纪（Precambrian）爆发还将持续一段时间，但是，硬件的异构性（适合在边缘处运行的不同工作负载）和对足够的一致性（允许开发人员构建能够在最大数量的位置运行的应用程序）的期望之间存在矛盾。此外，外形规格标准化将使部署更容易且成本可能更低。让机器人在需要更大容量时将新的Open19<sup>4</sup>服务器安装到机架中还需要一段时间，但预先连接的机架可以同时连接电源、冷却系统和网络，已经加速了构建和修复。

---

## COVID加速远程操作。

新冠肺炎只强调了最大限度地减少从核心到边缘的任何类型数据中心对现场专业知识的需求的重要性，这加速了远程监控、调配、维修和管理工具的开发，可以大大减少边缘计算的成本。

---

## 开放硬件的影响

外形规格的标准化是使部署更容易、成本更低的重要战略，包括寻找共享基础设施投资的可扩展点。类似于超大规模数据中心的硬件是如何围绕开放计算项目的用例专门设计的，基础设施边缘的物理和操作现实的设计正在努力进行中。Open19是一种方法，它由LinkedIn、Flex、HPE和Vapor率先提出，现在是Linux基金会的一个项目，成员包括Equinix和Cisco。

Open19提供了适用于标准19英寸机架的外形尺寸的开源标准，该机架在现有的区域数据中心和电信中心办公室中无处不在。Open19通过利用“盲插”电缆系统，实现电源和数据的无电缆安装。这使计算基础设施能够与物理机架、网络 and 电源基础设施分开安装和维护。这可以显著降低远程现场位置的运营和维护成本，并允许在机架或机架单元中异构部署专用硬件。

让机器人在需要更大容量时安装新的Open19服务器还需要一段时间，但预先连接的机架在安装任何计算之前可以同时连接电源、冷却系统和网络，已经加速了Equinix等早期采用者的构建和修复。

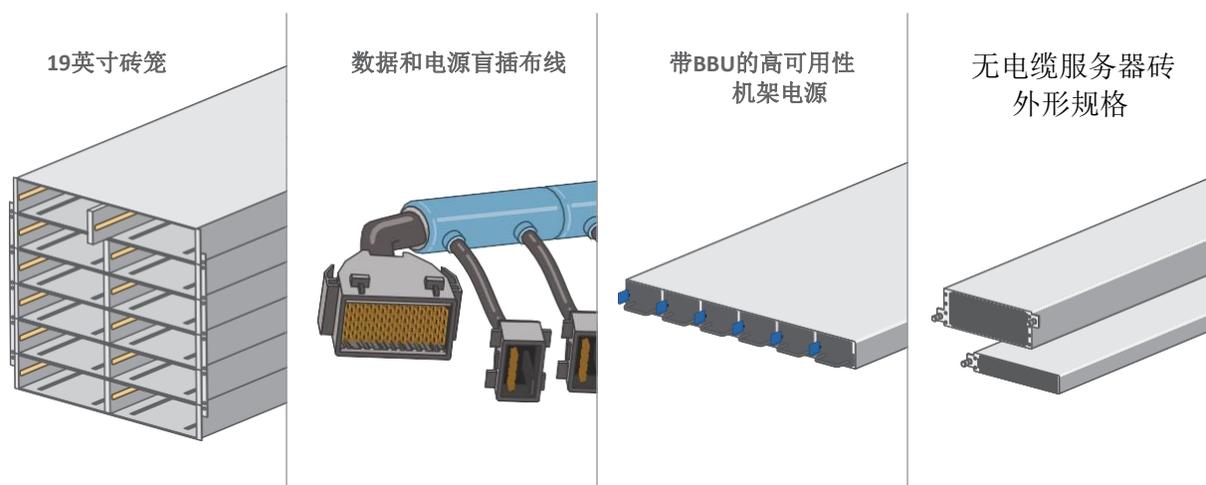


图6  
开放硬件

## 基础设施的寿命和可靠性

大多数边缘位置都将部署硬件以延长使用寿命：云硬件的使用寿命为5-7年或更久，但是预期的维护和物理服务的频率甚至更低。一个极端的例子是微软的实验性水下数据中心Project Natick，它在2020年产生了令人鼓舞的结果，不仅是因为预期的冷却效率，还因为在氮气环境下，没有受到维护方面的干扰，服务器运行的稳定性和正常运行时间：故障率为陆地上标准Azure数据中心中相同服务器的八分之一，这是除了必要性之外的一大优势。<sup>5</sup>

## 边缘的临时数据流

我认为即将到来的一个巨大变化是，我们正在进入一个大数据的世界，在这个世界中，数据流是无限的，需要即时处理。这方面还有很多大问题有待解决。

过去，你们可以存储所有数据，然后对其进行分析，但现在不能了。因为数据太多了。我们正处在一个数据流永不停止的时代。企业必须不断地处理和分析流数据，以获得持续的情报，使您的组织响应更迅速，或者满足你们的任何需求。云已经取得了巨大的成功，但无状态计算比CPU慢很多，这意味着你们将在几小时而不是几毫秒内获得结果。

此外，所有这些无限的数据大都只有短暂的价值。你们无法先存储然后再获取数据，因为以后这些数据将毫无用处。你们不在乎过去。你们关心的是使用数据来预测接下来会发生什么。因此，我们有无限制的、具有短暂价值的的数据，需要通过数据模型的动态构建来持续计算这些数据。从算法和数学上讲，这是一种全新的方法。

有关Simon对这个话题的更多看法，请在Over the Edge播客中观看他对Matt Trifiro的[采访](#)。本文是由该播客改编而来。



**Simon Crosby**  
SWIM.AI公司首席技术官  
@simoncrosby

不过，裸机（使用未配置的硬件和避免虚拟化）在边缘计算中如此受欢迎，这并不矛盾：尽管它的复杂度较高，但由于固件允许远程自动配置，裸机能够兼顾性能和易用性。正如云物联网服务简化了物联网设备的开发、部署和管理一样，统一控制平面将是利用边缘计算硬件的关键。

弹性和容灾也将在边缘发展。最大化数据中心正常运行时间的传统方法往往依赖于完全冗余（例如， $2n+1$ ）机械系统，这些系统通常成本太高，并且在边缘位置占用太多空间。在边缘环境中，系统正常运行时间将由高可用性软件和人工智能辅助自动化提供，就像当今主要依赖物理冗余的标准一样。软件编排允许开发人员在多个位置生成工作负载，高可用性软件系统可以使用实时和预测性遥测馈送将流量路由到最佳可用的位置，并在检测到故障时重新启动附近位置的服务。

虽然每个边缘资源将半自主地运行、处理和操作本地数据，但支持强大边缘应用的设施和硬件可能会分布在许多边缘位置，这使得将边缘组件的集合作为分布式系统而不是单独管理变得至关重要。开发人员将需要抽象层来减少针对单个边缘位置或特定硬件的工作。新技术已经出现，以帮助开发人员管理这些分布式系统，其中包括专门构建的应用程序堆栈，如[LF Edge的Akraino](#)提供的应用程序堆栈，旨在适应边缘条件的应用程序堆栈，以及用于做出实时决策的遥测来源，如开源[Synse API](#)。

随着混合云基础设施在边缘的发展，这种将硬件和软件交织将变得更为紧密，以提供使得边缘资源更易于使用的抽象的方法。[Google Anthos](#)、[AWS Outposts](#)和[Snowball Edge](#)、[Azure Stack Edge](#)和[Azure Private Edge Zone](#)等产品将商品硬件包装到设备中，这些设备承诺与公有云中的云服务和控制平面相同，并提供一致的应用和运营体验。对于许多组织而言，边缘硬件的选择将取决于他们需要带到边缘的云服务和云原生应用，或者在某些情况下取决于该硬件对5G专网的支持程度。

## 虚拟网络

网络硬件正变得越来越基于软件。电信公司正在推动和采用数据中心熟悉的软件定义网络（[Software-Defined Networking, SDN](#)）和网络功能虚拟化（[Network Functions Virtualization, NFV](#)）趋势，希望围绕商品“白盒”服务器设备进行标准化，从而允许将工作负载放置在低成本硬件上的更多位置。其中包括在客户终端将多个专有硬件设备整合到单个通用白盒设备上，这一点尤为重要。通用客户终端设备（[Universal Customer Premise Equipment, uCPE](#)）并不新鲜，但它已经不再是预测，而是成为了现实。许多现有的uCPE设备使用英特尔处理器，但这是ARM重点瞄准的领域。

---

## 虚拟网络的I/O趋势

现代云网络是软件和硬件以新方式融合的关键点之一。将计算添加到网卡能够让应用将功能卸载到硬件；例如，在适配器级别而不是在单独的防火墙或其它安全设备中嵌入安全规则。同样，基于[Project Zipliner](#)硬件的压缩工具等新技术使[SmartNIC](#)成为大规模分布式系统中的关键组件，促进了大量数据从边缘传输到核心网。数据平面开发套件（[Data Plane Development Kit, DPDK](#)）等技术支持向这些设备交付代码，使[Service Mesh](#)等工具能够与硬件交互，支持基于策略的网络。同时，最新硬件中对单根I/O虚拟化（[Single Root I/O Virtualization, SR-IOV](#)）的支持使PCIe硬件（包括[SmartNIC](#)）可以从虚拟机和容器访问，安全地共享硬件资源。

---

电信公司拥有充分利用SmartNIC的网络专业知识，随着更多标准化软件支持的到来，企业现在才可以使用这些SmartNIC，但它们应该非常适合边缘。

英伟达声称，数据处理单元（Data Processing Unit, DPU）的功率预算仅比服务器中网卡的功率预算有所增加。因此，这些设备可能被证明是一种高效的方式，可以在电力可用性有限的位置实现加速并释放边缘服务器上的CPU内核。可以运行SoNIC等网络操作系统的SmartNIC还可以在某些边缘位置消除对单独交换机的需求，这意味着非技术人员可以通过插入电源线和以太网电缆来安装服务器。

## 存储

正如SmartNIC从CPU卸载特定网络的处理一样，计算存储正在成为一种在数据存储的确切位置执行数据处理和简单的存储相关应用（如压缩、加密、备份或搜索）的方式。这对于在边缘运行的数据密集型应用（也是通常生成数据的地方）具有功率和性能优势，并且随着存储阵列中的嵌入式计算变得更加复杂，它可以支持更多的工作负载。

机器学习训练通常从存储中读取数据，并将模型写回存储中。将训练算法转移到可以在存储设备上执行搜索和聚合的设备上计算资源中，可以释放CPU用于其它工作，或通过允许工作负载在较低规格的设备上运行来降低功耗要求。更低的延迟甚至可以提高训练性能。

在计算存储中运行推理可以在视频保存时对其进行分析和标记，这对于没有专用视频处理芯片或GPU空间或功耗预算的设备来说是一个有用的性能提升。

计算存储甚至可以在物联网设备上运行云服务的边缘版本，因为它采用SSD和非易失性存储器标准（Non-Volatile Memory Express, NVMe）封装，适合没有其它加速选项的设备。随着三星加入了少数且鲜为人知的已经提供计算存储设备的供应商的行列，这项技术有望在长期内成为主流。

虽然边缘计算的当前趋势通常涉及更紧密的加速集成，但超大规模云提供商正在开始研究分类体系结构。为了减少熟悉的多租户方法不可避免的碎片化，其中计算、存储、网络 and 内存成为一组可组合的结构，机柜式架构（Rack-Scale Architecture, RSA）分别部署了CPU、GPU、硬件加速、RAM、存储和网络容量。然后动态组合资源以适应任意规模的工作负载；甚至主板的组件也可以进行模块化和分离。非易失性内存模型，如NVMe和英特尔的Optane，提供了一组有趣的组件，将类似内存的性能与持久存储相结合，允许在电源可靠性可能存在问题的情况下进行高性能操作。随着NVMe over TCP标准添加到Linux内核中，计算、RAM和存储的分解变得更加引人注目和可靠。空间和其它限制使这些技术对边缘环境而言特别有趣。

以足够低的延迟连接组件，从而实现更极端的解耦架构所需的硅光子将作为5G基础设施的一部分到达边缘。因此，在连接允许的情况下，从长远来看，未来几代边缘硬件中的一定程度的分解可以允许真正分布式的工作负载充分利用边缘计算和存储的多样性。

## 布局权衡

边缘的硬件考量通常是为了权衡工作负载所需的计算的最佳功耗与性能。随着更多边缘资源的部署以及工作负载在边缘或边缘与云之间的分布越来越广泛，需要考虑各种权衡，例如将特定工作负载放置在靠近用户或设备的位置以最大程度地减少延迟，或者考虑在边缘进行哪些操作以保持用于游戏或增强现实（Augmented Reality, AR）的用户设备的电池寿命。同样，这种动态调度将依赖于仍在开发的软件编排，以及有关延迟、网络条件和电源效率的准确指标，以确定在何处运行特定计算最有效。此外还将考虑哪些操作对延迟最敏感，哪些操作可以安全地运行几毫秒而不会降低关键基础设施的性能。

## 在边缘重启业务

边缘计算有望通过超低延迟服务推动新体验，但2020年的大流行迫使许多组织专注于关键业务需求。

尽管如此，我们还是看到许多客户采用边缘技术，通过自治现场操作的远程编排，使他们的业务重新上线并提高弹性。部署包括远程监控油井井口、安全提取和预处理工厂数据的解决方案，以提高PPE设备的生产。

对客户来说，关键是投资于灵活、开放的架构，使他们能够快速启动现有应用的远程编排，同时也为随着时间的推移在边缘部署新的云原生方法奠定了基础。

有关Jason对这个话题的更多看法，请在Over the Edge播客中观看他对Matt Trifiro的[采访](#)。本文是由该播客改编而来。



### Jason Shepherd

董事会主席，  
LF Edge和VP生态系统，  
ZEDEDA



第四章

# 网络和组网

**Phil Marshall**

*TolagaResearch* 首席研究官

---

## 几个关键术语

边缘计算行业在讨论边缘网络时使用了许多艺术术语。其中一些被曲解或误解。以下是从业者需要理解的几个最常见的术语：

### *时延*

在网络数据传输的背景中，数据单元（通常是帧或数据包）从其始发设备传输到其预期目的地所花费的时间。时延通常以毫秒为单位，表示数据在两个或多个端点之间的单个或重复时间点上产生的网络延迟。时延是优化边缘应用和理解网络响应性的关键指标。时延与抖动不同，抖动指的是延迟随时间的变化。网络数据的传输速度不能超过光速，这会增长距离时延，因此边缘网络倾向于使计算更接近数据。

### *网络跳*

当数据包从一个网段移动到另一个网段时，它们通常会经过路由器或交换机等设备。该设备还可能将一种物理媒介转换为另一种物理媒介，就像无线电接收器将无线电波转换为光纤一样。由于这些网络设备通常有缓冲区并涉及处理，它们往往会在数据传输中引入时延和抖动。一般规则：跳数越多，时延越高，抖动越大。

### *抖动*

在一段时间内观察到的网络数据传输时延的变化。以毫秒为单位，在测量周期内记录从最低到最高的观察时延值。抖动是VoIP、自动驾驶和在线游戏等实时应用的一个关键指标，假设时延变化很小，则这些应用对抖动的变化很敏感。

### *尾部延迟*

网络数据传输延迟的较小百分比，远大于平均水平。尾部延迟以百分位数衡量，百分位数越大代表更极端延迟条件的比例越小。尾部时延是VoIP、自动驾驶和在线游戏等实时应用的一个关键指标，假设时延变化很小，则这些应用对尾部时延的变化很敏感。

---

一些最有趣的用例，特别是那些涉及生命安全的用例，具有比当今广泛部署的网络所能容纳的更严格的性能要求。值得注意的例子包括自动驾驶解决方案、医疗保健的实时指挥和控制功能（例如，远程机器人手术）和增强的应急响应和公共安全解决方案。这些用例的关键网络基础设施需要更高级别的可靠性，例如由硬件和软件“加固”、冗余连接、高可用性编程技术和改进的实用程序备份提供的可靠性。这些额外的基础设施需求可能代价高昂，尤其是在大规模实施时。

低延迟网络是边缘计算基础设施的重要组成部分，必须以足够的密度和本地临近度来实施，以便网络连接在端点设备附近终止。随着通用边缘网络的出现，它们将重塑互联网路由数据的方式。例如，随着越来越多的数据在本地创建并保存在本地，互连密度将在边缘激增，公共和私有互联网骨干网将延伸到边缘，对等互联和数据交换将发生在接入网的一两跳内，这也是新一代边缘CDN和边缘云系统将运行的地方。

### **有多快？**

性能分析从物理定律开始，该定律规定信号将以无线电波的形式通过空气以光速传播，以大约70%的光速通过光纤电缆传播。此外，每次信号通过路由器、交换机或任何其它类型的网络设备（通常称为“网络跳”）时，引入不可预测的时延（通常称为“抖动”）的可能性就会增加。任何给定网络路由上的抖动、时延和尾部延迟量都会显著影响特定应用的交付。

但边缘网络的挑战不仅仅是时延和抖动。例如，为了让无线接入网络利用边缘计算、对等互联和交换点，无线网络必须能够在本地终止数据连接。这被称为本地突破，在不同的地理区域和不同的技术之间，其复杂性会有很大的差异。例如，在某些国家，出于竞争原因，服务提供商之间没有现存的国内对等点。需要移动服务提供商的参与和使用控制面和用户面分离<sup>6</sup>（Control and User Plane Separation, CUPS）等技术的高级控制/用户面分离，以实现移动服务的本地突破。此外，4G-LTE等现有技术可以与一些边缘计算应用一起使用，但需要100毫秒的前导码进行连接同步，这决定了可以实现的最小延迟。5G的一个关键创新是启用灵活的前导码，以满足低延迟连接的需求。此外，随着边缘计算需求的增长，现有的回传网络可能无法处理它们产生的速度和容量需求，这将需要中间一公里网络提供商升级其网络，以便他们能够添加新的、更快和更高容量的路由，并且要求添加的路由具有更离散的可预测性。

### **网络生态系统**

边缘网络是使用固定和无线连接，并依照公共和私有解决方案构建的。在某些情况下，特别是对于本地部署，需要新的和升级的网络设备，如通用客户终端设备（universal Customer Premise Equipment, uCPE），以利用当前和新兴的边缘设备。此外，除了云增强和边缘原生服务外，可能需要新设备来支持边缘服务，包括内容分发网络（content delivery network, CDN）和应用分发网络（application distribution network, ADN）。

从绝对容量的需求和必要的服务需求多样化的角度来看，随着边缘计算继续蓬勃发展，网络带宽和性能方面的需求将显著增加。网络容量和性能方面的挑战并不是什么新鲜事，这些挑战推动了持续的技术创新。在过去十年中，技术创新已经向虚拟化和容器化网络架构迁移。

## 边缘原生应用的激励措施

端到端时延的可接受程度在很大程度上取决于应用。但这是一条双向的道路：编写的應用取决于当今的技术可以提供什么。如果应用的需求远远超前于技术，那么应用将因为缺乏可行性而消亡。让技术和应用来共舞是至关重要的。一个短暂地领先另一个，另一个追上然后进一步向前，这个过程循环往复。这是一个良性循环，相互影响。

边缘原生应用指的是非常依赖边缘的应用，如果没有边缘计算，它们就无法工作。正在开发的一种边缘原生应用被称为可穿戴认知辅助，本质上结合了增强现实和人工智能。我相信，在五年内，这些应用的用例将出现，并作为扩展工业故障处理的专业知识的一种方式。

为了加快这一进程，让我们推动风险投资的多米诺骨牌。用于激励边缘原生应用创造的投资将获得长期回报。边缘计算的最终受益者应该进行战略投资，并应用与传统风险资本家不同的成功标准。即使无法呈现曲棍球棒式的增长，这项投资也将是有价值的，因为你们正在为创建中的核心产品（即边缘计算本身）建立长期需求。

有关Satya对这个话题的更多看法，请在Over the Edge播客中观看他对Matt Trifiro的[采访](#)。本文是由该播客改编而来。



**Mahadev  
Satyanarayanan ( Satya )**  
Carnegie Group 计算机科学教授

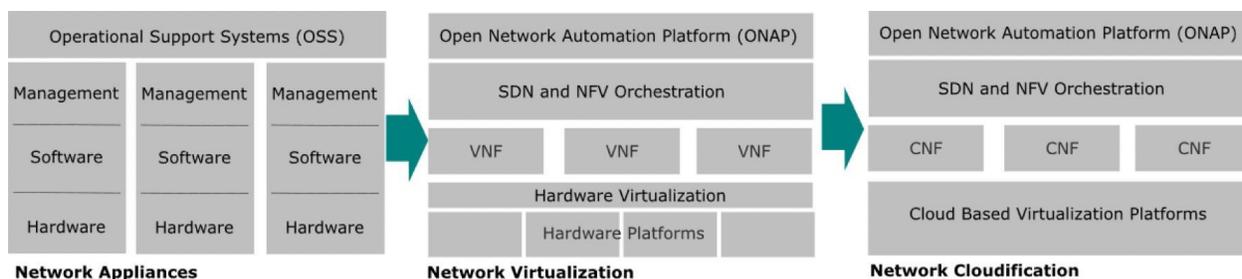


图7  
为性能和敏捷而进化的网络架构

从历史上看，网络是使用具有垂直集成硬件、软件和管理功能的专用网络设备构建而成的。在大多数情况下，网络设备由紧密耦合的硬件和软件组成，需要垂直集成以提供必要的性能。

然而，网络虚拟化技术和云技术的进步使企业和服务提供商能够将其网络功能从专用设备迁移到现代的“白盒”服务器上，以提供更高的网络性能和敏捷性。

## 网络虚拟化的关键术语

随着云计算接管包括电信基础设施在内的数据中心，虚拟网络功能（**Virtual Network Function, VNF**）成为在云环境中运行网络工作负载的公认方式。虽然**VNF**可以在虚拟化和云环境中运行，但它们并不一定要针对云进行优化。随着对如何优化云环境中的网络工作负载有了更好的理解，重点已转向以云原生网络功能为代表的设计原则，无论用什么技术（容器、虚拟机或两者的混合）来进行云原生网络功能的打包和交付，以云原生网络功能为代表的设计原则将成为重点。

### 云原生网络功能

云原生网络功能（**Cloud Native Network Function, CNF**）是实现网络功能的云原生应用。**CNF**由一个或多个微服务组成，并基于一些云原生原则开发。这些原则包括不可变基础设施、声明式API和“可重复的部署过程”。

### 网络功能虚拟化

根据ETSI的定义，网络功能虚拟化（**Network Functions Virtualization, NFV**）是通过使用虚拟硬件抽象将网络功能与运行这些功能的硬件分离的原理。

### 虚拟网络功能

根据ETSI的定义，**VNF**是网络功能（**Network Function, NF**）的实现，可以部署在网络功能虚拟化基础设施（**Network Function Virtualization Infrastructure, NFVI**）上。

网络虚拟化包括SDN和NFV等关键技术和原则。SDN和NFV通过虚拟机或容器为VNF提供单独的网络控制和数据包转发能力实现，并使用公有和私有云原生平台进行编排。开放网络自动化平台（Open Network Automation Platform, ONAP）等网络管理和编排能力是满足虚拟化和云化网络的独特运营需求所必须的能力。

近年来，虚拟化和云化网络技术已经成熟，这得益于它们能够带来巨大的经济收益。例如，2019年9月，AT&T的首席执行官Randall Stephenson评论说，该公司当时已实现17个季度的成本控制，同比下降7%至8%，公司75%的核心网络已实现虚拟化。通过虚拟化节省成本可以使企业和服务提供商提高其网络的经济性和灵活性，以支持更广泛的边缘用例。

### **下一代SD-WAN：边缘的关键构建模块**

随着边缘计算解决方案的激增，它们需要敏捷的连接，以高效地适应不同的操作环境和服务需求。当边缘解决方案依赖于跨异构网络环境的广域网（Wide Area Network, WAN）连接时，情况尤其如此。例如，与自动驾驶汽车和移动游戏相关的移动服务必须在WAN环境中可靠地运行。软件定义广域网（Software-Defined Wide Area Networking, SD-WAN）解决方案支持网络资源的敏捷管理，以便在需要的时间和地点调配网络资源。

SDN支持的控制和数据平面分离催生了SD-WAN，使虚拟网络覆盖能够管理和编排利用多种可用网络技术的端到端WAN连接。

最初SD-WAN技术的开发专注于使企业能够将MPLS网络流量转移到成本更低的宽带连接上，确保足够可靠的端到端IP包性能。传统SD-WAN解决方案多年来一直为企业提供良好的服务，但在复杂的营运管理与维护（Operations, Administration and Management, OA&M）和大规模实现的安全管理需求方面存在一些限制。

下一代SD-WAN解决方案克服了前代产品的许多缺点。由于数量巨大、种类繁多的服务需要大规模的支撑，因此这些解决方案对于云计算和边缘计算尤其重要。下一代SD-WAN解决方案集成了OA&M自动化能力，使SD-WAN实现可以在不产生大量运营成本的情况下进行扩展。这些自动化能力利用包括人工智能和机器学习在内的各种技术来优化网络性能，减少人工干预的需求。下一代SD-WAN也在向堆栈上转移。新一代的SD-WAN不仅关注网络层（OSI第三层）的端到端性能，还在应用层（OSI第七层）上提供功能。在应用层管理和编排SD-WAN连接将带来新层次的敏捷性和效率，从而支持广泛的边缘服务和操作环境。

由于SD-WAN解决方案传统上侧重于网络连接，因此安全策略通常使用供应商特定的单点解决方案来实现。这些解决方案会带来扩展性的挑战，并存在潜在的安全漏洞，对于大型实现来说尤其明显。这见证了下一代SD-WAN的整体和云原生安全机制以及安全访问服务边缘（Secure Access Service Edge, SASE）框架的概念的发展。SASE框架的概念在2019年的一份[Gartner研究报告](#)中首次被提及。与SD-WAN相比，

## 超越云端到边缘

作为一个不断思考如何技术发展途径和方向的人，我一直在思考的一个问题是“云之后会发生什么？”十几年前，我们通过构思边缘计算来回答这个问题，现在我称之为经典边缘计算。我们通过将计算机放置在数据生成的位置附近来降低时延。边缘计算的新方向是让计算成为网络基础设施的一部分。边缘计算机让自动驾驶、AR和VR体验、快速动作云游戏、物联网分析、实时视频分析等应用成为可能，如今也将提供核心网络服务。例如，作为蜂窝无线接入网一部分的信号处理功能、使机器间通信成为可能的路由和转发机制、以及实现蜂窝移动核心网的网络功能都将与我刚才谈到的应用共存于相同的服务器上。总的来说，边缘和云将形成一个计算连续体，边缘的功能比之前预期的要多得多。我相信这就是我们要追寻的方向。

创新的脚步非常快，但改变范式的想法需要时间才能渗透进来，尤其是当它们可能具有破坏性的时候。云是个好主意。边缘是一个同样大，甚至更大的想法。边缘的含义启用无处不在的低时延计算。

值得庆幸的是，我不需要再费力向人们传递边缘计算的必要性。现在，我看到的是，大多数有商业头脑的人都在努力思考如何最好地将边缘变现——如何点亮这些很棒的新服务。

环顾四周，我注意到涌现出许多边缘计算公司，他们正在开发令人印象深刻的产品。我认为在未来几年，产品创新的速度会加快。边缘不仅如此，它还有发展的势头，而且正在变得无处不在。

有关Victor对这个话题的更多看法，请在Over the Edge播客中观看他对Matt Trifiro的[采访](#)。本文是由该播客改编而来。



Victor Bahl博士， Azure for Operators技术研究员兼首席技术官，  
微软  
@SuperBahl

SASE具有云原生设计，通过管理单个端点和服务边缘节点之间的连接，将网络和安全功能集成到一个统一的架构中。通过SASE软件栈，服务边缘节点被部署在边缘和云数据中心中。通过这种方法，SASE简化了支持边缘服务的端到端安全性。

### **边缘网络、边缘交换机和互连**

边缘计算对网络基础设施提出了新的要求。为此，专用边缘网络应运而生。传统回传网络过载的背景下，新的后端服务可能需要在边缘节点间迁移，保持足够接近相关的数据和设备，尤其是当设备处于运行状态时。在边缘，网络路由会监控延迟和拥塞，同时，网络路由可以根据QoS目标动态重新配置。边缘网络实时适应应用和网络条件的服务方面越来越敏捷，通常是通过整合数据中心和云技术，如VXLAN（虚拟可扩展LAN），这些技术允许创建动态层2网络。动L2网络可以在保持IP地址不变的情况下，简化后端服务从一个边缘服务器到另一个边缘服务器、从一个L2交换机到另一个L2交换机的实时迁移，同时保证服务的连续性。在其它条件下，这种服务的连续性难以实现。

网络之间的数据交换能力一直是互联网和云服务交付的重要组成部分。全球互联网交换点（用于网络汇聚和交换数据的地点）数量的增长，有效降低了成本、提高了网络速度、助力网络规模扩张，成为互联网效率提升的一个主要因素。随着边缘计算需求的增长，对新网络路由的需求也将相应增长，需要更多靠近边缘的位置进行数据交换。目前，一个城市中用于数据交换的网络汇聚点（如电信机房和互联网交换中心）数量有限。随着边缘计算基础设施的建设，许多设施将发挥网络间数据交换点的作用。网络汇聚于这些位置，为边缘服务提供支持，降低边缘服务延迟、更缩短光纤距离、减少网络跳数。随着计算在边缘变得更加分散，网络交叉连接也将变得更加分散。

### **无线边缘**

边缘计算网络与部署在边缘的设备的连接依赖各种无线技术。尽力而为的边缘服务由Wi-Fi和低功耗无线接入（Low Power Wireless Access, LPWA）等未经许可的无线技术支持。Wi-Fi用于本地提供宽带服务，版本不断升级，如Wi-Fi 6和802.11be。LPWA在非授权频谱中提供广域覆盖，尽管只有窄带能力。与此同时，越来越多的边缘服务，尤其是边缘原生服务（如协作自动驾驶汽车和移动沉浸式游戏），对网络可用性、可靠性、带宽和延迟性能要求极高，可能超过非授权频谱技术可提供的能力。

卫星连接用于全球覆盖的边缘计算服务的主干网络，如海洋或石油平台应用。近年来，高吞吐量卫星（HTS）技术的出现显著提高了卫星性能。卫星星座按轨道可分为低轨（LEO）、中轨（MEO）和地球同步轨道（GEO）卫星星座。更高轨道的GEO卫星可以提供更广的覆盖，并且所需的卫星数量更少，但连接延迟更大。

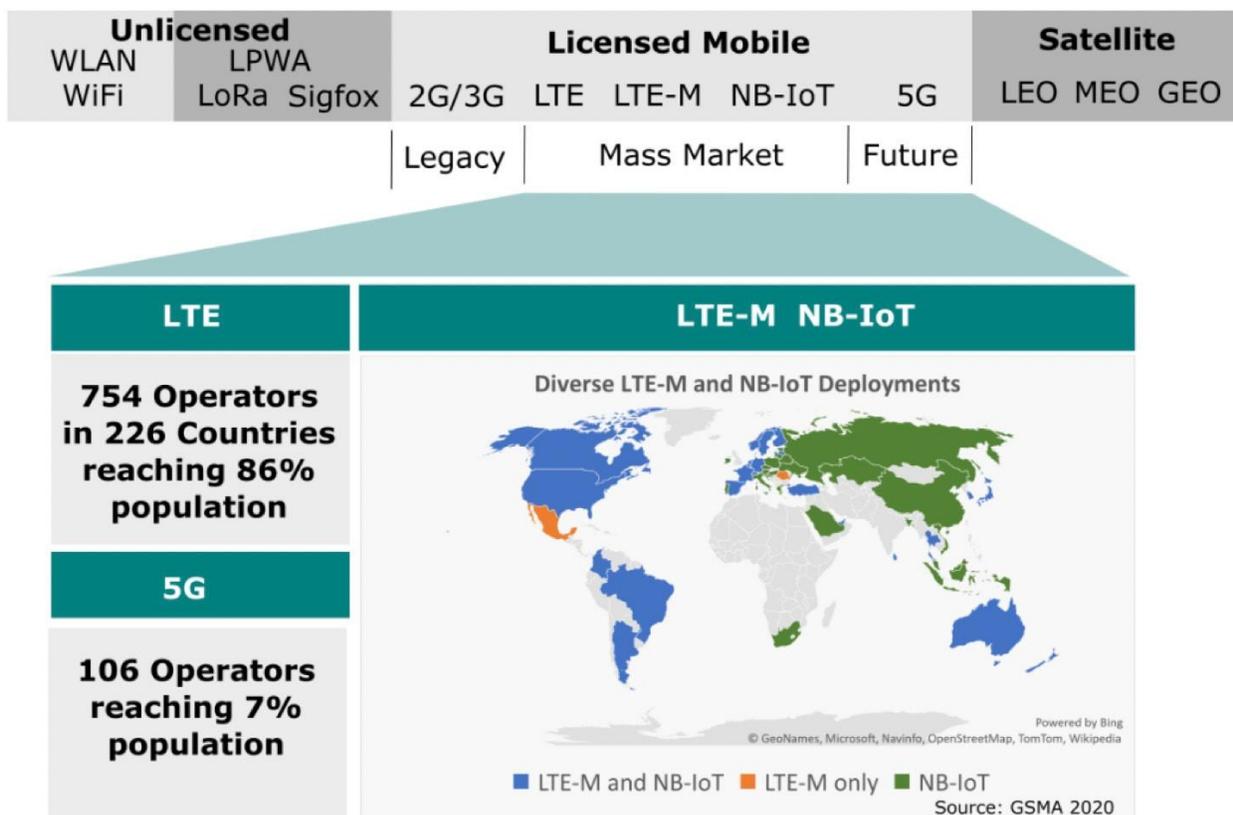


图8  
无线连接频谱使用情况

在车队管理和医疗设备的无线边缘应用场景中，授权频谱是更理想的方案。4G-LTE、LTE-M（Cat-M1）、NB-IoT（窄带物联网）和5G等授权频谱都有望用于无线边缘连接。所需资源可以通过与移动网络运营商的商业关系获得，在可以获得私有和工业许可证的市场中获得，或者部署在共享频谱许可证中，例如美国的公民宽带无线电服务（Citizens Broadband Radio Service, CBRS）频段。

每种方法都有其优缺点。电信运营商关系可能是最简单的选择，但需要运营商参与，同时为相关边缘项目提供支持。私有网络成本更高，但企业对网络拥有更大的控制权。CBRS和共享频谱解决方案很有吸引力，但在频谱资源竞争激烈的地区可能会遇到性能问题。

传统的2G和3G技术过去一直在使用，主要用于连接边缘物联网设备。如今，4G-LTE已经广泛使用，衍生的LTE-M和NB-IoT已在美洲、欧洲和亚太地区部分地区部署。如今，4G-LTE及衍生技术通常是授权频谱频段中最适合无线边缘连接的技术。目前正在部署的LTE解决方案将在未来十年甚至更长时间内长期运营。

5G技术虽然处于起步阶段，但其发展势头在许多市场越来越强强。5G关于边缘计算最有趣的一个点在于，5G本身就是一个边缘计算用例。

## 边缘是关于服务的分发

不要纠结于“边缘”位置的定义。消费者或商机需要的位置就是边缘。

在边缘方案的帮助下，国际化SaaS应用的客户有了更多的参与感，也获得了更多的保护。在边缘方案的帮助下，即时所在国家有本地数据本地监管要求或相关隐私安全顾虑，在当地的销售和服务安全交付也不成问题。云和托管都不属于边缘，至少不是大多数解决方案所需要的边缘。边缘更关注如何帮助业务准确发放至所需要的地方，而不是已有的技术。



**Mark Thiele**

Edgevana创始人兼首席执行官

支持5G的虚拟化网络功能需要高度分布式的数据中心基础设施，在射频头数毫秒范围内放置白盒服务器，以支持虚拟BBU（基带单元）功能。这类数据中心（通常是微型模块化数据中心）可以容纳足够多的服务器，在运行5G网络的同时，还可以在边缘运行云服务。这种部署模式有可能提升5G网络基础设施的经济性，因为这些设施承担着运行5G网络以及被托管的应用和服务的双重职责。

5G的价值主要来自以下四个方面：高带宽连接、超高可靠性超低时延连接（Ultra-Reliable Low-Latency Connectivity, uRLLC）、网络切片（根据性能需求分配资源）和海量物联网连接（Massive Machine-Type Connectivity, mMTC）。这些特性乍一看非常具有吸引力，但同时也带来了成本以及其它方面的问题，具体包括：

- 5G的带宽性能取决于宽带频谱资源的可用情况。由于这些宽带频谱通常处于较高频段，因此无线覆盖难度较大。
- 当前大多数5G部署都是与4G核心网络功能非独立组网（Non-Standalone, NSA），不支持uRLLC、网络切片或MTC功能。2021年，许多移动运营商计划在其5G覆盖范围内加快5G核心网部署，提供端到端5G独立组网（Standalone, SA）。
- 5G中的uRLLC和网络切片等高性能功能，不仅与技术功能的可用性有关，还取决于5G网络设计，包括站点密度和基础设施加固、备份和冗余，传统电信网络设计的“五个9”（99.999%）可用性可能无法满足公共安全、协同自动驾驶或指挥控制系统等业务和关键任务对基础设施的性能需求。

## 前进方向

当今用于边缘计算的许多网络技术都是为不同的目的设计的，如通信和互联网连接，而不是机器类型的连接。然而，像5G、下一代SD-WAN和SASE等技术已经标准化，非常适合解决正在采用和面向未来的众多边缘计算用例。

随着数字服务的激增和对边缘计算需求的推动，对网络性能的多样性要求将继续增加。我们必须在考虑现有网络技术的能力、各方需求以及其它因素（包括总拥有成本和地理覆盖要求）的基础上仔细评估这些要求。对于只能存在于边缘计算环境中并将长期主导市场的边缘原生用例来说，情况尤其如此。

第五章

# 边缘软件

**Simon Bisson**

自由科技记者

软件是边缘计算的核心，软件与应用交付、边缘硬件管理以及网络工作负载分配息息相关。生态系统正在构建在网络边缘运行的新的堆栈，从超大规模云、物联网、城域数据中心以及内容分发网络和Web中汲取经验，将它们融合在一起，以适应新的硬件、新的网络、以及新一代应用。

2020年是超大规模云提供商在边缘领域加倍努力的一年。他们将重心放在数据中心和云原生平台的城域规模部署上，抓住受长期趋势和疫情需求驱动的盈利机会。另一个原因是他们看到了WebAssembly正在做的工作，并开始研究将WebAssembly作为边缘二进制的运行环境。以一致性为目标，工作负载获得了应有的关注。

随着新冠疫情大流行继续在全球蔓延，2021年边缘计算的情况与2020年大致相同，但发展过程中的资源整合较以往更加迅速。Kubernetes等开源技术不断为边缘应用奠定新的基础，帮助边缘应用从数据中心迁移微控制器，甚至可以为军用飞机上的软件提供新架构。如果开发人员希望向边缘迁移，那得花一年时间研究如何使代码可移植、可扩展，这样当工作负载在边缘节点之间迁移、以及在边缘节点与变成现代软件中枢的超大规模云之间迁移时提供足够的支持。

要说边缘网络软件发展现在大家最关心的是什么，那就是如何让工作负载尽可能靠近需要它的地方。公有云延迟较高，当涉及到云游戏、实时物联网分析、自动驾驶等应用场景时，将计算放在需要的地方可以确保响应足够敏捷，避免影响用户体验。

将工作负载置于边缘意味着需要我们调整应用构建和运行的方式，找到构建和部署代码的方法，让代码可以在从城市数据中心的服务器到客户场所设备中的微控制器等日益多样化的硬件上运行。虽然我们在边缘所做的大部分工作与我们处理网络其它位置计算的方式基本相似，但边缘也提出了我们必须面对的新挑战，例如管理高度分布式的应用和数据，以及编排大规模边缘操作。

### **全新边缘堆栈**

云原生技术和DevSecOps对用户管理系统和软件的方式产生了重大影响，允许通用抽象在边缘交付软件并实现自动化操作。广义地说，可以将边缘堆栈看作三个不同的层，它们需要不同的工程技能。

最低一层是系统层，由硬件、操作系统、管理程序构成，可以直接用户边缘的物联网设备和服务提供商边缘的专用基础设施等边缘硬件直接交互。

接下来一层负责实施和管理。VMware vSphere、Microsoft AKS（Azure Kubernetes服务）、开源Kubernetes和OpenStack或Red Hat OpenShift和RDO（OpenStack的RPM分发）等工具都运行在这一层，提供支持现代应用所需的服务。随着Azure的IoT中心或Node-Red等边缘解决方案的加入，这一层的范围不断扩大，为基于事件的操作提供平台级支持。

顶层的则是用于部署和操作应用的工具。这些工具内置在持续集成/持续部署（Continuous Integration/Continuous Deployment, CI/CD）管道中，并使用GitOps等方法，它们提供的层允许以边缘网络所需的规模有效管理分布式应用。

而这三层需要一层通用的观察层，这样相关各方可以根据需要获取信息。传统的日志记录和监控服务仍然是现代应用操作的重要组成部分。例如，ELK堆栈（Elasticsearch、Logstash和Kibana）等工具可以提供日志整合、查询和看板功能，Prometheus可以提供监控功能。将机器学习与日志和指标分析结合，可以预测故障和发现安全漏洞。

边缘技术特别适合使用云原生工具来提供一种替代的管理和控制方法，因为许多管理工具在设计时并没有考虑分布式架构或边缘架构可能需要的全球规模。

## 边缘代码

当设备所处位置较远、连接成本较高时，网络边缘的一些情况对设备上打包、交付、部署代码提出了更严格的要求。这意味着推送到边缘的代码应该是要自包含的：每个构建本身都必须完整，任何更改都需要一个完整的包，不仅包括代码，还包括所有配置、所需的库和软件定义的环境，确保容器或虚拟机可以在任何地方运行而无需依赖。

由于延迟是边缘应用的一个关键问题，因此保持尽可能多的边缘功能非常重要。这可能会对应用设计产生重大影响，同时需要改变代码管理方式。如果动态应用需要直接连接到API，可能会存在风险，可以将多个应用的代码和内容打包到一个软件包中，确保最佳性能。

许多应用程序使用带有瘦主机操作系统的容器，如Flatcar Linux，将资源需求保持在最低水平，而用户界面可以利用像JAMstack（JavaScript、API和标记）等方法在本地预渲染内容和缓存数据，使用页内JavaScript处理交互并根据需要显示内容。

通过自包含的方式提供应用可以简化管理：代码可以作为一个整体构建、测试和部署。任何更改都需要完全刷新。可以将错误打包并报告给开发人员进行修复。

## 工作负载编排

在边缘计算的高度分布式基础设施上运行实时工作负载给开发人员和运营商带来了许多复杂的挑战。要如何分配工作负载？如何有效实现故障倒换和异地容灾？如何移动服务满足设备的移动性需求，例如在无人机或自动驾驶车辆中，移动设备跨地域移动时保持连续性和服务承诺？

## 规模管理面临的挑战

如果边缘只是蜘蛛网架构上的一个端点，它会带来一系列新挑战，同时也让一些众所周知的挑战再次成为关注的焦点。

云计算超越了传统数据中心，计算能力需要尽可能靠近最终用户（无论是人还是机器）。通过扩展云基础设施以高效和高度自动化的方式管理大型、分布在多地的体系结构变得至关重要。



### Ildikó Váncsa

开源基础设施基金会生态技术负责人 @IldikoVancsa

为了解决这些复杂的调度问题，许多开源和其它类型的编排技术应运而生。这些编排系统将日益复杂的边缘标准级别纳入考虑，实现了工作负载分配、实时自动决策，降低了从开发人员 and 操作员操作的复杂度（他们希望只关注所需要的SLA）。边缘计算的自定义调度器可能考虑工作负载要求的许多复杂属性。除了典型的调度属性，如处理器、内存、操作系统的要求，偶尔还有一些简单的亲和性/反亲和性规则，边缘工作负载还可能指定以下部分或全部属性：

- 地理位置
- 时延
- 带宽
- 韧性和/或风险容忍度（即正常运行时能达到多少个9的可靠性）
- 数据主权
- 成本
- 实时网络拥塞
- 对专用硬件（例如GPU、FPGA等）的要求或偏好
- .....

新的网络和数据中心系统已经开始通过实时数据传送提供遥测技术。现代调度算法可以接收这种遥测，并以此为依据做出实时和预测性的工作负载放置决策，开发人员无需了解背后的复杂原理。

目前最流行的编排解决方案大多基于开源Kubernetes。开源中出现了边缘编排算法，如[云原生计算基金会（Cloud Native Computing Foundation, CNCF）](#)，以及来自Rafay Systems和VMware等公司的私有解决方案。

## 无服务器

现代无服务器和功能即服务（Function as a Service, FaaS）平台特别适合短暂运行边缘计算工作负载。它们快速实例化，并降低了管理底层服务器和编排层的复杂性。由于这些功能本身不存储数据，它们被用于处理已经存储在边缘的数据——这使得它们非常适合用来从边缘数据中获取所需要的值。无服务器架构最适用于可以在短时间内处理且不需要保留任何状态的元素。此外，由于边缘资源预计比在核心网运行的资源更昂贵（因为成本更高、定价更弹性），无服务器功能可以降低边缘服务TCO，因为它们可以根据需要进行部署，然后快速释放，因此开发人员只需为功能运行的短暂时间付费。

## 边缘数据

在边缘交付软件时，我们需要考虑的不仅仅是代码，还有数据。虽然许多边缘操作，尤其是那些专注于工业物联网的边缘操作，处理流数据并将其路由到数据中心和公共云托管应用，但我们仍然需要考虑如何处理数据。由于边缘到核心的带宽是一个重要的限制，了解移动数据和构建旨在处理分布式数据的应用体系结构的成本非常重要。此外，边缘应用可能运行在存储空间有限的设备上，因此需要为当前工作负载提供适当的数据缓存以避免延迟问题。

开发人员可以通过编写客户端代码来解决这些挑战，这些代码可以与Google的Spanner或Microsoft的Cosmos DB等核心分布式数据库配合使用，并使用它们的替代一致性模型。Cosmos DB是首选方案。通过利用Cosmos DB的会话一致性功能处理边缘客户端发起的查询请求，在限制对当前操作的更新频率的同时，后台一致性的动作可以确保全局实例都是最新的。

而Couchbase这样的NoSQL数据库正在为分布式操作引入自己的一致性模型，并且可以在边缘硬件和核心系统上运行。能够直接在本地存储上工作，使用数据库引擎处理同步，可以显著提高速度，尤其是在与预测缓存结合使用时。

像Macrometa这样的初创企业正在使用边缘优先原则构建数据库技术，如果成功，将引入新的方法来在动态边缘环境中存储和检索数据和状态，预计一家或多家公司将在全球范围内提供边缘存储即服务。

## 基于消息传递的体系结构

基于消息的体系结构（如Actor/Message）非常适合边缘环境。在边缘环境中，事件驱动的操作很常见。微软研究院和其它机构的研究工作产生了在分布式操作中处理完整的ACID（原子性、一致性、隔离性和持久性）事务的方法，这种方法有望改进处理分布式数据和管理边缘缓存内容的方法。消息传递体系结构还可以帮助解决不可靠的连接，使用队列和事件网格来管理事件。

## 小型支持设备

新一代功能强大的低功耗设备运行完整的操作系统，并能够支持现代应用环境。例如，最新一代的Raspberry Pi的计算模块有一个可用的PCIe（PCI Express）通道，支持SSD存储，现在操作系统支持Ubuntu服务器Linux版本，以及MicroK8s Kubernetes环境。

ARM架构设备集群可以使用这个或K3s构建有效的低功耗服务器环境。使用以太网供电（Power over Ethernet, PoE）连接供电的设备的快速部署的技能门槛也很低。只需一通电话就可以按需下载Helm chart和容器，完成预制镜像的配置

Cloudflare和其它城市边缘供应商的投资正在扩展WebAssembly工具，允许编译后的代码在JavaScript引擎上运行，提供一套标准接口，允许WebAssembly代码在浏览器之外运行。WebAssembly系统接口（Web Assembly Systems Interface）很可能成为一项重要的边缘技术，因为它提供的运行环境可以跨不同设备运行，不论是基于ARM架构的微控制器还是Intel服务器。用户可以在熟悉的语言和环境构建代码，包括Rust、Go和C#，在部署和运行之前，使用标准构建链编译成WASI伪汇编语言。

## 寻找杀手级应用

边缘计算概念诞生不过四年时间，早已被IT人员所熟知。几乎所有人都同意，这项技术将长期存在，并为工业4.0、医疗保健、电信、零售等各个领域提供优秀的解决方案。不过，我们仍然在寻找杀手级应用。

边缘尚未在其最有希望的两点（即高带宽和低延迟）上找到有效的应用。虽然有许多边缘应用，但我们仍在寻找杀手级应用。为什么会这样？是因为我们的期待不切实际？还是我们承诺过高？我认为，我们只需要找到将人工智能、5G、分析和迄今尚未问世的技术结合起来的正确方法。



**Ashok Iyengar**  
Garage Solution

工程：网络边缘计算，IBM云

微控制器是一类重要的边缘设备，因此任何应用开发策略中都需要考虑。然而，软件部署和管理仍然是一大问题，特别是在大规模部署固件时。Twilio收购了Electric Imp，将其软件分发平台添加到公司的物联网解决方案组合中，并提供了一种使用无线网络和中央部署平台来管理软件更新和配置的方法。

微软的Azure Sphere采用了类似的方法，建立在安全的应用实施和定制的嵌入式Linux之上，具有硬件强制的可信启动和数字签名，以确保应用的完整性。使用端到端软件部署模型，应用从Azure分发到设备，并使用工具来管理使用云服务作为工件存储库的设备池。

新技术正在使用熟悉的云原生管理层为此类平台添加改进的软件支持。Microsoft的Krustlet方法使用Kubernetes在微控制器上部署和管理基于Rust的应用，并使用WASI作为公共运行环境运行这些应用。当应用被发现并添加到设备池时，可以自动将其添加到新的边缘点。由于WASI目前缺乏标准部署模型，Krustlet允许使用Kubernetes熟悉的节点管理功能向设备交付和更新代码。

另一个Microsoft Kubernetes项目Akri使用仅通过API或驱动程序公开的设备。这些叶子设备可以被标准协议识别，并添加到资源池中，供Kubernetes应用使用。例如，可以发现摄像机流，然后在应用节点上分发。

## 超融合边缘

在相对较小的硬件上使用虚拟和容器化应用使HCI系统成为边缘计算的理想选择，超大规模云提供商提供工具将它们集成到混合云系统中，并部署到分支机构和其它边缘位置。

Microsoft 2020年秋季对其Azure Stack HCI软件套件的更新也体现了这一趋势。这次更新对微软的Azure Arc应用程序部署和管理工具，以及Azure托管Kubernetes的一个版本提供了支持，并绑定到GitOps workflow中。类似地，Amazon Web Services拓宽了Outposts产品线，新推出其基于ARM Graviton处理器的1RU产品（机架单位RU是标准服务器机架上的空间尺寸，1RU=1.75英寸）。Google最近将其Anthos套件移植到裸金属服务器上，并努力通过电信运营商版Anthos将合作伙伴带去边缘。

总部位于纽约城外的Hivecell为远边缘位置提供了一个超融合解决方案。他们的自联网和完全托管的设备有望在任何环境提供可扩展的“边缘即服务”。通过一个例子可以看出云定价模型如何影响边缘市场——Hivecell提供硬件、软件、应用部署和支持作为统一服务的一部分。

所有这些产品都有共同的目标，即在网络边缘提供易于安装、易于管理的云原生平台。将边缘部署所需的所有软件元素捆绑到一个平台中是一个合乎逻辑的做法。这降低了最终用户的风险，同时为软件部署提供了一个已知目标，允许开发人员使用熟悉的工具和方法来构建和交付打包软件，不论是MSIX安装程序还是Helm和CNAB（云原生应用程序包）等Kubernetes技术。

这些一揽子解决方案为最终用户和服务提供商解决了许多部署问题，因为他们不再需要考虑硬件部署和管理的每个方面。相反，他们可以直接与客户合作，支持客户专属的边缘计算需求。

## 边缘云市场

行业专家长期以来一直警告称，“先有鸡还是先有蛋”的问题可能会限制边缘技术的商业成功。一方面，缺乏广泛的边缘基础设施部署将限制边缘应用第三方开发人员的商业收益。另一方面，可用的应用数量太少意味着对边缘基础设施的需求不足。

整个2020年，大型云供应商发布了各种各样的产品，将他们的生态系统引入混合、本地和边缘环境。5月，IBM推出了Edge Application Manager，希望在边缘环境中编排和交付其Cloud Pak生态系统。12月，谷歌通过多个独立软件供应商提供的边缘应用生态系统扩展了其Anthos混合云平台，希望能在多个垂直细分市场实现应用。与此同时，Amazon Web Services在宣布年度re:Invent大会上推出了更小的1U和2U版本的Outposts产品，以及用于运行托管工作负载的弹性容器服务（Elastic Container Service，ECS）和弹性Kubernetes服务（Elastic Kubernetes Service，EKS）的“Anywhere”版本。

这些举措以及不断扩展的开源生态系统，让已有的边缘云托管应用被可以被更多的公司和用例使用，而不是仅仅局限于传统的电信运营场景。

# LFEDGE 项目

Linux基金会（Linux Foundation，LF）是一个成立于2000年的非营利性技术联盟，旨在规范Linux，支持Linux的发展并促进Linux的商业应用。LF及其项目拥有来自40多个国家的1500多家企业会员。LF还受益于支持200多个开源项目的3万多名个人贡献者。

Linux基金会LF Edge组织成立于2019年。LF Edge是一个伞形组织，旨在为独立于硬件、硅、云或操作系统的边缘计算建立一个开放的、可互操作的框架。该组织拥有结构化和厂商中立的治理体系，其使命如下：

- 促进物联网、电信、企业和云生态系统的跨行业协作；
- 加快组织对边缘计算的采用和创新步伐；
- 通过提供中立的平台来捕获和分发整个组织的需求，为最终用户提供价值；
- 促进边缘项目之间的协调统一。

## 项目分类

每个边缘层都代表了可伸缩性、可靠性、时延、成本、安全性和自主性之间的独特权衡。一般来说，用户边缘的计算反映了有线或无线局域网（Local Area Network，LAN）上相对于它们所服务的用户和进程的专用操作资源。同时，服务提供商边缘和公有云通常代表广域网上相对于用户和进程的共享资源（XaaS）。

在许多应用中，用户边缘工作负载将与服务提供商边缘工作负载协同运行。用户边缘上的工作负载将针对时延关键性、带宽节省、自主性、安全性和隐私进行优化，而服务提供商边缘上的工作负载将针对规模进行优化。例如，人工智能/机器学习模型可能在集中式云数据中心或服务提供商边缘进行训练，但会下推到用户边缘执行。

边缘与边缘之间的边界并非明确不变的。如前所述，当CPE资源部署在本地时，服务提供商边缘可以融入用户边缘，以便为用户提供连接和计算作为托管服务。同时，用户边缘也可以延伸到最后一公里网络的另一侧，如企业自有的私有云数据中心。边缘的边界是可变的，这给我们带来的启示是，在特定环境下，工作负载在边缘连续体的最佳运行位置，还是受到技术和逻辑的限制。

我们需要意识到实际存在的一些限制。但不论如何定义各个边缘层，最终目标都是为了让开发人员拥有更大的灵活性，能够尽可能地将云原生开发实践扩展至边缘-云连续体。

下面的部分将深入探讨LF Edge，以及LF Edge各个项目是如何实现这一目标的。

## 边缘大众化

我坚信最好的方法是从你想要解决的问题开始。找出你不能做但你需要做的事情。找到这些差距，就能找到需要解决的问题。

我们正在努力的一个解决方案是大众化，即通过开源使更多的人能够访问物联网和边缘。当我们尝试为具有不同需求的应用和解决方案扩展覆盖范围时，需求会发生变化。在构建标准化的协议方面，有很多工程工作要做。方法如同石头汤：大家一起构思和利用它。通过提供这些开源项目和基础设施，您将为更多的采用者和更多应用和解决方案打开闸门，缩短上市时间。

一起来看看已经开始采用的可能性。边缘结合了我们所知道的很多内容，无论是安全性、密码学、从不同协议收集的传感器数据、区块链还是机器学习。当我们不再将边缘视为独立的东西时，将会有那么一刻，边缘只是互联网结构的一部分。这会是美好的事情。边缘不是狭隘的。边缘是一切。

有关Malini对这个话题的更多看法，请在Over the Edge播客中观看他对Matt Trifiro的[采访](#)。本文改编自Over the Edge播客。



**Malini Bhandaru**

Vmware的物联网和边缘开源主管

## 项目更新

与LF组织的其它项目一样，LF Edge是一个技术精英管理机构，并设有技术咨询委员会（Technical Advisory Committee, TAC）。该委员会通过遵循[项目生命周期文件（Project Lifecycle Document, PLD）](#)流程，协调项目工作，并鼓励结构化的增长和进步。所有新加入的项目从第一阶段——“种子”阶段开始。TAC认为这一阶段的项目对顶层项目或整个边缘生态系统很重要（或具备这样的潜力）。第二阶段——“成长”阶段是针对正在孵化的项目，以达到影响力阶段，并且已经确定了达到该水平的成长计划。最后，进入第三个阶段——“影响力”阶段的项目，意味着已经达成发展目标，并已处于开发、维护和提供长期支持的自我循环周期。

## 简化开发人员的生活

为了加快边缘计算的采用，边缘平台需要减轻开发人员和运营工程师在管理与基础设施配置、工作负载编排、流量路由、扩展和监控相关的复杂性的负担，同时最大限度地减少对应用程序设计的影响。

这就是边缘平台在未来互联网中扮演的关键角色。



**Stewart McGrath**  
Section首席执行官兼联合创始人  
@stewmcgrath

### 第3阶段-影响力阶段的项目



图9

LF Edge Akraino项目范围

## 分布式数据的处理和起源

随着我们所有的边缘数据开始在庞大的网络中传输，问题出现了...

我们如何验证数据在传输过程中的某个点没有被伪造或篡改？我们如何证明数据的处理方式符合法规？当数据从一个盒子到另一个盒子，从一个应用到另一个应用时，我们如何让传输路径可视化？在数据到达最终目的端后，是否有可能建立一种客观的衡量方法来确保数据的安全性和真实性？最后，我们要如何存储数据呢？

没有一家供应商有能力调查技术创新的整个格局并自信地回答所有这些问题。合作伙伴间的合作将使边缘成为现实。



**Trevor Conn**

戴尔CTO办公室软件工程总监

也可以用作自定义新边缘蓝图的起点。目前，有20个由Akraio蓝图在用户和社区成员提供支持的真实硬件实验室中进行了测试和验证。

Akraio社区的用户和成员共同努力，为开发人员和开源参与者提供共享资源，从而简化跨不同硬件平台和体系结构的开发。该项目与多个上游开源社区/SDO合作，如Airship、OpenStack、ONAP、ETSI MEC、GSMA、TIP、CNCf和ORAN。Akraio提供了一个完全集成的解决方案，支持集成堆栈的零接触供应和零接触生命周期管理。

2020年8月，[Akraio第3版（Release 3, R3）](#)提供了一个功能齐全的开源边缘堆栈，可在全球范围内实现多样化的边缘平台。借助R3，Akraio给大量全球组织提供了部署和PoC，并通过提供经过社区审查和测试的边缘云蓝图来部署边缘服务，为新级别的灵活性提供创新支持，从而快速扩展5G、工业物联网、电信和企业边缘云服务。新用例以及新蓝图和现有蓝图为互联车辆、AR/VR、边缘人工智能、Android云原生、SmartNIC、电信核心和Open-RAN、NFV、IoT、SD-WAN、SDN、MEC等提供了边缘堆栈。

添加新蓝图（Akraio第4版（R4）的一部分内容）和发布Akraio API门户是2021年计划的一些主要活动。

Akraio第4版（R4）中一些选定的新蓝图与互联车辆、面向AR/VR的集成边缘云（Integrated Edge Cloud, IEC）边缘堆栈、人工智能边缘、支持云游戏的5G MEC/切片系统、轻量级5G电信边缘上的公有云边缘接口（Public Cloud Edge Interface, PCEI）和企业应用相关。

欲了解更多信息，请访问[Akraio](#)网站。



**EdgeX Foundry**是一个行业领先的边缘物联网即插即用、支持生态系统的开放软件平台。

EdgeX是一个高度灵活且可扩展的开源软件框架，可促进物联网边缘设备和应用之间的互操作性。它通过为设备数据采集、标准化和分析提供可替换的参考服务，加速了许多垂直市场的物联网用例和业务的数字化转型。**EdgeX Foundry**还支持新的边缘数据服务和先进的边缘计算应用，包括在边缘实现自主操作和人工智能。

EdgeX物联网中间件平台充当双重转换引擎，从边缘的传感器（即“事物”）收集数据，并向/从企业、云和本地应用发送/接收数据。**EdgeX Foundry**拥有700多万容器的下载量，作为LF Edge的第三阶段项目，拥有广泛的行业支持。它在Linux基金会下供应商中立的Apache 2.0开源许可模式下可用。

LF Edge成员和EdgeX Foundry贡献者创建了一系列的补充产品和服务，包括商业支持、培训、客户试点项目和增强设备连接的插件、应用、数据和系统管理和安全。

此外，EdgeX与其它几个LF Edge项目，如Akraino、Home Edge和Open Horizon，密切合作。EdgeX是Akraino边缘轻量级物联网（Edge Lightweight IoT, ELIOT）蓝图的一部分，并在Akraino社区下的实验室进行测试。Open Horizon正在构建一个集成项目，将分阶段展示EdgeX Foundry作为一个容器解决方案的交付和管理。与Home Edge合作，可以将一个集中式设备指定为主设备，以存储来自不同设备的数据。

2021年，该项目将通过一个新网站继续改善其虚拟存在，允许新老用户成为生态系统的一部分，参与社区并为项目做出贡献。EdgeX中国的努力对于支持该地区不断成长的社区也至关重要。以中国为重点的项目将包括当地语言的文档、网站和开发者渠道。

有关更多信息，请访问[EdgeX Foundry](https://www.edgexfoundry.org)网站。

## 第2阶段-成长阶段项目



**Project EVE**旨在通过构建一个开放、精心策划的通用操作系统，用于在传统数据中心之外的分布式边缘部署解决方案，从而为边缘实现Android为移动设备所做的工作。EVE-OS在Project EVE内开发，可支持任何应用和硬件的生命周期管理和远程编排，可缩容成约束计算节点，并集成零信任安全模型，以满足现场边缘计算部署的独特物理和网络安全要求。

项目范围包括：

- 提供具有内置安全性的灵活的、模块化的EVE-OS
- 提供参考控制器的实现方式
- 开放编排API的规格和定义

EVE-OS支持Docker容器、Kubernetes集群和虚拟机，使组织能够将其类似云的体验扩展到物联网、人工智能、网络和安全用例中的分布式边缘部署，同时还支持传统软件投资。它提供了一个抽象层，将不同环境中的软件与边缘硬件解耦，使应用开发和部署更容易、更安全和更具互操作性。在LF Edge下托管Project EVE可确保供应商中立的治理和社区驱动的开发。

2020年，EVE社区的贡献者数量翻了一番，超过了60个。EVE-OS已被部署在制造、石油和天然气以及可再生能源领域的各种试点和生产环境中，并成为不断成长的硬件、软件和服务提供商生态系统的锚点，这些提供商为分布式边缘提供解决方案。

2021年的主要项目目标包括与Kubernetes/K3S社区持续合作，以扩展到集群边缘部署，完成对OSS的参考实现控制器的重大改进，扩展所支持的硬件和“在EVE上运行”的应用生态系统，以及集成其它LF Edge和行业成果。该社区还针对虚拟机管理器（Virtual Machine Manager，VMM）、存储层、虚拟机和容器工作流的注册表工件进行整体优化，以及改进对备选管理程序（如ACRN）的支持。

有关更多信息和文档链接，请访问[EVE网站](#)。



---

**Fledge**是一个IIoT开源平台，它简单、经济、可扩展和安全，可用于构建和运行工业应用，以实现状态监控、预测性维护、提高效率（设备综合效率（Overall Equipment Effectiveness, OEE））、提升质量、态势感知和安全性。

Fledge是一个成熟的、经过现场测试的代码库，自2018年以来一直部署在工业用例中。它提供50多种工业协议、数据映射和传感器插件，以及20多种连接到企业资源规划（Enterprise Resource Planning, ERP）、物流、制造执行系统（Manufacturing Execution Systems, MES）、历史数据、数据库和云提供商的集成解决方案。

开发人员可以利用Fledge快速入门指南及其不断成长的社区支持，为工业资产或集成快速隔离开发新协议和数据映射。通过使用可插拔过滤器、规则、机器学习运行态或脚本构建边缘应用程序，便会有所得，并与他人达成协作。

Fledge与其它LF Edge项目，如EVE和Akraino，密切合作。EVE为Fledge应用和服务提供系统和编排服务以及容器运行环境。工业运营商可以一起构建、管理、保护和支持数据采集与监控系统（Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA）和非SCADA连接的机器、工业物联网和传感器，因为它们可以扩展。Fledge还与Akraino集成，因为这两个项目都支持5G和私有LTE网络的推出。

## 细节决定成败

不要错误地认为边缘计算只是一个微型云。它需要以一种完全不同的方式来看待基础设施、应用、网络，以及部署和支持边缘服务最重要的操作工具。

到目前为止，Verizon的网络边缘产品已在市场上流通将近4年了，但我们仍在探索交付和管理的陷阱细节决定成败。所以虽然可能容易走上捷径，但必须完成大量的测试，以验证边缘应用在生产条件下能够按照预期执行。



**Beth Cohen**

Verizon云产品技术专家

2021年，Fledge将专注于以下两组特性：

- 大规模部署的生命周期管理：以安全的方式实现工业物联网应用的大规模配置、管理和发现。
- 人工智能集成：集成基于边缘的机器学习生命周期。用户将首先对数据进行标记和协调，以建立和训练模型，然后执行、分发、改进和升级此类模型，用以边缘的工业用例。

欲了解更多信息，请访问[Fledge网站](#)。



---

**Home Edge**是一个强大、可靠和智能的家庭边缘计算开源框架、平台和生态系统。它提供了一个可互操作的、灵活的和可扩展的边缘编排和计算服务平台，API也可与库和运行态一起使用，支持各种用户的家庭场景。

今年，Home Edge成功发布了第三个主要版本Coconut，有两个关键功能。数据存储提供了一个专用实体，用以分布存储连接设备的数据。多NAT边缘设备通信支持更广泛的家庭网络内外子网通信，将其用例扩展到多个远程控制发现场景。

自2019年发布以来，Home Edge一直与其它LF Edge项目合作，特别是在2020年与EdgeX Foundry的密切合作中，在Coconut版本中提供了数据存储功能。Home Edge将扩展其与其它项目的合作，从Home Edge体系结构中发展其完整的功能阵容。

2021年，Home Edge将首先专注于通过连接抽象层提供更多与MQTT和IP互联家庭（Connected Home over IP, CHIP）等各种云实体通信的协议。此外，作为延伸目标，Home Edge将尝试提供更多高级功能，例如与边缘的云同步，以及集成其它现有机器学习框架，以启用家庭中的智能管理控制用例。

有关更多信息，请访问[Home Edge网站](#)。



---

**State of the Edge**是一个供应商中立的边缘计算开放研究平台，致力于通过众包边缘共享词汇来加速创新。该项目开发免费、被广泛采用的可共享研究，用于探讨引人注目的边缘计算和下一代互联网解决方案。

**State of the Edge**相信四个原则：

- 边缘只是一个位置，不是一个东西；

- 有很多边缘，但我们今天关心的边缘是最后一公里网络的边缘；
- 此边缘包括基础设施边缘和设备边缘两端；
- 计算将存在于两端，与集中式云协同工作。

**State of the Edge**项目在LF Edge组织下管理和生成以下资产：

- [State of the Edge报告](#)，例如，目前的这份报告；
- [边缘计算的开放词汇表](#)，一个与边缘计算相关的自由许可的开源词汇库；
- [边缘计算景观](#)，一个动态的数据驱动的工具，将LF Edge项目与边缘相关组织和技术进行分类，提供边缘生态系统的全面概述。

欲了解更多信息，请访问[State of the Edge](#)网站。



**Open Horizon**是一个服务软件生命周期平台，用于管理容器化工作负载和相关机器学习资产，能够自主管理部署到设备上的应用程序，以及分布式web规模的边缘计算集群，所有这些都来自一个中央管理中心。

Open Horizon于2020年年中作为第一阶段“种子”项目加入LF Edge。它能够同时对3万多个边缘设备进行自主管理。它还拥有在单个中心处理多达1万个组织（客户端）的多租户的能力。

Open Horizon与其它LF Edge项目如EdgeX Foundry和安全设备上线（Secure Device Onboard, SDO）合作。SDO是一种“零接触”的自动化上线服务，更安全地在边缘硬件上自动载入和配置设备。与Open Horizon一起使用，提供一种零接触模型，可简化安装人员的工作、降低成本并规避不安全的实践。

2021年，Open Horizon将重点关注：

- 新的志愿贡献者的参与情况；
- 发展导师计划，计划在本年度发展12个新导师；
- 增加3个项目伙伴；
- 与其它LF Edge项目如Akraino、Fledge、Home Edge和Project EVE合作；
- 提升第2阶段成熟度。

有关更多信息，请访问[Open Horizon网站](#)。

## 第1阶段-种子项目



**Baetyl**（发音为“Beetle”）将云计算、数据和服务无缝扩展到边缘设备，使开发人员能够构建轻型、安全和可扩展的边缘应用。

Baetyl为边缘计算提供了一个通用平台，该平台将不同类型的硬件设施和设备功能集成到标准化的云原生运行时环境和API中，通过云和本地远程控制台实现对应用、服务和数据流的高效管理。Baetyl还为边缘操作系统配备了合适的工具链支持，降低了用一组内置服务和API开发边缘应用的难度。

2020年年初，该项目通过Baetyl 2.0达到了一个技术里程碑，Baetyl 2.0具有期待已久的远程管理系统和对Kubernetes生态系统的支持。

2021年，Baetyl将专注于增强易用性、远程管理和应用兼容性等技术收益。该项目将减少安装步骤，并提高Kubernetes在边缘设备上的使用程度。Baetyl-Cloud将进一步集成Kubernetes控制平面，并引入自定义资源定义（Custom Resource Definition, CRD）对象，允许使用同一组API同时管理云和边缘。

此外，该项目将加强与其它LF Edge开源项目包括EdgeX Foundry和Fledge的合作，这两个项目都将在Baetyl上运行。

欲了解更多信息，请访问[Baetyl网站](#)。



---

**SDO**是一项“零接触”的自动化上线服务，可安全自动地载入和配置边缘设备。设备只需要运送到安装点，连接到网络并上电，然后SDO就可以完成剩下的工作。这种零接触模型简化了安装人员的工作、降低了成本并避免了不安全的实践如使用默认密码发货。

SDO于2020年年中作为第一阶段“种子”项目加入LF Edge。它提供更容易、更快、更便宜、安全的设备上线方式。它扩展了物联网设备的总体有效市场（Total Available Market, TAM），进而加速了数据处理基础设施的最终生态系统。大多数“零接触”自动化载入解决方案需要在生产中确定目标平台，而SDO提供了更高的灵活性。

SDO与其它LF Edge项目如EdgeX Foundry和Open Horizon合作。Open Horizon是一个用于管理容器化工作负载和相关机器学习资产的服务软件生命周期平台。它能够在无需本地管理员参与其中的情况下，对部署在分布式Web规模的边缘计算节点和设备上的应用进行自主管理。

2021年，SDO将重点关注：

- 逐步提升进入第二阶段的成熟度；
- 完成从英特尔专有SDO架构到FIDO规范的过渡；
- 增加10个活跃的志愿贡献者；
- 增加三个有重大贡献的项目伙伴；
- 开始集成支持FIDO规范与现有的LF Edge项目（包括Open Horizon和其它两个项目）的SDO；
- 为LF Edge增加两个新成员。

有关更多信息，请访问[Secure Device Onboard网站](#)。

# 合作伙伴的更新

## 开源基础设施基金会

OpenStack基金会于2020年10月演进为[开源基础设施基金会](#)。该基金会是一个非营利性组织，其使命是支持编写生产环境中运行的代码的开源社区。在过去的十年中，我们构建和支持OpenStack项目，了解了很多个人和组织是如何利用云计算和社区正在开发的开源平台的，也看到了OpenStack只是开源基础设施拼图的一部分。名称的更改反映了范围的扩展，以帮助更多社区创建构建块来为基础设施提供能量。

虽然开源软件越来越普及，但它不仅指源代码的可用性，还指创建源代码的协作方式。基础设施是从开源中受益最多的层之一，因为每个人都依赖基础设施，尽管不是最容易区分的组件。开源基础设施的概念依赖于开源组件对系统每个构建块的可用性，这可以帮助解决诸如互操作性等挑战。

互操作性一直是一个挑战，通过标准化或仅仅从一个供应商提供的产品构建解决方案来获得的成就是有限的。由于边缘部署的规模和复杂性，云计算打破了单一供应商的环境，而边缘计算将所有未解决的问题重新置于聚光灯下。边缘计算环境由不同来源的硬件和软件组件组成，通常会形成一个大規模分布式系统，随着时间的推移有机地成长。能够将各个部分组合在一起对于边缘计算领域的成功至关重要，而这正是开源项目发挥关键作用的地方。

开源基础设施基金会支持了多个专注于边缘计算或与其相关的项目：

### OPENSTACK

[OpenStack](#)是一个开源云平台，在全球各行业领域被广泛采用。虽然该软件因其模块化架构最初被用于数据中心，但它也可以扩展到在边缘运行工作负载。由于裸机、容器化和虚拟化应用程序能够在该平台上运行，因此它能很好地满足此领域中不同用例的不同需求。

### STARLINGX

[StarlingX](#)是一个完全集成的平台，针对边缘和物联网用例进行了优化。该项目创建了OpenStack和Kubernetes之间的融合，利用容器技术运行基础设施服务，并使平台更加灵活和健壮。此架构决策还提供了在边缘仅运行容器化工作负载的可能性，以最小的占用空间使用相关的Kubernetes组件。该项目在整合了众多知名开源项目的同时，也是一个填补基础设施层在软硬件管理、编排和故障管理等领域空白的开发项目。该项目的主要特性之一是分布式云架构，用于保持中心和边缘站点的同步，同时也在边缘提供自治能力。在处理中心位置和边缘之间的连接丢失的错误场景时，这是至关重要的。此特性保证发生这种情况时保持边缘的完整功能。架构的选择符合边缘计算工作组组的分布式控制平面模型。

## 边缘计算组

[边缘计算工作组](#)（Edge Computing Group, ECG）是基金会的顶级工作组。这个工作组的目标是更好地理解边缘计算及其对基础设施层的需求。工作组的范围在基础设施层，但不仅限于任何行业细分领域。ECG正在收集用例来识别和分析需求，以基于共同特征定义参考架构模型。该工作组的活动包括使用相关开源项目作为构建块来测试和评估架构模型，以及将学习和结果记录成文档。

## OPEN-IX

[Open-IX协会](#)（Open-IX）是一个非营利性行业协会，主要通过宣传、标准和工具促进互连和互联网交换点（Internet Exchange Point, IXP）的扩展和普及。

2020年是Open-IX工具和标准的重要一年。6月，他们推出了备受期待的[互联导航器](#)的测试版，该工具允许行业从业者、分析师和研究人员去探索IXP的爆炸式增长。这个交互式工具利用[PeeringDB](#)公开的可用数据构建图示，以显示互连是如何在可选择的时间段和地理位置上发展的。互联导航器提供细化到各个数据中心和IXP的粒度，供研究分析师、行业高管和基础设施采购团队使用。

作为[美国国家标准协会](#)（American National Standards Institute, ANSI）的标准认证开发商，Open-IX在2020年正式提交了两个基础设施标准。这两个标准都被ANSI所接受：

用于互联网交换的OIX-1：该规范规范了技术、物理和操作标准，并于2020年6月被ANSI接受，是IXP的首个全球认证。OIX-1认证设定了服务和工程的最低水平，并确保公平、合理和非歧视地访问互连服务。OIX-1是基于世界级IXP管理者、工程师及其客户的广泛共识开发的。

适用于数据中心的OIX-2：该标准于2020年9月被ANSI接受，它代表了并发可维护性和开放访问的高工程标准，是希望作为网络互连点的数据中心的第一个全球认证。OIX-2认证为数据中心设定了最低服务和工程水平，确保公平、合理和非歧视地访问互连服务。OIX-2是基于世界级数据中心管理者、工程师及其客户的广泛共识开发的。

Open-IX认识到边缘计算将对互连产生重要影响。为了应对这一不断变化的演进，Open-IX继续扩大了其边缘委员会的工作范围，该委员会正在制定边缘数据中心标准。这些边缘标准将给利益相关者在为非传统环境中的应用制造、采购和部署数据处理基础设施时赋予他们权力并向他们提供信息。这项工作得到了包括边缘数据中心运营商、制造商和消费者在内的广泛支持，我们计划在未来几个月发布委员会的工作成果，并最终将其提交并作为一项ANSI标准。

作为一个由志愿者领导和主导的组织，Open-IX一直在寻求更广泛的参与度。要通过志愿服务，赞助方式，或认证方式参与进来，请访问我们的[网站](#)或联系[info@open-ix.org](mailto:info@open-ix.org)。

## 云原生计算基金会 (CLOUD NATIVE COMPUTING FOUNDATION, CNCF)

CNCF的使命是让云原生计算随处可见。正如我们过去几年看到的，Kubernetes和云原生计算在企业中的采用率急剧上升。围绕可观察性、松耦合系统、声明式API和健壮性良好的自动化的简单范式，使云原生技术在云中如此成功，对边缘来说更为重要。

CNCF内部有多个方案，旨在满足边缘计算的需求。KubeEdge和OpenYurt都试图将Kubernetes带入边缘，而K3s是Kubernetes的一个发布版本，聚焦于资源约束的设备。Tinkerbell帮助弥合物理裸机和软件领域之间的鸿沟。Kubernetes有一个物联网边缘工作组，专门探讨、设计和记录使用Kubernetes开发和部署特定的物联网应用和边缘应用。CNF工作组正在定义云原生网络应用如何帮助电信公司和企业IT组织了解如何使其网络更加云原生。我们预计，随着边缘市场的发展和成熟度的提升，我们将吸取云原生领域的经验教训，继续开展合作。

Kubernetes通常被称为“云中的Linux”，我们相信我们将看到类似的演进模式，因为Linux最初是作为一个业余操作系统开始的，但随着最终用户贡献了他们新的独特需求和功能，它不断扩展，以满足移动和嵌入式等其它环境中的新用例。

最后，CNCF坚信，云原生和Kubernetes将以积极的方式发展和影响边缘。我们期待着跨多个组织和项目的合作，以实现真正使云原生计算不仅在企业中无处不在，而且在边缘中无处不在这一愿景。

## ETSI MEC

2014年，一个代表移动领域多家前瞻性公司的小团队发布了一份白皮书，提出了云将走向边缘的想法。白皮书中假设了当涉及到为公共访问托管边缘云的实践方面时，电信行业处于领先地位。电信公司在地理和网络拓扑方面具有全球覆盖和客户贴近度的独特组合。对于这样的“电信接入边缘云”，白皮书创造了“移动边缘计算”（Mobile Edge Compute, MEC）一词，随后将其调整为“多接入边缘计算”（Multi-access Edge Compute, MEC），保留了相同的首字母缩写。

该组专家和公司还认识到，要实现MEC的潜力，需要克服许多重大挑战。其中最重要的是，需要一套标准，以确保尚未出现的MEC生态系统的关键点的互操作性。为了正面积极地解决这一问题，他们，在ETSI组织下成立了一个小组定义此类标准，即“ETSI MEC”。

从一开始，任务就很明确，尽管从未明确说明：确保MEC市场不会因缺乏明确定义的行业标准而有所延迟。然而，当团队致力于定义这些标准时，MEC的另一个方面变得很明显：在主要的电信行业标准开发组织（Standard Development Organizations, SDO）中，

他们必须应对不以典型方式与标准进行交互的一些关键客户。这些客户是应用开发人员，因此我们的任务扩展到确保MEC市场不会因缺乏明确定义的行业标准或能够使应用开发人员能够使用这些标准或工具进行开发的工具而有所延迟。

这六年来，ETSI MEC取得了良好的进展。一套可用的核心标准早已存在，并不断演进。重要的是，该团队已经进入其它SDO以前很少涉猎的领域，将API开源以简单地应用于软件中（详情请参阅[ETSI Forge](#)），提供开源测试脚本（详情请参阅[ETSI Forge](#)），最近启用了[沙箱](#)，应用程序开发人员可以在其中体验云服务与ETSI MEC定义的API的交互。

随着第一个商业MEC部署的成功，ETSI MEC团队看到了他们的劳动成果。Akraino、5G汽车协会（5G Automotive Association，5GAA）等机构对ETSI MEC API的使用表明，正在公开宣布ETSI MEC API在供应商产品和运营商系统中的商业应用。2020年9月，ETSI将ETSI MEC团队的任期延长了两年。正如该项目预计的一样，这两年该团队计划继续聚焦于核心任务，因为部分的“使用”变得越来越重要。

# 附录

# 景观

---

[LF Edge互动景观](#)，一个动态的数据驱动的工具，将LF Edge项目与边缘相关的组织和技术进行分类，全面概述边缘生态系统。该项目接受社区提供的资源，并受LF Edge的State of the Edge景观工作组监督。

# 尾注

---

- 1 DC网络研讨会：[市场洞察机会，2020年1月16日举行](#)。
- 2 高德纳：[边缘计算对基础设施和运营负责人意味着什么？](#)
- 3 DC FutureScape：[物联网全球2020年预测](#)4：到2023年，70%的企业将在物联网边缘进行一定级别的数据处理。
- 4 [Open19项目](#)是一个行业规范，它定义了跨行业通用服务器外形规格，为各种规模的运营商创建了灵活、经济的数据中心和边缘解决方案。
- 5 [Natick项目](#)细节。
- 6 [移动网络中的控制层和用户层分离（Control and User Plane Separation, CUPS）](#)。

# 致谢

特别感谢Linux基金会的工作人员和LF Edge社区对State of the Edge项目和2021年报告的支持。特别感谢Maemalynn Meanor和Brett Preston，他们非常慷慨大方、乐于助人、足智多谋。

此外，在此向State of the Edge报告工作小组致以诚挚的敬意，感谢他们为了想法、创意、介绍、写作、校对和其它做出的各种贡献昼夜不停的工作，使得这份报告与时俱进、面向未来，并与社区息息相关。感谢（开源基础设施基金会的）Ildiko Vancsa和（Section的）Molly Wojcik，你们是最棒的！同样，感谢Bill Mulligan的编辑和评论，以及Scott Anderson提供的辩论帮助。

感谢我们的作者Mary Branscombe, Simon Bisson, Phil Marshall和Philbert Shih，感谢你们在很短的期限内完成工作，并愿意就研究领域的方式和原因进行健康的讨论。

感谢曾就职于21K咨询公司、现就职于Napatech的Charlie Ashton。他是我们今年的执行主编，他一直在坚定而亲切地指导这份报告的完成。难怪Charlie在细节、专业精神和行业知识方面的声誉远远领先于他自己。

最后，感谢（Equinix的）Jacob Smith和（VaporIO的）Matt Trifiro，他们将继续领导State of the Edge项目。作为项目联合主席，他们的领导力将继续为本报告塑造供应商中立的立场和愿景。

没有你们，我们不可能做到！





STATE OF THE  
**EDGE**

2021

 THE **LINUX** FOUNDATION

[stateoftheedge.com](https://stateoftheedge.com)