收稿日期：制作时补充 修订日期：制作时补充 接收日期：制作时补充DOI：xxx/xxxx

综述论文

雾计算研究十年：相关性、挑战与未来方向

萨蒂什·纳拉亚纳·斯里拉马 [1]

[1]海得拉巴大学计算机与信息科学学院，印度海得拉巴 500 046

通信作者
Satish Narayana Srirama，电子邮件：satish.srirama@uohyd.ac.in

arXiv:2305.01974v2 [cs.DC] 7 Jul 2023

摘要

近年来，物联网（IoT）和实时应用的发展，推动联网设备及其生成的数据以前所未有的速度增长。传统上，这些传感器数据会传输至云端进行处理，再将控制信号发送回相关执行器，作为物联网应用的一部分。这种云中心物联网模式导致延迟和网络负载增加，并损害了隐私。为了解决这些问题，雾计算 一词由思科于十年前的2012年提出，它利用邻近的计算资源处理传感器数据。自提出以来，雾计算受到了广泛关注，研究界致力于解决雾计算框架、模拟器、资源管理、部署策略、服务质量、雾计算经济学等方面的各种挑战。然而，经过十年的研究，我们仍未看到公有/私有雾网络的大规模部署，而这类网络可用于实现各种有趣的物联网应用。在现有文献中，我们只看到试点案例研究和小规模试验平台，以及利用模拟器展示指定模型的规模，以应对相应的技术挑战。造成这种情况的原因有很多，其中最重要的是，雾计算尚未为企业和参与者提供明确的商业案例。本文通过整合不同类别的挑战，总结了阻碍雾计算普及的技术、非功能性和经济挑战。本文还总结了学术界和工业界为应对这些挑战所作的相关贡献，并展望了实现实时雾计算应用的未来研究方向，同时考虑联邦学习和量子计算等新兴趋势。

关键词：
雾计算、雾计算面临的挑战、雾计算经济学、雾计算最新进展、雾计算卸载、物联网

1 引言

物联网（IoT）和实时应用的最新发展，以及智慧城市、智慧交通和智慧医疗等领域的发展，推动了联网设备数量前所未有的增长，例如嵌入式 Sensors、智能设备、智能手机和工业物联网工具等。在过去二十年中，联网设备的数量显著增加，超过了 500 亿台；由此产生的数据量也呈指数级增长，达到泽字节数量级。

全球物联网连接所产生的数据量预计将进一步增长，并在2025[1]达到79.4泽字节。在传统的云中心物联网[2,3],模式中，这些生成的传感器数据会被传输到云端，在那里进行处理，并将控制信号发送回相关的执行器，作为物联网应用的一部分。将数据迁移到云端进行处理，增加了这些应用的延迟，并带来了进一步的挑战，例如数据隐私受到损害以及网络负载增加。为了解决这些问题，思科于2012年，也就是十年前，提出了雾计算这一概念，该技术利用邻近的计算资源来处理传感器数据[4]。

自提出以来，雾计算便受到研究界和产业界的广泛关注，人们致力于解决实现和利用雾计算架构时面临的各种挑战和问题。这些方面包括雾架构、地理分布、标准化工作、资源配置、雾节点部署策略、协作式和分布式数据分析、异构性与互操作性、设备移动性、安全与隐私、可扩展性与可靠性、网络技术与通信技术，以及通过雾计算经济学促进实时应用。这些研究取得了许多有趣的成果，并已应用于多个面向物联网应用的雾计算原型系统中。在 Scopus 数据库中使用“((fog OR edge) AND computing)”进行检索，结果显示相关出版物超过 48,000 篇。

然而，经过十年的研究，我们仍未看到公有/私有雾网络的大规模部署，而这些网络可用于实现有趣的物联网应用。预计到 2030[5], , 雾计算的市场份额仅约为 3.43 亿美元；相比之下，预计到 2028[6]，云计算市场规模将达到约 7910 亿美元。

此外，在雾计算文献中，我们只看到试点案例研究和小规模试验平台，以及利用模拟器展示用于应对相应技术挑战的特定模型的规模。雾计算应用未能超越小规模试点案例研究，原因有多种。最重要的是，雾计算尚未为企业和参与其中的个人提供明确的商业案例。雾被视为邻近的云，并大力推动机会计算，因此相关应用需要附近参与者提供大量基础设施。然而，关于如何激励参与者的个人，相关文献并不多。此外，这类卸载被视为对移动运营商等邻近基础设施提供商主营业务的威胁。这也是多接入边缘计算迄今未能取得太大成功的原因之一。此外，雾设备的能源需求（有时由电池供电）相当可观，而缺乏高效利用资源的模型，也是雾计算成功应用稀少的原因。

1.1 范围与贡献

本文总结了在采用雾计算过程中形成障碍的技术、非功能性和经济挑战。本文还总结了学术界和工业界为应对这些挑战所作的相关贡献，并提出了实现实时雾计算应用的未来研究方向。本文的贡献如下：

1. 将雾计算挑战和最先进水平（SOTA）清晰地归纳为不同类别。2. 汇总并展示了各类别中的最先进水平（SOTA）及正在进行的研究。在此过程中，还绘制了一张汇总图（图 3），展示雾计算挑战及其解决方案，可作为该领域的速查参考。3. 提出了实现实时雾计算应用的未来研究方向，同时考虑了联邦学习和量子计算等新兴趋势。

本文其余部分组织如下：

我们首先探讨雾计算的案例研究，以阐明其相关性（第 2 节）。随后，我们探讨雾计算领域正在应对的当前研究挑战，以推动最先进水平的发展。在此过程中，我们还会提及这些研究可能的拓展方向，并进行深入讨论（第 3 节）。之后，我们从计算机科学新兴趋势的角度，概述雾计算的未来研究方向；这些趋势有望最终推动雾网络的部署以及基于雾计算的应用的普及（第 4 节）。第 5 节总结本文。

2 雾计算的相关性

物联网主要利用具备感知能力并通过互联网连接的实体对象，来实现有趣的智能应用。在这些应用中，雾

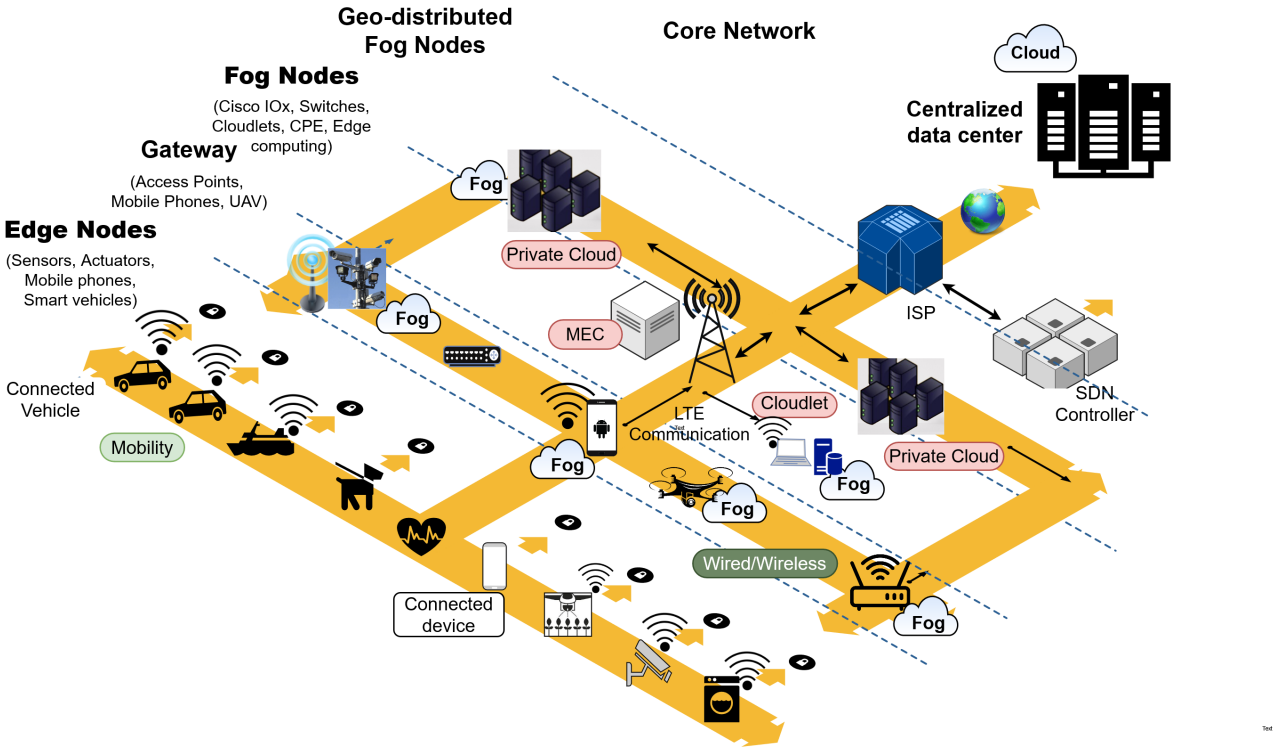

图 1 分层雾计算架构

计算提出利用雾设备上可用的计算资源。雾设备可以是网络交换机、路由器、网关设备、台式机/笔记本电脑，甚至是邻近的私有云。雾节点也可以是移动设备，因此无人机和智能手机也可以成为雾网络的一部分。图 1 展示了分层雾计算架构，其中包括边缘节点、网关设备、其他雾节点和集中式云。从边缘节点开始，直到集中式数据中心（即也包括在网关设备、邻近及地理分布式雾节点上进行的处理）的任何处理，都被视为雾计算的一部分。

这种通过资源受限的边缘设备进行机会计算的方式并不是全新的理念。早期，移动 Web 服务配置（MWSP）[7]，和移动云计算领域就对此进行了研究，提出了云端小站[8] 和代码卸载[9]。MWSP 利用 SOAP 和表述性状态转移（REST，即 REpresentational State Transfer）等标准 Web 服务通信技术，从资源受限设备和智能手机提供服务。这使它们能够以对等（P2P）方式利用机会计算。云端小站是为智能手机提供云计算服务的微型数据中心。通过代码卸载，移动应用会经过分析，并在当前负载、电池电量、WiFi/移动数据访问权限等特定上下文条件下，卸载到云中的功能强大得多的代理计算节点。多接入边缘计算（MEC）[10] 也研究了类似概念，它利用移动运营商的计算资源，例如基站所配备的计算资源。[11]提供了对雾计算及其相关计算范式（如云计算、边缘计算、雾端计算等）的详细综述。

2.1 雾计算案例研究

雾计算主要适用于需要实时响应的场景，例如智能家居、智慧医疗、互动游戏、智能交通、工业物联网等。以下是文献中一些重要的案例研究/应用。图 2 展示了一些重要的雾计算应用领域。

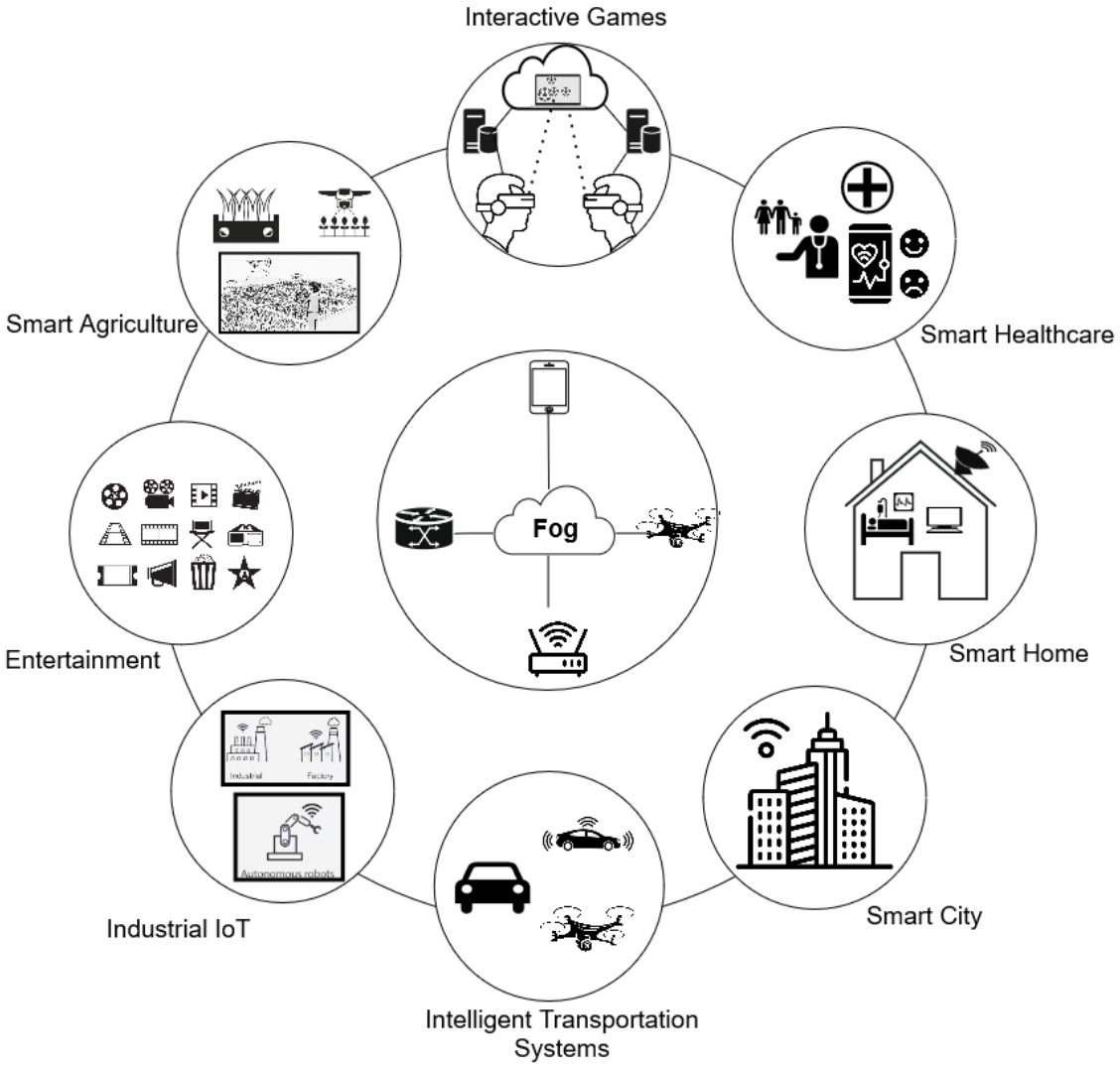

图 2雾计算的主要应用领域

2.1.1 互动游戏

最早展示的雾计算应用中，有些与互动游戏和虚拟现实（IVR）游戏有关[12,13]。这些应用基于增强现实（AR）和脑监测等技术，需要强大的处理能力；邻近的雾节点能够提供这种能力，无需将收集到的游戏数据发送至集中式服务器/云。借助雾计算，参与者之间只需交换汇总后的结果，即可实现实时游戏体验。

2.1.2 智慧医疗

这是文献中展示了大量雾计算应用的一个领域[14]。这些应用涵盖实时患者监测、老年护理和远程手术。这些关键应用都需要亚秒级响应，而雾计算凭借其近端处理能力，提供了理想的解决方案。在此类场景中，智能手机也被用作雾节点，以就近收集和处理传感器数据。在这些场景下，雾计算也十分适用，因为医疗数据具有机密性，而且在大多数情况下，最好在本地存储和处理数据。

2.1.3 智能家居和智慧城市

随着智能设备的普及，智能家居显著提升了人们的生活水平。该领域的应用/案例研究主要聚焦于家庭自动化、环境辅助生活、视频监控和实时监控。研究表明，雾计算可通过语音辅助、图像/视频和传感器数据处理，助力开展多项此类案例研究[15]。类似地，在智慧城市领域，雾计算案例研究聚焦于智能供水与废物管理、实时监控，以及交通信号灯和电网等城市基础设施的控制[16]。智能电网是现代化的电网，利用物联网和人工智能（AI）提升电网的性能与效率，而雾计算则有助于实现边缘分析。

2.1.4 智能交通系统（ITS）

思科在 2012[4] 发布的雾计算原始论文中，已经提到雾计算如何通过智能网联车辆和智能交通信号灯，助力智能交通。这些配备了 Sensors 的雾节点可以检测行人/骑行者的存在，并测量驶近车辆的速度。这些数据可用于事故预防和维护稳定的交通流量。之后，基于雾计算的研究聚焦于道路维护、交通管理和城市规划，将其作为智慧城市应用的一部分[16]。随着自动驾驶汽车和无人驾驶汽车的最新发展，雾计算可以利用路边单元[17]提供的邻近计算、存储和网络资源，实现实时视频辅助导航、车载通信、障碍物和行人检测、事故规避等功能。

2.1.5 工业物联网

第四次工业革命，即工业4.0，致力于将物联网、人工智能和云计算等先进技术与制造业和供应链管理等工业应用相结合。作为工业物联网的一部分，雾应用已应用于采矿业、智能电网、交通运输、废物管理、食品加工等不同行业，通过使用各种传感器、仪器和工业设备[18]，着力提升生产力、运营效率和安全性。雾计算促进了这些应用中对各类传感器、机器人和机器的数据同步采集，并对数据进行预处理，同时通过必要的协议转换和映射，实现不兼容的传感器与机器之间的接口对接[19]。

2.1.6 娱乐

事实证明，雾计算还有助于提升娱乐应用（如音视频流媒体）的性能和可扩展性。雾节点可用于处理和分析这些实时视频、多媒体和流数据[20]。雾计算有助于在不同场景下找到最佳数据流传输比特率，并根据当前网络负载调整视频编码速率（视频处理速度）。

2.1.7 其他

除这些案例研究外，雾计算还被应用于智慧旅游、智慧农业、环境监测等其他领域。在旅游应用中，雾节点被部署在城市各处，帮助游客寻找下一个感兴趣的地点。在环境保护方面，无人机（UAV）和水下机器人被用作雾节点，以收集和处理传感器数据，实现珊瑚礁监测和森林火灾探测等场景。在智慧农业场景中，无人机作为雾节点，用于收集和处理视频及传感器数据，以识别害虫并开展灌溉。

2.2 讨论

从这些案例研究/应用中可以推断，雾计算具有重要意义，并为不同领域的智能应用提供了广阔空间。然而，目前我们还没有看到很多雾计算的现实世界大规模部署。我们只见到一些基于雾计算的试点案例研究和小规模测试平台。在雾计算能够无缝实现之前，仍有若干技术挑战亟待充分解决。

3 雾计算挑战与解决方案

雾计算带来了诸多技术挑战，也包括非功能性挑战，例如对框架和模拟器理想解决方案的需求、资源管理和调度、安全与隐私、雾网络方面、边缘分析，以及移动性、可扩展性、可靠性、异构性和可持续性方面的问题。雾计算经济学挑战也一直阻碍着雾计算在现实世界应用中的采用。物联网和雾计算领域的研究试图应对这些挑战，而我们在此尝试通过将相关挑战和已确定的解决方案归入不同的集群，对其进行总结。在此过程中，我们还讨论了这些研究有待探索的未来扩展方向。图 3 总结了雾计算挑战和解决方案，并纳入了第 3.1 - 3.12 节相应小节中关于相关挑战的讨论要点。

3.1 雾计算框架

随着人们对雾计算的初步兴趣不断提升，研究人员开始探索建立雾计算部署的方案。文献中提出了若干框架。思科提出了 IOx，将其作为一种应用环境，构建于 Cisco IOS 和 Linux 操作系统内核之上，可部署在思科路由器和交换机等兼容硬件上，从而为资源受限的设备提供雾服务[21]。随后，Apache Edgent 等开源解决方案[22] 也相继出现，为在雾计算基础设施上进行流式数据处理提出了轻量级运行时环境。多个供应商的关注与参与促成了 OpenFog 联盟的成立。该联盟是一个公私合作生态系统，主要致力于加速雾计算的采用。OpenFog 联盟定义了用于建立雾计算的开放且可互操作的参考架构，该架构后来被 IEEE 标准协会采用[23]。

不同研究团队还提出了若干原型雾计算框架，用于展示雾计算在不同领域中的应用。Rahmani 等人开发了一种雾计算赋能的医疗保健系统原型[24]。Chen 等人[25] 开发了一个用于智慧城市监控的雾计算框架。人们还提出了用于建立雾计算架构的通用平台即服务（平台即服务）模型，例如 Indie Fog、FogBus 等。Indie Fog[26] 提出了一种利用用户驻地设备建立雾计算部署的方法或架构，例如咖啡馆中的闲置台式机和邻近的手持设备。FogBus[27] 是一种轻量级、分布式的基于容器的框架，可用于将物联网系统与边缘、雾计算和云计算相集成。FogBus 中的区块链可确保数据完整性，该框架还支持用户身份验证和数据加密等其他安全功能。

值得注意的是，若干雾计算框架基于 Docker 容器构建，因为容器足够轻量，可以在树莓派等资源受限的雾设备上运行[28]。也有一些框架专门用于执行特定类型的雾应用。Srirama 等人[29] 提出了一种框架，利用邻近雾计算基础设施，通过 Actor 编程模型 [30] 和容器执行分布式计算应用。该框架后来扩展为 CANTO[31], ，可用于在雾计算基础设施上训练神经网络，以进行边缘分析。此外，还有框架支持在雾计算基础设施上执行无服务器函数[32] 和数据管道[33] 。文献[31,27], 中讨论的相关工作对不同的雾计算框架作了很好的总结。这些框架大多是研究原型，主要用于展示不同领域中的创新应用。不过，能够提供全面客户支持、适用于实时应用的商业框架并不多，这限制了雾计算在实时应用中的推广。

3.2 雾模拟

虽然许多雾计算应用已得到演示，相关研究也在真实设备上展开，但仍需借助模拟器研究可扩展性、调度、移动性等方面。模拟器让我们能够以更具成本效益的方式研究大规模雾部署。iFogSim[34] 已开发完成，并被广泛用于评估雾计算中的不同资源管理策略和部署策略，以及模拟真实世界配置和工作负载。iFogSim扩展了CloudSim，因此继承了其云计算核心功能，例如管理虚拟化、应用、资源和调度功能。后来，iFogSim2[35] 进一步扩展，支持移动性，以及边缘和雾计算环境中的微服务管理。EdgeCloudSim[36], 是另一款基于CloudSim的工具，其中包含游牧移动性模型、网络模型和用于管理资源的边缘编排器。MobFogSim[37] 是另一款模拟器，它扩展了iFogSim，并支持移动性和虚拟机/容器迁移，以支持消费者的移动性，从而将雾服务实时迁移到另一个云端小站。



图 3雾计算：挑战、解决方案与未来展望

此外，还有一些模拟器专注于雾计算应用的特定方面，例如网络技术和业务流程管理（BPM）[38]。FogNetSim++[39]支持模拟雾应用的不同网络特性，例如延迟、丢包、传输范围等，并支持多种通信协议，例如CoAP、AMQP、MQTT、HTTP等，同时还支持不同的移动性模型。STEP-ONE[40]，将移动性与BPM相结合，使雾计算应用能够被建模为业务流程。这些流程可以在雾设备上执行，也可以通过卸载实时迁移到其他邻近的雾节点。关于支持雾计算的模拟器的全面综述见[41]。

尽管现有的雾模拟器很有趣，并且足以满足雾计算领域大多数一般性研究的需求，但如前所述，每种模拟器都专注于雾计算的特定方面，例如支持调度、移动性、网络、

符合标准的流程管理等。目前尚无整合各项独立成果、开发可用于设计更复杂雾计算场景的综合模拟器的工作。这也使得模拟器领域后续的贡献更加零散。

3.3 资源管理

雾计算应用可分为两种类型：1. 自上而下应用 2. 自下而上应用。在自上而下应用中，云服务提供商会部署必要的地理分布式雾资源，以管理雾拓扑中雾应用的执行。资源配置和管理可依据不同的服务质量参数，例如邻近性、用户负载、延迟、成本模型等。在自下而上的方法中，应用由各个雾服务提供商管理。这里的雾资源由不同供应商提供。网关设备会识别这些邻近资源，并调度雾相关任务。因此，资源发现、资源配置、调度和部署的责任落在雾应用/服务提供商身上。对于这两种类型的雾应用，资源管理都是一项巨大挑战，过去十年间的大量文献[42,43]都尝试应对这一挑战。

雾计算通常涉及存储、处理和网络资源。首先，需要识别相关资源及提供这些资源的雾节点。资源发现解决方案应具备位置感知能力，以减少地理距离和网络距离。此外，它们还应具备上下文感知能力，考虑雾应用需求以及邻近雾节点当前的负载和资源可用性。Bukhari 等人[44], 对雾节点发现和选择进行了详细的文献综述。关于雾资源分配和资源配置，相关方法可分为静态方法和动态方法。在静态资源配置中，雾节点的资源是预先固定或已知的，并根据能源效率、降低延迟、带宽使用和成本等不同目标，在雾节点上调度多个雾应用的任务。在动态方法中，雾服务提供商尝试根据需求引入额外资源。这些研究涉及详尽的成本模型、拍卖模型等，并同样考虑了多目标。Ghobaei-Arani 等人[42], 对资源分配和资源配置方法进行了全面综述。关于资源调度和应用部署，主要目标是根据雾应用需求，为可用资源寻找最佳可行分配方案，下一小节将对此进行详细讨论。文献[43]对资源管理中涉及的架构和算法进行了详细综述。

尽管已有大量文献尝试解决这一挑战，但未来仍有广阔的研究空间。研究方法应主要聚焦于多目标，同时考虑其他服务质量方面，例如可扩展性、隐私与安全、实时交互以及设备之间的互操作性。尽管成本模型已得到广泛研究，但针对雾资源提供商的理想激励模型仍然不足（第 3.12 节）。这是在现实世界中实现大规模雾计算部署的主要障碍之一。

3.4 应用部署策略

雾应用调度与部署的主要目标，是为雾应用需求找到可用资源的最佳可行分配方案。在基础设施上调度雾应用，以及相应的雾节点部署策略，已在文献中得到广泛研究[45,46,47]。这些方法主要侧重于改善雾应用的服务质量/体验质量。在服务质量方面，这些策略旨在降低延迟、成本和能耗[45]。除服务质量参数外，体验质量（Quality of Experience，体验质量）方法还考虑了更多用户视角的参数，例如所需访问速率、应用优先级和处理时间[48]。雾应用被建模为：i）整体式，即应用由单个程序构成；ii）独立式，即应用由一组独立执行的任务构成；iii）模块化，即应用由一组在不同位置执行的依赖任务构成，共同形成完整的雾应用。研究人员探索了将这三种雾应用模型部署到同构和异构基础设施上的方法，同时考虑雾用户（例如，关注截止期限和优先级[49]）以及服务提供商（例如，高效利用资源并实现利润最大化[50,51]）双方的目标。

文献中的雾节点部署策略基于单目标或多目标。相关问题大多被建模为整数线性规划（ILP）（例如[52]）、混合整数线性规划（MILP）（例如[53]）和马尔可夫决策过程（MDP）（例如[54]）。由于这些多目标策略属于 NP-hard 问题，因此提出了多种启发式算法（例如常数因子近似[55]）和元启发式算法（例如基于遗传算法（GA）[56],、模拟退火（SA）[57],、粒子群优化（PSO）[58]）。文献[59]总结了用于雾应用部署和调度的自然启发式元启发式算法解决方案。

除了这些方法之外，机器学习（例如强化学习（RL）[60]，、残差循环神经网络[61]）和博弈论（例如斯塔克尔伯格博弈[62]）也被应用于跨雾拓扑高效调度应用。Goudarzi 等人[45] 对雾节点部署策略进行了详尽总结。

然而，大多数雾部署解决方案都是基于模拟器提出的，真正通过小规模实际实现进行演示的寥寥无几。在实时雾应用中实现部署策略这一挑战，仍有很大的研究空间。

3.5 安全与隐私

由于雾计算主要在网络边缘的资源受限设备上提供计算、存储和网络服务，因此面临多种安全与隐私泄露风险。通常认为，雾比云计算更安全。采用雾计算后，随着传感器数据在本地汇集和分析，对互联网的依赖会降低，从而消除互联网上的窃听和中间人攻击等威胁。由于用户数据不会离开本地环境，隐私也能得到更好的保护。然而，边缘设备与雾设备之间的通信更容易受到篡改、干扰和拒绝服务等攻击[63]。由于雾设备受到资源限制，通信中无法应用许多标准安全协议，例如加密和公钥密码学，因此这一问题会进一步加剧。

多项研究致力于解决雾计算中的安全与隐私问题。首先，雾节点协助在多种物联网应用中对用户进行身份认证[64]。然而，雾计算的去中心化特性，以及用户和雾节点的移动性，使身份认证成为一个复杂问题。为应对这一挑战，研究者提出了协同认证方案[65]。关于雾计算中的安全协议，研究者提出了轻量级密码学，其特性在 ISO/IEC 29192 中进行了讨论，并包含 PRESENT、CLEFIA 和 LEA 等分组密码方案[66,67]。然而，由于公钥密码学固有的计算复杂性，目前尚无基于这种轻量级密码学的公钥密码学方法。因此，针对雾节点上的瞬态数据存储，并为了实现参与节点之间机密且保护隐私的数据共享，研究者提出了基于高效密钥交换协议[68] 和同态加密[69]的解决方案。

雾计算面临的另一项重大安全挑战是入侵检测，因为恶意的内部和外部攻击者可能会入侵雾层级中的不同实体。文献中提出了多种基于异常、机器学习和统计的方法来进行入侵检测。文献[70]对雾环境中的入侵检测系统进行了全面讨论。研究者还提出了基于所有参与节点的安全属性、旨在确保雾计算端到端可信性的解决方案[71]。文献[63]对雾计算中的安全进行了详细综述。文献 [72]总结了基于区块链、用于应对雾计算中安全、隐私、分布式信任管理和可靠性挑战的解决方案。然而，安全属于非功能性需求，而且互联网中定期会出现新的威胁，因此显而易见，雾计算安全是一个持续的研究领域，未来仍有广阔的研究空间。

3.6 通信技术与协议

在分层雾计算架构（图 1）中，边缘云连续体由边缘节点、雾节点和云数据中心组成，设备之间有三种连接／通信方式：1. 边缘设备与雾节点之间的无线连接；2. 雾节点之间的有线／无线连接；3. 雾节点与云数据中心之间的有线／无线连接。多年来发展出的多种通信技术与协议，使这些连接／通信得以实现。这些技术尤其着眼于优化能源效率、通信范围、标准合规性、带宽等，从而促进物联网／雾计算应用。Perera等人[16], 提供了雾计算领域所用通信技术的详细总结。论文还介绍了每种通信技术所属的开放系统互连（OSI）模型网络层。

无线通信主要通过物理层和数据链路层进行，WiFi、蓝牙、低功耗蓝牙（BLE）等技术通常用于边缘与雾节点之间的通信。近场通信（NFC）和射频识别（RFID）用于几厘米到数米范围内的短距离通信。对于长距离通信（城市和郊区范围为 2–50 公里），可使用低功耗广域网（LPWAN或LoRaWAN）或 Sigfox 等技术。这些协议功耗低、成本低、比特率低，专为物联网领域的双向安全通信而设计。移动通信技术，例如

此类无线通信也使用 4G 和 5G，此时智能手机充当网关设备和雾节点。还值得注意的是，基于雾计算的无线接入网[73] 在 5G 系统中可提供较高的频谱效率和能效。

在网络层、传输层和应用层等较高层上进行无线通信时，会使用 ZigBee、Z-Wave 等协议。ZigBee 是一种广受欢迎的无线网状网络标准，具有低功耗、低成本和高吞吐量等特点。ZigBee 需要应用层网关，通过以太网或 WiFi 连接到互联网。Z-Wave 旨在促进智能家居应用中的设备到设备（D2D）通信。同样，6LoWPAN（低功耗无线个域网上的 IPv6）使低功耗设备能够进行基于 IP 的通信[16]。

对于有线通信，以太网上使用标准 TCP/IP 协议。具体而言，为支持雾计算，有人提出采用长距离无源光网络（LRPON），使网络覆盖范围可达 100 km[74]。下一小节将讨论雾网络挑战方面的进一步进展。

在物联网／雾计算应用中的应用层数据交换方面，会使用超文本传输协议（HTTP）、消息队列遥测传输（MQTT）、可扩展消息与在线状态协议（XMPP）、受限应用协议（CoAP）、高级消息队列协议（AMQP）等协议。Donta 等人[75], 对物联网应用层协议进行了详细综述。尽管存在多种选择，如何为特定雾应用选择理想的通信技术与协议仍是一项重大挑战。

3.7 雾网络

互联网的传统网络架构和协议并非为物联网对高可扩展性的需求而设计。数十亿台联网设备以及传输到云端进行处理的泽字节级传感器数据，导致核心网络出现拥塞。雾计算通过就近处理数据来解决这一问题。然而，值得注意的是，增强雾节点的计算能力并不能完全取代云。云计算与雾计算本质上互为补充，需要在不同应用中协同使用。然而，要同时采用云和雾，并使其能够在任何地方访问，并非易事。为此，需要采用至少三层架构，并满足相应的协调与编排要求。因此，需要一个中间网络层来编排雾与云服务器之间的通信、雾设备之间以设备到设备（D2D）方式进行的通信，并实现无缝的服务交付和切换机制，以支持雾节点的移动性。软件定义网络（SDN）是一种新兴的计算与网络范式，可用于编排这一中间网络层[76]。

SDN 将控制平面与数据平面分离，以实现对网络流量的灵活控制。集中式服务器负责控制，因此可以在该集中式节点上定义网络路由和传输规则，使通信更加灵活、智能[77]。这样一来，网络交换机便可将全部硬件资源用于转发数据，而不必同时用来计算路由。OpenFlow 是一种开放协议，为控制器与交换机之间的通信提供了标准方式，支持对流表进行重新编程和更新。文献中对 SDN 辅助雾计算进行了广泛研究。Tomovic 等人[78] 提出了一种面向基于雾计算的物联网的 SDN 辅助控制与监控框架。Baktir 等人[76] 详细研究了雾计算/边缘计算如何从 SDN 中受益。首先，借助 SDN 控制器，可以获得雾网络的全局视图，其中包含可用资源（雾节点的内存和存储）以及软件应用等信息。这些信息可用于为雾服务提供精细化的服务质量供给[79]。Xu 等人[80] 将 SDN 与 MQTT 协议结合，以有效、可靠地传输物联网数据。论文还表明，SDN 可在雾计算基础设施中有效运行。在此方案中，SDN 控制器部署在一个雾节点上，该节点充当 MQTT 客户端的代理。

SDN 控制及雾层级中的其他功能可通过网络功能虚拟化（NFV）[81]进行部署。借助 NFV 的虚拟化技术，网络功能可与专用物理网络硬件解耦。因此，网关、交换机和防火墙均可虚拟化，并作为雾节点部署，同时也可在其中部署 SDN 功能。研究表明，NFV 技术能够提升电信服务配置的灵活性，例如 TelcoFog 控制器[82]等解决方案。基于 SDN/NFV 的雾计算 / 边缘计算解决方案将在 [83] 中进一步讨论。

虽然 SDN 控制器能够高效管理异构雾网络，但协调器的最佳部署仍然是一个重要的设计问题。还需考虑控制器的可扩展性问题，为此，人们提出了分布式 SDN 网络。在这种方法中，物理上相互独立的 SDN 控制器分别管理一组子网，并

彼此同步，从而实现逻辑上集中的网络视图。Hakiri 等人[84]提出了一种支持 SDN 的无线雾架构，采用混合 SDN 控制平面。不过，这项研究仍有很大的拓展空间。此外，在现成的网络交换机上实现雾计算也是一个活跃的研究课题[85]。

3.8 移动性

移动性是雾计算领域最值得关注的挑战之一，因为智能手机、车辆和无人机等多种雾设备都具有高度移动性。在雾应用中，产生传感器数据并充当雾用户的边缘设备，以及执行中间处理的雾设备，都可能是移动的。例如，在自动驾驶汽车和智能交通系统（ITS）等应用中，车辆会移动，而路侧单元可以充当静态雾节点。同样，在需要从远程位置提取传感器数据的应用中，无人机可以充当雾节点，负责收集和处理数据。在这两类场景中，边缘节点或雾节点的移动都会降低雾计算的性能。

移动性主要会导致接入点发生变化。因此，正在处理的数据和当前服务应迁移到新接入点处的雾节点。已有多项研究尝试解决雾计算环境中的移动性管理问题[86,87,88,89]。例如，Ghosh 等人[90], 提出了一种支持移动性感知的协作框架 Mobi-IoST。在该框架中，移动用户改变位置时，系统会通知一个集中式节点；该节点会分析用户的移动模式，并借助马尔可夫模型预测用户的下一个位置。当用户重新连接到新的雾节点时，雾服务会迁移到该节点，最终将结果交付给移动用户。Mobi-IoST 框架揭示了雾移动性管理的各个步骤，这些步骤在[37]中得到了进一步分类。研究人员对这一移动性管理流程中的中间步骤进行了广泛探讨，同时也为后续研究留下了空间。例如，[91]对雾计算中的迁移和切换过程进行了深入考察。

雾计算中的移动性管理通常通过仿真进行研究，因为其中包含太多动态参数，无法通过实时应用全面观察。MobFogSim[37] 是一款支持移动性以及虚拟机/容器迁移的模拟器。STEP-ONE[40], 将移动性与 BPM 相结合，支持将雾计算应用建模为业务流程，并可在雾/边缘节点之间实时迁移这些流程。Gill 和 Singh[41], 在全面评述雾模拟器的过程中，对所有支持移动性的模拟器进行了分类。

移动性会显著降低雾应用的服务质量（例如延迟、可扩展性、可靠性等）和安全性。因此，雾计算对高移动性设备的支持是一个非常重要、需要进一步研究的问题。此外，为支持高速移动用户和汽车通信，有必要开发快速且无状态的握手协议和身份验证协议[92]。

3.9 可扩展性、可用性与可靠性

许多现有的算法和方案旨在应对雾计算面临的各种挑战，但它们无法很好地扩展到拥有数十亿联网设备的物联网规模。相关研究要么在基础设计中忽视了可扩展性，要么在真实设备上测试时无法获得足够的资源。例如，第 2 节讨论的试点案例研究中，只有极少数将可扩展性视为应用的内在组成部分。文献中的可扩展性研究大多通过模拟器进行，并假定特定的环境条件。这些仿真可能遗漏若干关键参数，只有大规模部署雾网络和基础设施，才能证明这些方案在现实世界中的适应性。因此，强烈建议研究界通过实际实现来验证所提出方案的可扩展性[11]。

物联网/雾网络的可扩展性会导致可用性问题。邻近的雾节点可能没有足够的资源来支持所有雾用户，导致其中一些用户没有雾节点可用于卸载。有关资源管理挑战的文献探讨了这一问题[42,43]。移动性也会导致可用性问题。边缘设备/雾用户可能已经移走，导致雾节点完成处理后无法交付结果；另一种情况是，任务交付给雾节点后，雾节点可能已经移走[86]。安全问题也会加剧可用性问题，例如拒绝服务（DoS）攻击；与安全挑战相关的研究（第 3.5 节）正是针对这一问题展开的。

雾计算在可扩展性和可用性方面面临的挑战所引出的必然问题是可靠性问题。雾计算的可靠性涉及故障和恢复两个方面。现有文献从不同背景出发研究了雾计算的可靠性。Yao 和 Ansari[93], 研究了可靠性感知物联网中的雾计算资源配置。Hou 等人[94], 试图在协同利用雾节点进行分布式计算的过程中解决可靠性问题。他们将任务分配设计为一个优化

问题，兼顾延迟、可靠性和能耗。Desikan 等人[95], 研究了在雾网络中进行资源配置时，延迟、可靠性、成本和能耗之间的关系。Duc 等人[96], 详细综述了利用机器学习在边缘云连续体中进行可靠资源配置的研究，并指出了大量未来工作方向。

3.10 异构性与可持续性

物联网处处涉及异构性，包括异构设备、异构架构和异构网络[97]。雾计算通过“物联网集线器”等解决方案处理边缘节点的异构性。这些集线器充当不同物理网络之间的桥梁，并通过全 IP 网络将它们连接起来[98]。雾节点也具有异构性，因为它们可以是网络交换机、路由器、网关设备和邻近的计算资源。因此，它们可能具有不同的硬件架构和特性、软件兼容性、支持的通信协议、能源需求，以及处理和存储能力。不过，雾用户应能够通过无缝卸载利用雾资源。Hong 等人[99], 提出了 Mobile Fog，这是一种平台即服务（PaaS）模型，可提供编程抽象，并允许应用使用异构雾资源，同时支持运行时动态扩展。类似的 PaaS 模型也在诸如[100]等解决方案中提出。后来，人们探索在雾计算基础设施上运行容器，以应对异构性。容器对操作系统进行虚拟化，可在任何地方运行，包括树莓派等资源受限的边缘/雾设备，从而成为卸载的理想解决方案[101]。Docker 容器等标准化容器解决方案有助于实现雾计算中的互操作性。

在应对部署策略等其他挑战时，也会考虑雾设备的异构性。例如，在 Kat- tepur 等人的研究中，[102], 通过估算传统机器人运行时算法在异构硬件上的计算时间，来决定是否将任务卸载到邻近的雾节点。附录 1 的 [11] 对雾计算中涉及异构性的研究进行了分类。

可持续性挑战主要涉及雾网络中设备的能耗。异构雾节点和边缘/物联网设备可能部署在森林、雷区、水下等位置，以实现不同的智能场景。因此，这些节点可能采用电池供电，或依赖可再生能源（如太阳能、风能或振动能）。因此，在应对雾计算的各种挑战时，降低这些边缘/雾设备的能耗至关重要。应对能量感知计算卸载（例如 [103]）、能量感知调度（例如 [104]）、能量感知移动性管理（例如 [105]）等雾计算挑战时，都会考虑能源效率。该领域的未来研究应关注传感器和边缘设备的能量采集器与电池储能。此外，确定雾节点应部署在何处、与终端用户保持多近的距离，以优化能源使用，也很有意义。

3.11 边缘分析

在边缘云连续体中，为实现有趣的物联网／雾计算应用，会对从物体／设备收集的泽字节级传感器数据进行分析、解读和呈现，并贯穿各个层级。边缘云连续体中的数据管理和边缘分析包括数据集成（传播、联邦和整合）、存储、预处理（过滤、匿名化、错误检测）、批处理和流处理，以及资源配置。跨雾层级的数据存储与交付已得到详细研究，数据即服务等解决方案也已出现[106,107]。

跨边缘和雾设备的数据处理称为边缘分析，其中包括预处理和流数据处理[20]。数据可以被视为在由多个处理过程组成的管道中执行，每个过程负责某项特定任务，例如收集、过滤、基于规则沿多个路径传播、合并等。这些过程也可以基于无服务器计算，即一种事件驱动的函数调用方式。用于边缘分析的无服务器数据管道方法已在[33]中进行了评估。边缘分析能够从数据流中及早获得洞察，并保护云端数据存储免受海量数据、高数据速率和网络拥塞的影响。雾基础设施还可用于对收集到的物联网数据执行分布式数据分析，通过协同利用雾节点的存储和处理能力来实现[29]。

由于云端具备无限的处理能力[108]，因此分布式数据分析最好在云端执行。对于云端的传感器数据分析，可以采用 Hadoop MapReduce 等分布式数据处理框架，以及 Apache Spark 等基于内存的替代方案。此外，由于物联网主要涉及大规模流数据，因此可以使用 Apache Kafka 等消息队列来缓冲数据，并将数据馈送至 Apache Storm 和 Apache Spark Streaming 等流数据处理系统 [109]。

此外，所执行的边缘分析也可以基于机器学习（ML）。例如，Drolia 等人[110]，提出了一种运行于雾设备上的 Pre-Cog 系统，通过缓存和预取快速识别图像。Abdulkareem 等人[111]，详细综述了利用机器学习在雾基础设施上执行边缘分析的方法。文献[112]深入研究了物联网背景下的机器学习模型及其相应功能，例如聚类、分类和特征提取。一些通用的可分布式算法，例如 k 近邻（k-NN），以及其他专用神经网络方法，可以直接应用于资源受限的雾设备，以执行机器学习任务。这些研究推动了诸如 CANTO[31],等框架的发展，这些框架可用于在雾节点上训练神经网络，以执行边缘分析。然而，在资源和功耗受限的雾节点上执行复杂的机器学习算法仍然是一项重大挑战。文献[113]总结了对 ENVISION 等机器学习赋能硬件的支持情况，这类硬件可应用于雾网络。

3.12 雾计算经济学

雾计算的发展旨在将云服务（存储、计算和网络技术）带到物联网/边缘设备的邻近位置。通过在数据生成的地方处理数据，可以降低网络传输成本和延迟。降低延迟有助于改善用户体验，从而推动收入增长；随着能够支持更多客户/应用，还能间接提高劳动生产率[114]。此外，借助分布式雾计算，服务完全中断的风险得以消除，因为对集中式云的完全依赖已降至最低。

由于雾是近邻的云，因此，云计算经济学 面临的挑战及相关研究在一定程度上可直接应用于雾计算。云经济学侧重于：1. 云服务定价；2. 代理机制，根据用户需求提供对适当云资源/服务的访问；3. 监控以确定是否保障了适当的 SLA（服务级别协议）[115]。然而，文献对雾计算经济学的探讨并不充分，在上述三个方向上皆是如此，因此未来研究仍有广阔空间。相关研究寥寥无几，Kim 等人[116] 对雾计算进行了理论经济学分析，其中市场由作为代理的基础设施和服务提供商（ISP）、雾用户以及边缘资源所有者（ERO）构成。该问题被设计为一个非合作博弈。

此外，雾计算的早期架构强调，利用咖啡馆中闲置的台式电脑以及邻近的手持设备等用户驻地设备来构建雾计算架构[26]十分重要。然而，要鼓励此类第三方参与建设微型数据中心，并使其设备可供边缘使用，就需要适当的激励机制。文献中研究了多种雾计算激励模型。Zeng 等人[117],利用契约理论框架，为异构雾计算提出了一种激励模型。Luo 等人[118]，将激励感知型微型计算集群组建问题建模为合作博弈。同样，Nazih 等人[119]，提出了一种基于斯塔克尔伯格博弈的车载雾网络激励机制。类似领域也提出了激励模型，例如设备到设备（D2D）卸载[120]。然而，这些激励模型大多基于理论，且仅在仿真环境中进行评估。未来还需开发能够适应现实场景的解决方案，因为这是成功部署雾计算应用的一项主要障碍。

将易变的边缘/雾资源与稳定的云资源相结合，可以降低部分云服务的运营成本。这通过多接入边缘计算为管理移动电话基础设施的电信运营商打开了潜在市场。随着智慧城市感知和自动驾驶汽车等新兴应用领域的发展，电信设备供应商很可能与现有云服务提供商结成联盟，以支持边缘分析和实时流数据处理[115]。云服务提供商进入电信领域可能是这一联盟的推论之一，而这可能被视为对电信运营商主营业务的威胁。

3.13 讨论

雾计算及其相关挑战已在文献中得到广泛研究。研究人员探讨了用于构建雾计算部署的参考架构，并开发了相关框架，以支持在雾计算基础设施上进行分布式数据处理、基于机器学习的边缘分析、无服务器数据管道以及流式数据处理。这些框架展示了多个不同应用领域的试点案例研究，例如智慧医疗、智慧城市、互动游戏、智能交通系统等。为了大规模研究雾计算及其相关挑战，研究人员开发了模拟器。模拟器已成功用于研究和评估资源管理策略、调度与部署策略，以及雾/边缘节点移动性。研究人员还提出了多种启发式算法、元启发式算法和基于机器学习的解决方案，用于资源配置和雾节点部署策略，以实现降低延迟、成本和带宽使用量，以及提高能源效率等多个目标，同时还考虑了

雾用户视角（例如应用的截止期限和优先级）也得到了考虑。移动性管理与迁移和切换过程的解决方案一并进行了探讨。尽管研究结果颇具价值，但强烈建议将这些策略应用于真实世界的雾应用中，同时亟需开发相关的雾计算框架，并提供完善的客户支持。

关于雾计算中的服务质量供给挑战，相关研究涉及安全与隐私、可扩展性、可持续性、可用性和可靠性。为解决雾计算的安全问题，研究人员开发了采用密钥交换和同态加密的轻量级密码学安全协议。文献中还提出了多种基于异常、机器学习和统计学的技术，以应对入侵检测问题。基于区块链的解决方案则用于应对隐私、分布式信任管理和可靠性方面的挑战。未来，为支持雾计算中的高移动性设备，建议开发合适的握手协议和身份验证协议。此外，为提高能效，进而提升雾部署中的可用性和可靠性，未来研究应聚焦于能量采集器和电池储能。此外，相关研究还应优化雾节点与边缘节点的位置及其间距。

关于网络技术与通信，研究人员开发了多种长距离和短距离、低功耗、低成本、低吞吐量的无线通信技术。研究还提出了改进有线网络的方案，例如采用 LRPON 来支持雾计算。此外，研究人员还开发了利用 SDN/NFV 在网络交换机和路由器等异构硬件上理想部署雾服务的解决方案。尽管有多种选择，如何为开发或部署特定雾应用选择理想的通信技术与协议，仍是一项重大挑战。

尽管文献中已广泛探讨雾计算挑战，但经过十年的研究，我们仍未看到公有/私有雾网络的大规模部署，而这类网络可用于实现有趣的物联网应用。雾计算经济学尚未得到充分研究，然而它却是雾计算普及面临的最重要挑战。因此，雾计算至今尚未为企业和参与者个人提供明确的商业案例。此外，这类机会式卸载被认为会威胁到邻近基础设施提供商（如移动运营商）的核心业务。更进一步，为了利用邻近雾节点进行机会式卸载，并鼓励个人或第三方参与者，必须建立理想的激励机制；然而，文献中仅提出了理论性的激励模型，而且这些模型也只在仿真环境中得到评估。还需进一步开发适用于现实场景的雾计算经济学解决方案，并在大规模试点案例研究中进行测试。

4 未来研究方向　　下一代物联网/雾计算的研究方向　　G

上一节讨论了雾计算挑战及已研究的解决方案，并针对所考虑的各项挑战探讨了未来研究方向。除此之外，我们认为，建立大规模测试平台和开发动态部署解决方案也是雾计算领域值得进一步研究的方向。此外，该领域的新兴趋势（如联邦学习）以及计算机科学领域整体的发展趋势（如量子计算），都应能在不久的将来推动雾计算在现实应用中的普及。因此，以下未来研究方向应有助于实现下一代物联网（NGIoT）倡议的目标[121],，即降低物联网赋能解决方案的采用与开发门槛。

4.1 面向大规模雾计算测试平台和实验的行动计划

雾计算应用已在不同领域的多个小规模试点案例研究中得到展示。这些小规模实验的主要原因之一是缺乏足够的基础设施。目前还没有合适的大规模测试平台，无论是商业平台还是学术平台，都可用于展示和评估此类原型系统。在移动计算和电信场景中，这类测试平台已得到尝试并被广泛采用，学术机构与工业机构也会合作参与。例如，Midoglu 等人[122], 在欧洲移动宽带网络测量（MONROE）测试平台上研究了移动宽带（MBB）网络的速度。

云计算领域也在尝试类似的努力，例如混合云/私有云 ELIXIR[123]，欧洲的生物信息学与生命科学服务社区正是借助它开展工作。也可以规划类似举措来建立雾计算测试平台。鉴于工业物联网、智慧城市、自动驾驶汽车等生态系统中有多种可行的雾计算应用，应认真探索组建政府、工业界和学术界联盟，以建立大规模测试平台。此类举措还可能进一步推动雾计算研究，例如在雾网络之间实现互操作性、实时迁移和作业交接等；这些目前仍处于理论研究阶段，仅在模拟器上进行了演示。

4.2 符合标准的雾服务动态部署

目前，雾服务部署在资源受限的异构设备上，采用特定于应用的专有解决方案。开发运维是一种方法论，通过使用相关工具集成并自动化软件开发（Dev）和 IT 运维（Ops），从而缩短系统开发生命周期。开发运维广泛用于云服务和应用的开发。OASIS 等标准——云应用拓扑和编排规范（TOSCA）——已开发出来，可用于使用相关模板定义应用的配置。借助这些模板，兼容 TOSCA 的编排器可以在多个云上部署应用。这也使应用在多个云服务提供商之间的迁移相对容易[124]。

雾计算中的自动化部署和开发运维的适用性尚未得到充分探索。可扩展 TOSCA 标准以支持雾计算。容器编排（例如 Docker Swarm、Kubernetes）可用于处理雾设备的平台独立性和互操作性。两种解决方案可以结合使用，从而实现雾设备间的无缝协调与协作。FogDEFT 框架[125]研究了将 TOSCA 应用于雾计算的早期尝试。该框架抽象了所有异构性和复杂性，提供了一种用户友好的范式，可从远程系统按需、即时地建模和动态部署雾服务。还需要进一步研究，才能推动这种方法达到标准化水平。

4.3 联邦学习即服务

联邦学习（FL）是一种新兴的机器学习技术，它仅使用本地数据样本，在资源受限的边缘/雾设备上进行训练。本地训练得到的机器学习模型参数会被收集并汇总至集中式协调器，随后将整合后的模型部署到雾节点，以进行下一轮训练，直至收敛。联邦学习已应用于广泛的物联网和雾计算案例研究，例如智慧医疗、智慧城市、自动驾驶汽车等[126,127]。联邦学习还通过差分隐私（DP）和安全多方计算（SMC）等解决方案，应对多项雾计算挑战，如安全与隐私[128]。该领域的最新进展包括迁移学习（在多个参与方共享的数据集上进行训练，这些参与方可以是雾节点）、分散式联邦学习（在各组内汇总子全局模型，并在第二阶段实现收敛，从而可在分层雾计算架构的多个层之间实现协作学习）等。近年来，联邦学习得到了广泛探索。

联邦学习（FL）会给资源受限的边缘/雾设备带来额外负载。因此，该领域的未来研究应着重开发轻量级机器学习模型，并在考虑本地模型准确率、能源需求、计算资源可用性等约束的基础上优化这些联邦学习算法[129]。此外，研究能否将联邦学习作为一项服务由雾节点提供，也很有意义。这是否能带来新的经济模式，从而推动雾计算的进一步普及？还需从上述各个维度进一步探索联邦学习。

4.4 量子云计算及其对边缘/雾的影响

另一项迅速兴起的技术是量子计算，它利用量子力学定律解决经典计算机难以处理的复杂问题[130]。如果功能强大的量子计算机在不久的将来得以广泛应用，它们或将推动量子云计算的发展。这些进展将带来诸如容错安全量子计算、用于云计算中密码验证和访问控制的量子技术等解决方案[131]。届时，量子云计算的客户端需要通过量子链路与云通信，以传输任务及相关的量子比特。这一方向的初步尝试已经展开[132]。

既然雾计算被视为邻近的云，量子云计算会对边缘/雾计算产生什么影响吗？未来的研究应立即开始探索它将带来的机遇。例如，将区块链服务与量子互联网相结合，可以提高通信速度，并为边缘云连续体上执行的边缘分析和联邦学习任务提供所需的安全保障。

5 结论

雾计算由思科于十年前提出，它利用邻近的计算资源处理传感器数据，作为物联网应用的一部分。自提出以来，雾计算便受到了研究领域双方的广泛关注。

学术界和工业界，以及致力于解决雾计算架构实现与应用过程中不同挑战和方面问题的研究人员。然而，经过十年的研究，我们仍未看到大规模部署的公有/私有雾网络，而这些网络可用于实现有趣的物联网应用。在现有文献中，我们只能看到试点案例研究和小规模试验平台，以及利用模拟器来展示所提出模型的规模，以应对相应的技术挑战。这背后有多种原因。

本文首先探讨了雾计算在不同领域的案例研究，论证了雾计算的相关性。随后，我们将雾计算挑战归纳为不同类别，例如雾计算框架、模拟器、资源管理、部署策略、服务质量相关方面、雾计算经济学等，并结合最先进的研究成果和未来研究方向进行了总结。接着，我们进行了深入讨论，强调有必要开发更多适用于现实世界的雾计算经济学解决方案，并在大规模试点案例研究中对其进行测试。最后，我们从该领域及计算机科学整体的新兴趋势出发，概述了雾计算的未来研究方向，这些方向有望推动雾网络的最终部署以及基于雾计算的应用的普及。

致谢

本研究得到了印度 SERB 通过资助项目 CRG/2021/003888 的支持。我们还感谢印度 MHRD 通过 F11/9/2019-U3(A) 项目为 UoH-IoE 提供的资金支持。

参考文献

1. Taylor P. 2019年和2025年全球物联网联网设备的数据量。https://www.statista.com/statistics/1017863/worldwide-iot-connected-devices-data-size/；2022年。网址访问日期：2023年3月13日。

2. Gubbi J、Buyya R、Marusic S、Palaniswami M。物联网（IoT）：愿景、架构要素与未来方向。《未来一代计算机系统》2013；29(7)：1645–1660。3. Chang C、Srirama SN、Buyya R。《雾计算与边缘计算：原理与范式》第 Internet of Things（IoT）与新型计算范式章：1–23；Wiley。2019年。4. Bonomi F、Milito R、Zhu J、Addepalli S。雾计算及其在物联网中的作用。载于：ACM。；2012年：13–16。5. Market Research Future。雾计算市场规模预计到2030年将增长至3.4348亿美元，复合年增长率为55.6%——Market Research Future（MRFR）报告。
https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/07/05/2473916/0/en/
F
o
g-
Computing-Market-Size-Projected-to-Expand-at-USD-343-48-Million-by-2030-with-a-CAGR-of-55-6-Report-by-Market-Re
html；2022年。访问 URL 日期：2023年3月13日。6. Fortune Business Insights。云计算市场以 17.9% 的复合年增长率增长，到2028年将达到 791.48 十亿美元2028 | 科技巨头的强大实力将推动北美市场增长。
https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/03/29/2411941/0/en/
Cloud-Computing-Market-Exhibiting-a-CAGR-of-17-9-to-Reach-USD-791-48-Billion-by-2028-Strong-Presence-of-Tech-Bigwig
html；2022。网址访问日期：2023年3月13日。7. Srirama SN、Jarke M、Prinz W。移动 Web 服务配置。载于：IEEE。；2006年：120–120。8. Satyanarayanan M、Bahl P、Caceres R、Davies N。移动计算中采用基于虚拟机的云端小站的理由。*IEEE Pervasive Computing*2009年；8(4)：14–23。9. Flores H、Hui P、Tarkoma S、Li Y、Srirama S、Buyya R。移动代码卸载：从概念到实践及更进一步。*IEEE*《通信杂志》2015年；53(3)：80–88。10. Taleb T、Samdanis K、Mada B、Flinck H、Dutta S、Sabella D。关于多接入边缘计算：新兴的5G网络边缘云架构与编排综述。*IEEE*《通信调查与教程》2017年；19(3)：1657–1681。

11. Yousefpour A、Fung C、Nguyen T 等。关于雾计算及相关边缘计算范式的一切须知：全面综述。*Journal of Systems Architecture*2019年；98：289–330。12. Zao JK、Gan TT、You CK 等。基于多层分布式计算和关联数据技术的普适脑监测与数据共享。*Frontiers in Human Neuroscience*2014年；8：370。13. Ha K、Chen Z、Hu W、Richter W、Pillai P、Satyanarayanan M。迈向可穿戴认知辅助。载于：ACM。；2014年：68–81。14. Kraemer FA、Braten AE、Tamkittikhun N、Palma D。医疗保健中的雾计算——综述与讨论。*IEEE Access*2017年；5：9206–9222。15. Rahimi M、Songhorabadi M、Kashani MH。基于雾计算的智能家居：系统综述。*Journal of Network andComputer Applications* 2020年；153：102531。16. Perera C、Qin Y、Estrella JC、Reiff-Marganiec S、Vasilakos AV。面向可持续智慧城市的雾计算：综述。《*ACM*计算综述》2017年；50(3)：1–43。17. Keshari N、Singh D、Maurya AK。车载雾计算综述：当前技术水平与未来方向。*VehicularCommunications* 2022年；38：100512。18. Basir R、Qaisar S、Ali M 等。雾计算赋能工业物联网：最新进展与研究挑战。*Sensors* 2019年；19(21)：4807。19. Aazam M、Zeadally S、Harras KA。在工业物联网和工业4.0中部署雾计算。*IEEETransactions on IndustrialInformatics* 2018年；14(10)：4674–4682。20. Satyanarayanan M、Simoens P、Xiao Y 等。物联网中的边缘分析。*IEEE Pervasive Computing*2015年；14(2)：24–31。21. 思科。Cisco IOx。
https://www.cisco.com/c/en/us/products/cloud-systems-management/iox/index.html；。网址访问日期：2023年3月13日。22. Apache软件基金会。Apache Edgent。
https://incubator.apache.org/projects/edgent.html；。网址访问日期：2023年3月13日。23. 雾计算采用OpenFog参考架构的IEEE标准。*IEEE*标准*1934-2018*2018年：1-176。doi：10.1109/IEEESTD.2018.8423800 24. Rahmani AM、Gia TN、Negash B 等。在医疗保健物联网边缘利用智能电子健康网关：一种雾计算方法。《未来一代计算机系统》2018年；78：641–658。25. Chen N、Chen Y、Ye X、Ling H、Song S、Huang CT。雾计算中的智慧城市监控。*5G*时代的移动云计算与大数据进展2017年：203–226。26. Chang C、Srirama SN、Buyya R。Indie Fog：一种高效的物联网雾计算基础设施。*Computer*2017年；50(9)：92–98。27. Tuli S、Mahmud R、Tuli S、Buyya R。FogBus：用于边缘计算和雾计算的基于区块链的轻量级框架。*JournalofSystems andSoftware*2019年；154：22–36。28. Morabito R、Farris I、Iera A、Taleb T。评估网络边缘集群设备容器化物联网服务的性能。《*IEEE*物联网杂志》2017年；4(4)：1019–1030。29. Srirama SN、Dick FMS、Adhikari M。基于Akka框架和Actor模型执行分布式雾计算应用。《未来一代计算机系统》2021年；117：439–452。30. Hewitt C、Bishop P、Steiger R。第8场：人工智能形式体系——一种通用模块化人工智能Actor形式体系。载于：第3卷。斯坦福研究院，门洛帕克（加利福尼亚州）。；1973：235。

31. Srirama SN, Vemuri D. CANTO：基于Actor模型、支持物联网应用神经网络训练的分布式雾计算框架。《计算机通信》2023; 199: 1–9. 32. Golec M, Ozturac R, Pooranian Z, Gill SS, Buyya R. IFaaSBus：一种基于安全与隐私的轻量级框架，利用物联网和机器学习实现无服务器计算。*IEEE Transactions on Industrial Informatics* 2021; 18(5): 3522– 3529. 33. Poojara SR, Dehury CK, Jakovits P, Srirama SN. 雾计算和云计算中面向物联网数据的无服务器数据管道方法。《未来一代计算机系统》2022; 130: 91–105. 34. Gupta H, Vahid Dastjerdi A, Ghosh S K, Buyya R. iFogSim：用于对物联网、边缘与雾计算环境中的资源管理技术进行建模和仿真的工具包。《软件：实践与经验》2017; 47(9): 1275–1296. 35. Mahmud R, Pallewatta S, Goudarzi M, Buyya R. iFogSim2：扩展版iFogSim模拟器，支持边缘和雾计算环境中的移动性、聚类与微服务管理。*Journal of Systems andSoftware* 2022; 190: 111351. 36. Sonmez C, Ozgovde A, Ersoy C. Edgecloudsim：用于评估边缘计算系统性能的环境。《新兴电信技术汇刊》2018; 29(11): e3493. 37. Puliafito C, Gonçalves DM, Lopes MM, 等. MobFogSim：雾计算中的移动性与迁移仿真。《仿真建模实践与理论》2020; 101: 102062. 38. Dumas M, La Rosa M, Mendling J, A Reijers H. 业务流程管理基础。Springer。2013。39. Qayyum T, Malik AW, Khattak MAK, Khalid O, Khan SU. FogNetSim++：用于对分布式雾计算环境进行建模和仿真的工具包。*IEEEAccess* 2018; 6: 63570–63583. 40. Mass J, Srirama SN, Chang C. STEP-ONE：基于机会网络环境模拟器的边缘雾计算流程仿真测试平台。*JournalofSystems andSoftware*2020; 166: 110587. 41. Gill M, Singh D. 雾计算仿真框架与研究方向的全面研究。《计算机科学评论》2021; 40: 100391. 42. Ghobaei-Arani M, Souri A, Rahmanian AA. 雾计算中的资源管理方法：全面综述。《网格计算杂志》2020; 18(1): 1–42. 43. Hong CH, Varghese B. 雾/边缘计算中的资源管理：架构、基础设施与算法综述。《*ACM*计算综述》2019; 52(5): 1–37. 44. Bukhari A, Hussain FK, Hussain OK. 雾节点发现与选择：系统性文献综述。《未来一代计算机系统》2022. 45. Goudarzi M, Palaniswami M, Buyya R. 边缘与雾计算环境中的物联网应用调度：分类体系与未来方向。*ACMComputingSurveys*2022; 55(7): 1–41. 46. Salaht F A, Desprez F, Lebre A. 雾计算与边缘计算中的服务部署问题概述。《*ACM*计算综述》2020; 53(3): 1–35. 47. Brogi A, Forti S, Guerrero C, Lera I. 如何在雾中部署应用：研究现状与开放挑战。《软件：实践与经验》2020; 50(5): 719–740. 48. Mahmud R, Srirama SN, Ramamohanarao K, Buyya R. 面向体验质量（QoE）的雾计算环境应用部署。《并行与分布式计算杂志》2019; 132: 190–203. 49. Adhikari M, Mukherjee M, Srirama SN. DPTO：利用多级反馈队列的雾计算框架中的截止期限与优先级感知任务卸载。《*IEEE*物联网杂志》2019; 7(7): 5773–5782. 50. Bahreini T, Badri H, Grosu D. 移动边缘计算系统中的资源分配与定价机制。《*IEEE*并行与分布式系统汇刊》2021; 33(3): 667–682.

51. Mahmud R, Srirama SN, Ramamohanarao K, Buyya R. 面向集成雾–云计算环境的利润感知应用部署。《并行与分布式计算杂志》2020; 135: 177–190. 52. Ma Z, Zhang S, Chen Z, 等. 面向收入驱动的边缘计算多用户在线任务卸载。《*IEEE*并行与分布式系统汇刊》2021; 33(5): 1185–1198. 53. Peng G, Wu H, Wu H, Wolter K. 协同边缘与云计算中面向物联网计算卸载的约束多目标优化。《*IEEE*物联网杂志》2021; 8(17): 13723–13736. 54. Goudarzi M, Palaniswami MS, Buyya R. 一种用于边缘与雾计算环境应用部署的分布式深度强化学习技术。《*IEEE*移动计算汇刊》2021. 55. Farhadi V, Mehmeti F, He T, 等. 边缘云中数据密集型应用的服务部署与请求调度。《*IEEE/ACM*网络汇刊》2021; 29(2): 779–792. 56. Guerrero C, Lera I, Juiz C. 雾架构中服务部署优化所用进化算法的评估与效率比较。《未来一代计算机系统》2019; 97: 131–144. 57. Fang J, Li K, Hu J, Xu X, Teng Z, Xiang W. Sap：一种基于模拟退火算法的边缘云计算物联网应用模块部署策略。《传感器杂志》2021; 2021: 1–12. 58. Adhikari M, Srirama SN, Amgoth T. 通过群体优化实现分层雾环境中的应用卸载策略。《*IEEE*物联网杂志》2019; 7(5): 4317–4328. 59. Adhikari M, Srirama SN, Amgoth T. 仿自然算法及其在边缘计算中应用的全面综述：挑战与未来方向。《软件：实践与经验》2022; 52(4): 1004–1034. 60. Tao O, Chen X, Zhou Z, Li L, Tan X. 通过上下文多臂老虎机学习实现自适应的用户管理型移动边缘计算服务部署。《*IEEE*移动计算汇刊》2021. 61. Tuli S, Ilager S, Ramamohanarao K, Buyya R. 使用A3C学习和残差循环神经网络对随机边缘云计算环境进行动态调度。《*IEEE*移动计算汇刊》2020; 21(3): 940–954. 62. Hazra A, Adhikari M, Amgoth T, Srirama SN. 面向6G的雾网络中物联网应用服务部署的斯塔克尔伯格博弈。《*IEEE*物联网杂志》2020; 8(7): 5185–5193. 63. Ni J, Zhang K, Lin X, Shen X. 保障物联网应用的雾计算安全：挑战与解决方案。*IEEE*《通信调查与教程》2017; 20(1): 601–628. 64. Hu P, Ning H, Qiu T, Song H, Wang Y, Yao X. 一种在物联网中利用雾计算的人脸识别与解析框架安全与隐私保护方案。《*IEEE*物联网杂志》2017; 4(5): 1143–1155. 65. Lin X, Li X. 在车载自组织网络中实现高效的协作消息认证。*IEEE*车辆技术汇刊2013; 62(7): 3339–3348. 66. ISO/IEC 29192-2:2019。信息安全—轻量级密码学—第2部分：分组密码。https://www.iso.org/ standard/78477.html;。网址访问日期：2023年3月13日。67. Yoshida H, Watanabe D, Mouha N. 轻量级密码学相关技术与标准化现状——ISO/IEC JTC1/SC27/WG2状态报告。*IEICE*技术报告；*IEICE Tech. Rep.*2014; 114(340): 25–30. 68. Alotaibi A, Barnawi A, Buhari M, 等. 雾计算中支持高效撤销的基于属性的安全数据共享。《信息安全杂志》2017; 8(03): 203. 69. Lu R, Heung K, Lashkari AH, Ghorbani AA. 一种面向雾计算增强型物联网的轻量级隐私保护数据聚合方案。*IEEE Access*2017; 5: 3302–3312. 70. Yi L, Yin M, Darbandi M. 雾环境入侵检测系统的深入系统性综述。《新兴电信技术汇刊》2023; 34(1): e4632。

71. Su Z, Biennier F, Lv Z, Peng Y, Song H, Miao J. 面向云/雾计算端到端可信性的架构与协议级基础。*IEEE*大数据汇刊2017年; 8(1): 35–47. 72. Alzoubi YI, Al-Ahmad A, Kahtan H. 区块链技术作为雾计算安全与隐私解决方案：综述。《计算机通信》 2022年; 182: 129–152. 73. Peng M, Yan S, Zhang K, Wang C. 基于雾计算的无线电接入网络：问题与挑战。*IEEE*网络2016年; 30(4): 46–53. 74. Zhang W, Lin B, Yin Q, Zhao T. 基于MicroDC和LRPON集成的雾网络基础设施部署与优化。点对点网络与应用2017年; 10: 579–591. 75. Donta PK, Srirama SN, Amgoth T, Annavarapu CSR. 物联网应用层协议近期进展及机器学习研究方向范围综述。数字通信与网络2022年; 8(5): 727–744. 76. Baktir AC, Ozgovde A, Ersoy C. 边缘计算如何受益于软件定义网络：综述、用例与未来方向。*IEEE*《通信调查与教程》2017年; 19(4): 2359–2391. 77. Kreutz D, Ramos FM, Verissimo PE, Rothenberg CE, Azodolmolky S, Uhlig S. 软件定义网络：全面综述。*IEEE*学报 2014年; 103(1): 14–76. 78. Tomovic S, Yoshigoe K, Maljevic I, Radusinovic I. 面向物联网的软件定义雾网络架构。无线个人通信 2017年; 92: 181–196. 79. Huang L, Li G, Wu J, Li L, Li J, Morello R. 面向先进无线传感器网络的雾计算软件定义服务质量供给。在：IEEE。；2016年：1–3. 80. Xu Y, Mahendran V, Radhakrishnan S. 面向基于SDN的雾计算：用于实现高效可靠交付的MQTT代理虚拟化。在：IEEE。；2016年：1–6. 81. Mijumbi R, Serrat J, Gorricho JL, Bouten N, De Turck F, Boutaba R. 网络功能虚拟化：技术现状与研究挑战。*IEEE*《通信调查与教程》2015年; 18(1): 236–262. 82. Vilalta R, López V, Giorgetti A, et al. TelcoFog：面向5G网络的统一灵活雾与云计算架构。*IEEE*《通信杂志》 2017年; 55(8): 36–43. 83. Laroui M, Nour B, Moungla H, Cherif MA, Afifi H, Guizani M. 物联网的边缘与雾计算：当前研究活动与未来方向综述。《计算机通信》2021年; 180: 210–231. 84. Hakiri A, Sellami B, Patil P, Berthou P, Gokhale A. 使用软件定义网络管理无线雾网络。在：IEEE。；2017年：1149–1156. 85. Mukherjee M, Shu L, Wang D. 雾计算综述：基础、网络应用与研究挑战。*IEEE*《通信调查与教程》 2018年; 20(3): 1826–1857. 86. Zaman SKu, Jehangiri AI, Maqsood T, et al. 移动边缘网络中移动性感知的计算卸载：综述。集群计算 2021年: 1–22. 87. Waqas M, Niu Y, Ahmed M, Li Y, Jin D, Han Z. 动态环境中的移动性感知雾计算：理解与实现。*IEEE Access* 2018年; 7: 38867–38879. 88. Pereira J, Ricardo L, Luís M, Senna C, Sargento S. 评估雾计算在VANETs智能移动应用中的可靠性。《未来一代计算机系统》2019年; 94: 317–332. 89. Zhang H, Qiu Y, Chu X, Long K, Leung VC. 雾无线电接入网络：移动性管理、干扰缓解与资源优化。*IEEE*无线通信 2017年; 24(6): 120–127. 90. Ghosh S, Mukherjee A, Ghosh SK, Buyya R. Mobi-iost：面向移动性的云 - 雾 - 边缘 - 物联网协作框架，用于时间关键型应用。*IEEE*网络科学与工程汇刊2019年; 7(4): 2271–2285.

91. Rejiba Z, Masip-Bruin X, Marín-Tordera E. 关于雾计算、边缘计算及相关计算范式中移动性诱导的服务迁移的综述。《*ACM*计算综述》2019年；52(5)：1–33。92. Zhang W, Zhang Z, Chao HC. 用于处理车联网大数据的协作式雾计算：架构与分层资源管理。*IEEE*《通信杂志》2017年；55(12)：60–67。93. Yao J, Ansari N. 可靠性感知物联网中的雾计算资源配置。《*IEEE*物联网杂志》2019年；6(5)：8262–8269。94. Hou X, Ren Z, Wang J, Zheng S, Cheng W, Zhang H. 用于保障无人机群延迟与可靠性的分布式雾计算。*IEEEAccess* 2020年；8：7117–7130。95. Desikan KES, Kotagi VJ, Murthy CSR. 在支持雾计算的物联网网络中配置资源时，解析延迟、可靠性、成本与能耗之间的相互作用。《*IEEE*物联网杂志》2022年；10(3)：2404–2416。96. Duc TL, Leiva RG, Casari P, Östberg PO. 边缘云计算中可靠资源配置的机器学习方法：综述。《*ACM*计算综述》2019年；52(5)：1–39。97. Qiu T, Chen N, Li K, Atiquzzaman M, Zhao W. 异构物联网如何构建我们的未来：综述。*IEEE*《通信调查与教程》2018年；20(3)：2011–2027。98. Cirani S, Ferrari G, Iotti N, Picone M. 物联网集线器：用于无缝管理异构互联智能对象的雾节点。载于：IEEE。；2015年：1–6。99. Hong K, Lillethun D, Ramachandran U, Ottenwälder B, Koldehofe B. Mobile fog：一种面向物联网大规模应用的编程模型。载于：ACM。；2013年：15–20。100. Yangui S, Ravindran P, Bibani O, 等. 一种面向混合云雾环境的平台即服务。载于：IEEE。；2016年：1–7。101. Kaur K, Dhand T, Kumar N, Zeadally S. 边缘侧的容器即服务：雾纳米数据中心中能效与服务可用性之间的权衡。*IEEE*无线通信2017年；24(3)：48–56。102. Kattepur A, Rath HK, Simha A. 雾联网机器人中计算时间的先验估计。载于：IEEE。；2017年：9–16。103. Materwala H, Ismail L, Shubair RM, Buyya R. 用于车载网络中边缘云集成计算卸载的能耗与服务级别协议感知遗传算法。《未来一代计算机系统》2022年；135：205–222。104. Jayanetti A, Halgamuge S, Buyya R. 面向边缘云计算环境中优先级约束任务的能耗与时间优化调度的深度强化学习。《未来一代计算机系统》2022年；137：14–30。105. Zhang Y, Niyato D, Wang P, Kim DI. 移动能源网关的最优能量管理策略。*IEEE*车辆技术汇刊2015年；65(5)：3685–3699。106. Plebani P, Salnitri M, Vitali M. 雾计算与数据即服务：一种支持有效数据迁移的基于目标的建模方法。载于：Springer。；2018年：203–219。107. Badidi E, Mahrez Z, Sabir E. 面向智慧城市大数据管理与分析的雾计算：综述。未来互联网2020年；12(11)：190。108. Assunção MD, Calheiros RN, Bianchi S, Netto MA, Buyya R. 大数据计算与云：趋势与未来方向。《并行与分布式计算杂志》2015年；79：3–15。109. Yang S. 雾环境中的物联网流处理与分析。*IEEE*《通信杂志》2017年；55(8)：21–27。110. Drolia U, Guo K, Narasimhan P. Precog：面向边缘图像识别应用的预取技术。载于：ACM/IEEE。；2017年：1–13。

111. Abdulkareem KH, Mohammed MA, Gunasekaran SS 等。雾计算与机器学习综述：概念、应用、挑战与开放问题。*IEEE Access*2019年；7：153123–153140。 112. Mahdavinejad MS, Rezvan M, Barekatain M, Adibi P, Barnaghi P, Sheth AP。用于物联网数据分析的机器学习：综述。*Digital Communications and Networks*2018年；4(3)：161–175。 113. Zou Z, Jin Y, Nevalainen P, Huan Y, Heikkonen J, Westerlund T。边缘与雾计算赋能的物联网人工智能——概述。载于：IEEE。；2019：51–56。 114. Weinman J。混合多云雾计算的经济学。*IEEE Cloud Computing*2017年；4(1)：16–21。 115. Buyya R, Srirama SN, Casale G 等。面向未来一代云计算的宣言：未来十年的研究方向。《*ACM*计算综述》 2018年；51(5)：1–38。 116. Kim D, Lee H, Song H, Choi N, Yi Y。雾计算的经济学：基础设施和服务提供商、用户与边缘资源所有者之间的相互作用。《*IEEE*移动计算汇刊》2019年；19(11)：2609–2622。 117. Zeng M, Li Y, Zhang K, Waqas M, Jin D。异构雾计算中的计算卸载激励机制设计：基于合约的方法。载于：IEEE。；2018：1–6。 118. Luo S, Chen X, Zhou Z, Chen X, Wu W。面向激励的协作雾计算微型计算集群形成。*IEEETransactionsonWirelessCommunications* 2020年；19(4)：2643–2657。 119. Nazih O, Benamar N, Addaim A。车载雾计算环境中的计算资源分配激励机制。载于：IEEE。；2020：1–5。 120. Pu L, Chen X, Xu J, Fu X。D2D雾化：通过网络辅助的D2D协作实现的高能效、面向激励的任务卸载框架。*IEEE Journal on Selected Areas in Communications*2016年；34(12)：3887–3901。 121. EU-IoT。下一代物联网。https://www.ngiot.eu/about/；。URL访问日期为2023年5月10日。 122. Midoglu C, Kousias K, Alay Ö 等。移动宽带网络中的大规模“speedtest”实验。*ComputerNetworks* 2021年；184：107629。 123. Crosswell LC, Thornton JM。ELIXIR：面向欧洲生物数据的分布式基础设施。*Trends Biotechnol* 2012年；30(5)：241–2。 124. Dehury CK, Jakovits P, Srirama SN, Giotis G, Garg G。TOSCAdata：在TOSCA中对数据管道应用进行建模。*JournalofSystems andSoftware*2022年；186：111164。 125. Srirama SN, Basak S。借助FogDEFT框架开箱即用的雾计算：案例研究。载于：IEEE。；2022年：342–350。 126. Pandya S, Srivastava G, Jhaveri R 等。面向智慧城市的联邦学习：全面综述。*SustainableEnergyTechnologiesand Assessments* 2023；55：102987。 127. Banabilah S, Aloqaily M, Alsayed E, Malik N, Jararweh Y。联邦学习综述：基础、赋能技术与未来应用。*Information Processing & Management* 2022年；59(6)：103061。doi：https://doi.org/10.1016/j.ipm.2022.103061 128. Issa W, Moustafa N, Turnbull B, Sohrabi N, Tari Z。基于区块链的联邦学习，用于保障物联网安全：全面综述。*ACMComputingSurveys*2023；55(9)：1–43。 129. Xiao H, Zhao J, Pei Q, Feng J, Liu L, Shi W。车载边缘计算中联邦学习的车辆选择与资源优化。*IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*2021年；23(8)：11073–11087。 130. Gyongyosi L, Imre S。量子计算技术综述。《计算机科学评论》 2019年；31：51-71。doi：https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2018.11.002 131. Gill SS, Kumar A, Singh H 等。量子计算：分类体系、系统综述与未来研究方向。《软件：实践与经验》2022年；52(1)：66–114。 132. Yang Z, Zolanvari M, Jain R。量子计算与通信中的重要问题综述。*IEEE*《通信调查与教程》2023；25(2)：1059-1094。doi：10.1109/COMST.2023.3254481

如何引用本文： S. N. Srirama（2023），雾计算研究十年：相关性、挑战与未来方向，《软件杂志：实践与经验》，*2023;00:1–20*。