

# 物联网

## ——从云计算到雾计算

朱清波 著



科学出版社

# 物联网——从云计算到雾计算

朱清波 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书力图从架构思想的角度去阐述从“物联网+云计算”到“物联网+雾计算”的变迁,通过新的技术趋势和经验,使得读者更加容易阅读、理解和应用。全书较为全面地介绍了云计算和雾计算相关的基本概念,并对云计算与雾计算的核心技术进行了比较全面的介绍与对比。同时首次提出了“物联网+雾计算”从硬件到软件的架构体系,还对雾计算所依靠的理论与实现软件部分,如容器、Zookeeper 和微服务等进行了简要介绍。本书通过典型系统的设计过程,使读者能够比较全面地掌握下一代物联网的设计方法。

本书可以作为高等院校计算机、系统工程、测控和机电等专业本科生和研究生的学习参考书,也可作为相关领域技术人员的参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

物联网:从云计算到雾计算/朱清波著. —北京:科学出版社,2019.9  
ISBN 978-7-03-060109-4

I. ①物… II. ①朱… III. ①互联网络-应用 ②智能技术-应用  
IV. ①TP393.4 ②TP48

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 208164 号

责任编辑:王 哲/ 责任校对:王萌萌  
责任印制:师艳茹 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

天津文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2019 年 9 月第一次印刷 印张:11 1/2

字数:226 000

定价:86.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 作者简介

朱清波，湖北工业大学机械工程学院教师。2009年毕业于湖北工业大学，获工学硕士学位。2008~2009年在新加坡管理大学信息系统学院从事信息系统研究工作，2019年在美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校新加坡高级数字科学中心和国立新加坡大学做访问学者。目前主要从事物联网与信息化等相关技术研究，共主持和参与政府纵向、企业横向课题23项，发表论文15篇，其中SCI/EI收录6篇，获得4项软件著作权登记、3项发明专利、2项实用新型专利，出版学术著作1部。

# 前 言

物联网(Internet of Things, IoT)是 20 世纪 90 年代末兴起的一个概念。它主要解决物品与物品(Thing to Thing, T2T)、人与物品(Human to Thing, H2T)、人与人(Human to Human, H2H)之间的互连。但是,物联网所创造的价值并不真正来源于它所运用的数据,而是源自对这些数据的解读。解读后的信息可以令我们获悉其内涵的科学价值,提高设备的效率、可靠性和利用率,并为我们的生活带来便利。

从供应链管理到自动化制造,甚至再到车辆停泊管理和废弃物处理,物联网正通过多种形式实现着它的价值。它使得企业在制造、农业和能源等领域以同样的投入获得更大的产出或是用更少的投入获得同样的产出,提升人类的健康与安全系数,为人类生活带来更佳体验,如灾难预警、老人赡养、交通疏导、环境监测和辅助执法等。但若想真正通过物联网来节约时间、节省成本,我们必须了解它所利用的数据从何而来。一般来讲,这些数据都会来自集中而可伸展的云计算平台。这些云计算平台都是为物联网中的设备、物联网独有的连通性,以及物联网对于数据管理的需要而特殊设计的。以自动驾驶系统(Autonomous Driving System, ADS)为例,无线网络将配备有激光探测与测量系统(Light Detection And Ranging, LiDAR)、图像处理系统及其他自动驾驶设备的车辆与其他载具、行人、智能基础设施和各类云端服务彼此联系在一起,共同实现车内娱乐、预见性维护和远程诊断等一系列服务。如果只是想要在车内通过登录云账号观看视频或者查看车辆运行记录和维修历史,云计算是能满足全部需要的。但对于帮助车辆决定如何避开高速公路碰撞这种时间敏感性的任务,云计算可能就不是最佳选择了。云计算会带来延迟,正所谓远水救不了近火。因此,对时间要求较高的任务最好还是在网络边缘的平台进行处理。

现阶段的云服务,在 IaaS 层面已经非常成熟了。人们可以方便地从云端获取一台机器,基本达到了“按需获取、按量计费、弹性扩展”的目标以及像使用水电一般使用计算资源的标准。然而在 PaaS 层面,状态却一直不理想。人们只能在云端直接获得数据库实例这类产品级的 PaaS 服务,而对于一个试图将 IT 系统整体迁移到云端的组织来说,其日常的开发、测试、部署和运维等活动,并没有得到显著的改善。也就是说,云计算在 PaaS 层面,并没有提供给用户按需获取服务以及像使用水

电般使用服务的能力。同时传统的虚拟化技术旨在提供完整的操作系统，对资源的分配并未提供最优的解决方案。利用率并不充分，远远未能达到云计算需要充分利用资源对外提供服务的要求。在这样的局面下，**Docker** 出现了。它以位于操作系统之上的轻量级虚拟化方案以及类似于版本管理的映像管理模式很好地解决了上面提到的问题，从而使云服务的提供者有能力提供真正达到云计算标准的 **PaaS** 服务。从这一层面来讲 **Docker** 的出现，无疑对现阶段云计算的服务能力从 **IaaS** 向 **PaaS** 层级的提升有着巨大的推动作用。

假如我们认同云计算是未来数字社会 IT 运营的主体模式，那么现在我们来讨论一下到底什么才是云计算的本质？现阶段，人们已经普遍接受“云计算就是一种在对集中资源虚拟化基础上，对外提供分散服务的 IT 运营模式”。目前的公有云服务商、企业私有云建设，大概都是采纳了这个思路。人们大致认为，云计算更多的是一种商业模式，而不是一种技术。如果是这样的话，云计算之所以能够具备“减少成本、让企业甩掉基础设施运维包袱、将精力集中在其业务上”这些优势，仔细想来，其本质思路无非还是人类从自给自足小农社会进入工业社会所采取的那一套专事专干。也就是说，将过去每个家庭都存在的、具有共同性质的事情，集中起来由专业化的工厂完成。以前是每家都要种地，每家用磨面机磨面，现在是农场集中播种，工厂集中磨面。同样，在云计算模式中，以前是各个企业或部门都拥有自己的 IT 基础设施，现在是云服务商或者企业统一提供 IT 基础设施。我们想要问的是，难道这就是被我们称做“会颠覆未来数字社会运营模式”的云计算精神之所在吗？其伟大的创新又在哪里呢？若不是模式创新，在技术上又有什么呢？分布式？虚拟化？似乎也不是什么伟大的创新！如果我们认同一个有颠覆性的伟大事物之本质必须在思想、模式与技术上都有不凡创新的话，那么这个伟大的新事物之本质究竟是什么？作者更加认同关于将云计算解释为“使用 IT 就如使用水电一般”的说法。而目前采用虚拟化将集中资源分割使用的普遍做法，只不过是实现这一目标的手段之一而已，两者之间并不对等。未来，当人们使用 IT 基础设施时，就像打开水龙头、打开开关一样方便。按需获取、按量计费，这才是云计算的本质精神所在。从这个角度来讲，目前业界云计算的状态，无论是从业务上还是从技术上，都还属于“神尤未具”的状态。在业务模式上就是集中资源通过网络提供分散服务，从技术上讲就是虚拟化与 X86 集群，这些就是现阶段云计算所拥有的全部，还并没有触及云计算目标的核心要素。云计算本质的实现关键是什么？还是要从互联网模式对人类生活，以及各行各业运营方式的变革性影响的角度来考虑。从基础设施和平台的角度来看（即通常说的 **IaaS** 与 **PaaS**，也是目前云计算能提供的最常见服务），既然在未来，网络互联已经越来越不是性能瓶颈了，那么 **IDC** (**Internet Data Center**) 部署是否“集中”似乎没有什么道理是必需的。最本质的需求应该是全世界的 IT 资源，无论

其部署在哪里，都有机会为某个单体的请求服务。而从 SaaS 的角度来看，现有软件的多租户改造并不是未来的关键所在。在未来移动互联网的数字化社会，现阶段所看到的企业与个人软件(例如，CRM、ERP 以及各种工具等)，无论是产品精神，还是从功能设计、使用模式上，都会有较大的改变。而随时随地的移动互联网与数据驱动，可能会是云计算软件服务设计的关键所在。另外，业界对云计算的普遍认知，从“集中部署、分散服务”逐步向“移动互联网、数据驱动”转变，或许是一个新的突破点。

本书力图从架构思想的角度去阐述“物联网+云计算”到“物联网+雾计算”的变迁，通过新的技术趋势和经验，使得读者更加容易阅读、理解和应用。通过阅读本书，在未来物联网技术设计方面，读者将学到有效的非技术知识，得到关于风险与利益平衡的实用指导，通过设置优先级，把计划付诸行动，从而以低成本获得大的可扩展性。

在本书出版之际，特别感谢同事赵大兴和宋庭新，他们为我提供了大量的帮助和支持。同时，也非常感谢王哲编辑审读我的初稿并帮助我如期完稿，他在本书的文字编辑与修改方面为我提供了很多帮助。本书得到了多个研究项目基金的资助，在此表示感谢。也感谢湖北工业大学对本书出版的大力支持。

最后，写作是一项艰巨的任务，如果没有家人一如既往的支持，我是不可能完成本书的。在此，我要向温柔体贴的妻子吴祯祯、乖巧的女儿朱品娱在生活上、事业上对我的关心、支持和理解表示深深的谢意。

由于时间仓促本书难免存在一些不足，另外，雾计算是一门较新的学科，各种概念、定义和体系架构未必能得到统一的认识，殷切希望广大读者批评指正。

作 者

2019 年 5 月

# 目 录

前言	
第 1 章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 云计算与雾计算的对比	3
1.3 雾计算与物联网应用	9
第 2 章 云计算	10
2.1 引言	10
2.2 云计算的概念	11
2.3 云计算发展现状	13
2.4 云计算实现机制	15
2.5 网格计算与云计算	17
2.6 云计算原理	20
2.6.1 集中云	21
2.6.2 分散云	22
2.7 云的架构	26
2.7.1 SaaS	27
2.7.2 PaaS	31
2.7.3 IaaS	33
2.8 云的模式	34
2.9 云计算和物联网的融合	35
2.10 Google 云计算原理	37
2.10.1 GFS	37
2.10.2 MapReduce	42
2.10.3 Chubby	44
2.10.4 Bigtable	52
第 3 章 云计算的核心技术	62
3.1 系统虚拟化	62

3.1.1	虚拟化的发展历史	62
3.1.2	虚拟化的优势	65
3.1.3	虚拟化技术的发展趋势	66
3.2	服务器虚拟化	67
3.3	存储虚拟化	72
3.4	网络虚拟化	74
3.5	应用虚拟化	76
3.6	虚拟化技术的比较	79
<b>第 4 章</b>	<b>雾计算</b>	<b>80</b>
4.1	雾计算架构的支柱	80
4.1.1	安全性	81
4.1.2	可扩展性	81
4.1.3	开放性	83
4.1.4	自治性	83
4.1.5	可编程性	84
4.1.6	可靠可用及可服务性	85
4.1.7	敏捷性	85
4.1.8	层次性	86
4.2	雾计算架构描述	87
4.2.1	性能	88
4.2.2	安全性	88
4.2.3	可管理性	90
4.2.4	数据分析和控制	91
4.2.5	应用程序	91
4.3	雾计算硬件	91
4.4	雾计算软件	93
4.4.1	节点管理和软件架构	93
4.4.2	应用支持层	94
4.4.3	应用服务层	96
<b>第 5 章</b>	<b>雾计算架构分析</b>	<b>98</b>
5.1	节点分析	98
5.2	网络分析	99
5.2.1	有线连接	99

---

5.2.2	无线连接	100
5.3	加速器分析	101
5.4	计算能力分析	105
5.5	存储分析	105
5.6	节点管理	106
5.7	节点安全	106
5.7.1	物理安全和防篡改机制	106
5.7.2	可信计算	107
第 6 章	雾计算的核心技术	114
6.1	容器	114
6.1.1	Docker 概述	114
6.1.2	Docker 的优势	115
6.1.3	容器的基本概念	116
6.2	Kubernetes	118
6.2.1	Kubernetes 概述	119
6.2.2	Kubernetes 角色组成	120
6.2.3	Kubernetes 组件组成	122
6.2.4	Kubernetes 安装与部署	124
6.3	Swarm	130
6.3.1	Swarm 概述	130
6.3.2	Swarm 特点	130
6.3.3	Swarm 框架结构	131
6.3.4	Swarm 各个模块介绍	131
6.3.5	创建 Swarm 集群	133
6.4	Zookeeper	139
6.4.1	Zookeeper 概述	140
6.4.2	Zookeeper 的功能	141
6.4.3	Zookeeper 的基本概念	144
6.4.4	Zookeeper 的工作原理	145
6.5	微服务	150
6.5.1	设计微服务：大小、范围和功能	151
6.5.2	微服务中的消息传递	152
6.5.3	集成微服务	154

---

6.5.4	分散式数据管理	156
6.5.5	微服务的分散管理	157
6.5.6	服务注册和服务发现	158
6.5.7	微服务的部署	159
6.5.8	微服务的安全	160
<b>第 7 章</b>	<b>物联网+雾计算典型应用</b>	<b>162</b>
7.1	智慧城市	162
7.1.1	智能电网	162
7.1.2	智能信号灯	163
7.1.3	智能路灯	163
7.1.4	智能停车	164
7.1.5	远程医疗	164
7.1.6	智慧农场	164
7.1.7	服务业	165
7.2	智慧工业	165
7.2.1	工业物联网	165
7.2.2	管道检测	166
7.2.3	无线传感器和执行器网络	166
7.3	车联网	166
7.4	未来展望	167
	参考文献	169

# 第 1 章 概 述

## 1.1 引 言

十年来，云计算备受瞩目。它的出现不仅提供了新的计算模型架构，而且给服务的部署带来了方便。但云计算并不是终点，未来仍将有新的计算模型架构推动新的服务生成，进一步方便人们的生活。本书将探讨云、雾和物共同组成的物联网生态系统，着重讨论雾计算和云相互配合形成的计算模型架构。

如今，已经有数十亿的物联网硬件设备连接到互联网。随着近年来电子和通信技术的快速发展，具有非常强大网络功能的通信设备不断涌现，吸引了不同行业纷纷采用这项技术，并融入日常业务中来增加效率。除行业部门的需求外，还有生活辅助服务和公共服务等其他部门，对信息和通信技术的发展有很大的需求。因此，需要一个在 M2M (Machine To Machine, M2M) 通信中的新范例，使得“物”连接到互联网中，这个范例被称为物联网 (IoT)。

物联网是抽象化的网络物理对象或者是将电子技术、嵌入式软件、传感器和连通能力嵌入进“物”，以使其能够通过先进的通信协议与制造商、操作者或者其他连接的设备交换数据而实现价值与服务，而在此过程中无须人工操作。

通过将数十亿甚至数百亿台设备连接到互联网，我们意识到有很多应用程序正在被行业、政府和公众等使用。例如，智能交通系统 (Intelligent Transport System, ITS) 通过无线传感器或视频监控在城市交通中的应用，在全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 的帮助下将信息发送到用户的移动设备上，以避免交通堵塞或者预防交通事故。这只是基于物联网技术在智慧城市中的一个应用案例，更多的应用案例还包括智能家居和电子健康应用程序等。这些应用案例都是由成百上千相互连接的设备所生成的大量数据通过互联网传输到云计算平台上，并由云平台提供云计算服务。

将物联网与云计算结合并集成在一起会带来巨大的优势。用户在访问云供应商时，这种集成优势体现得更为明显，云供应商只需通过 Web 界面即可提供相应的服务，这种服务具有很好的灵活性与伸缩性。

云计算是一种方便的计算模型架构和可按需配置的计算资源共享池(例如,网络、服务器、存储、应用和服务)。作为一种新的计算技术,它可以快速灵活地、并以最小的工作量,实现存储基础设施和计算服务的租赁。为用户提供了诸如租用业务流程或者整体应用的选择,简化了用户的计算工作。

云计算位于互联网内,是具有多种速度、技术、拓扑结构和类型的大型异构网络。由于互联网的非均匀和宽松控制的性质,其存在许多问题,特别是与服务质量相关的问题仍未解决。一个影响服务质量的严重问题是网络延迟。与用户直接交互的实时应用程序受到网络不稳定引起的延迟或抖动,严重影响应用程序的实时性和可靠性。

云计算面临的另一个主要问题是安全性和隐私性。由于云计算已经与互联网融合在一起,云服务的定位、用户请求、数据传输和系统响应需要根据用户和系统之间的网络距离通过大量的中间网络,这无形中提高了用户数据暴露的风险。当用户数据在公共云中存储时,必定存在损害其完整性和保密性的风险。即使数据被加密,互联网中的数据传输通过的网络节点越多,数据暴露的风险也越大。类似的,云系统的可用性也可以使用各种方法来攻击。因此可以看出,云系统目前面临各种安全威胁,这是由它们在互联网中实现的本质以及位置独立性导致的。

云计算模型在本质上具有保存和管理私有数据中心的高效方法,它使企业和用户免受许多细节的规范,但这可能对支撑大量节点的延迟敏感性应用程序产生影响,无法满足其延迟要求。新型的物联网需要支持移动性、广泛的地理分布以及位置感知和低延迟等功能来改善现有物联网平台。因此业界提出一个新的平台,通过扩展云平台为最终用户提供一套新的 Web 应用程序和服务。这个新平台被称为雾计算,也被称为雾。

雾计算的概念在 2011 年由 Cisco 最早提出,相对较新。时至今日,雾计算已经成为研究的热点和重点,并被业界寄予厚望。然而,仍能看到对雾计算的一些质疑,无外乎两种:一种观点认为其就是本地化的服务器;另一种更加激进,认为其纯粹是一种概念的炒作。雾计算远远不止本地化的服务器那么简单,它是对数以万计的“本地服务器”整体性的考量。它是一个平台而不是单独一台机器。

雾计算作为最前沿的研究方向,学术圈和工业界都开展着与其相关的科研项目 and 战略方向,包括:ARM、Cisco、Dell、Intel、Microsoft、普林斯顿大学共同投资创办的雾计算研究项目 OpenFog;法国电信与法国国家信息及自动化研究所共同主导的雾计算与大规模分布式云研究项目 Discovery;华为的“全面云化”战略;Intel 的“Cloud Computing at the Edge”项目。

雾计算由 Cisco 引入作为新模型,定义为将云计算和服务扩展到网络边缘的

范例。与云计算类似，雾计算为最终用户提供数据、计算、存储和应用服务。雾计算的特征是计算地理位置接近终端用户、密集的地理分布、灵活的移动性支持和服务托管在网络边缘或甚至终端设备中，如机顶盒或网络接入点。通过这种方式，雾计算降低了服务延迟并提高了网络质量，从而产生卓越的用户体验。雾计算支持需要实时或可预测延迟(工业自动化、运输、传感器和执行器网络)的新兴全能互联网(Internet of Everything, IoE)应用。由于其广泛的地理分布，雾计算的最佳范例是用于实时大数据的处理与分析。雾计算支持密集分布的数据收集点，将大数据延伸至三个维度，即可实时性和可解释性、数据准确性。

雾计算模型为供应商在广告、计算、娱乐和其他应用程序提供了便捷和优势，适合数据分析和分布式数据收集点。终端服务，如机顶盒和接入点可以使用雾化轻松托管，提高了服务质量(Quality of Service, QoS)并减少延迟。

雾计算的优点如下。

(1)雾计算通过显著降低数据网络的通信进而减少拥塞、降低成本和数据延迟，消耗较少的带宽。

(2)消除核心计算环境，从而减少主要计算块和计算节点的故障。

(3)消除由集中式计算系统引起的瓶颈，改进加密数据的安全性。本地虚拟化服务使得加密数据保持与更新，更加接近终端用户，减少不利因素的暴露；数据在向网络边缘移动时进行编码提高了安全性。

(4)雾计算除了向终端用户提供次秒级响应外，还提供高水平的可扩展性、可靠性和容错性。

## 1.2 云计算与雾计算的对比

智慧城市、智能家庭等物联网应用在未来将极大地方便人们的生活。然而目前市场上智能终端设备的智能程度普遍不能令人满意。那么这个“智能”应来自哪里，如何才能保障设备的智能呢？

计算机智能的基础在于其背后的资源，如CPU、内存、硬盘和网络带宽等计算资源。更确切的说法是将CPU、内存归类于计算资源、硬盘归于存储资源、带宽归于通信资源以及各类传感器提供的资源等。为了简化，统一将它们称为资源。在这些资源中最核心的就是计算资源。“智能”便是通过计算提取数据中的知识并做出决策；通过存储来保存知识库，从而根据历史经验保证决策准确并做出预测；通过通信完成设备间的沟通，实现知识与决策的分发。这样才能为用户提供智能的服务与体验。

那么现在设备之所以不够智能，并不是因为单个设备的资源不足，本书认为有以下几点原因。

(1) 终端的不足。我们无法想象把基站安装在每部手机上，让手机提供基站服务。同样的，我们无法想象每台设备都拥有大量资源，这将大幅度提高成本，无法形成有效的解决方案。当资源不足时，一个最直观的想法是将计算任务交给其他计算能力强的设备。物联网中有大量的终端设备，它们无法在本地完成计算做出决策，那么应该由谁来解决终端设备的资源不足呢？

(2) 云的不足。云计算平台为云用户提供数据中心的资源。服务提供商把特定服务部署在云中，终端设备发送信息给服务，服务完成计算后将结果发回给终端，并将必要数据存储在云端。通过这种形式，云充分满足了终端设备的资源需求，也成为物联网生态系统中不可缺少的一环。为了服务不同地理位置的用户，在互联网的多层次结构中，数据中心位于核心网络。核心网络距离终端用户较远，用户消息需要经过若干跳才能够到达。图 1.1 是简化的互联网网络拓扑图。

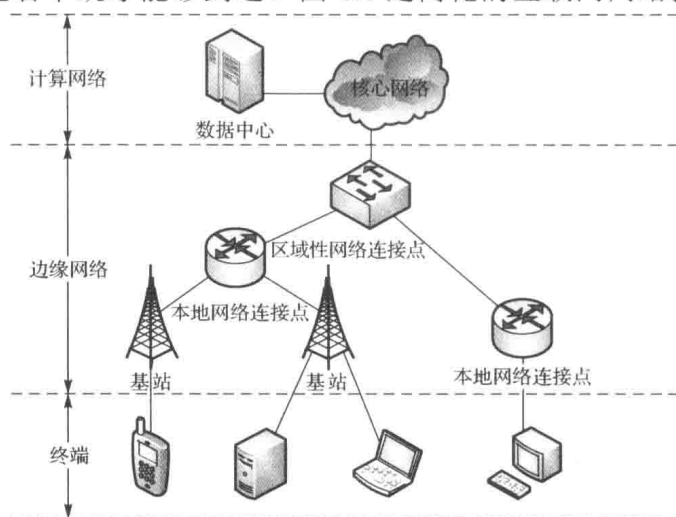


图 1.1 互联网网络拓扑图

数据中心提供了高度集中的大量资源，然而仍有一些不足。

(1) 高延迟：离用户较远的距离导致了较高的网络延迟。对实时性要求高的应用难以部署在云中。

(2) 网络拥塞：根据 Cisco 公司预测，到 2020 年全球将有 500 亿智能设备进入互联网中。相较而言，网络带宽的增长速度远远滞后。如果大量的物联网应用部署在云中，将会有数量庞大的传感器原始数据不断涌入核心网络，带来核心网络拥塞。

(3) 较低可靠性：与安全、生命相关的物联网应用，一旦遇到应用失效、数据

中心失效或从终端用户到云平台的任何一段网络失效，都将带来重大的安全隐患。从终端到云端的通信链路越长，失效的风险也越大，而在云中部署服务备份的成本也较高。

(4) 廉价资源：用户需使用的特定廉价资源池有时却并不那么廉价，特别是用户无法估算所需的计算量时，计算的成本将无法得到有效控制。

可见，对实时性、大数据量和可靠性要求高的应用，云计算并不适合。人们需要新的计算模型来满足未来的应用需求，弥补云计算的不足。雾计算正是在这种背景下被提出的。雾计算是个很形象的名称，“雾是接近地面的云”这句话有两层含义。

(1) 雾计算和云计算有很多相似。例如，它们都基于虚拟化技术，从共享的资源池中为多用户提供资源。

(2) 接近地面。这也指出了雾计算和云计算在不同位置计算。具体来说，是它们在网络拓扑中的位置不同。

图 1.2 是 Cisco 对雾计算的原始定义。在 Cisco 的定义中，雾计算主要使用边缘网络中的设备。这些设备可以是早已部署在网络中的路由器、交换机和网关等传统网络设备，也可以是专门部署的本地服务器。一般来说，专门部署的设备会有更多资源，而使用有宽裕资源的传统网络设备则可以大幅度降低成本。这两种设备的资源能力都远小于一个数据中心，但是它们庞大的数量可以弥补单一设备资源的不足。雾平台由数量庞大的雾节点构成，即雾使用的硬件设备，以及设备内的管理系统。这些雾节点可以各自散布在不同地理位置，与资源集中的数据中心形成鲜明对比。根据以上内容，可以总结出雾计算与云计算的不同。

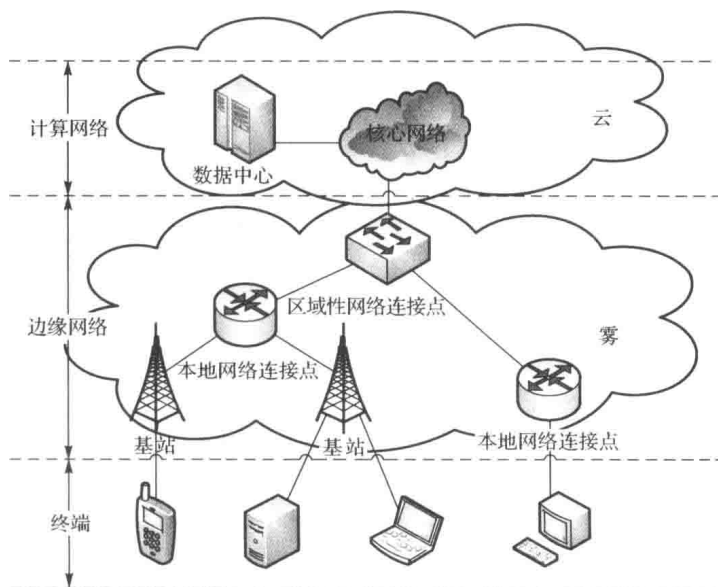


图 1.2 雾计算的定义

(1)更低：雾节点在网络拓扑中位置更低，拥有更小的网络延迟，系统反应性更强。

(2)更多：云平台的构成单位数据中心数量并不多，而雾节点的数量庞大。

(3)更广：雾节点拥有广泛的地域分布。

(4)更轻：雾节点更轻量，计算资源有限。

除了上面提到的低延迟，雾计算还有以下优点。

(1)节省核心网络带宽：雾计算作为云计算和终端的中间层，本就在用户与数据中心的通信链路上。雾计算可以过滤或聚合用户消息，例如，在处理不停发送的传感器消息时，雾计算节点只将必要的消息发送给云，减小核心网络压力。

(2)高可靠性：为了服务不同区域的用户，相同的服务会被部署在各个区域的雾节点上。这也使得高可靠性成为雾计算的内在属性，一旦某一区域的服务异常，用户请求可以快速转向其他相邻区域。

(3)了解背景信息：因为分布在不同区域，雾计算中的服务可以了解到区域背景信息。例如，本区域带宽是否紧张，根据这一背景信息，一个视频服务可以及时决策是否降低本地区视频质量，避免即将到来的卡顿。而对一个地图应用而言，则可将本地区地图缓存，提高用户体验。

(4)减少耗电：数据中心的电力消耗已经成为重要成本，其中冷却系统占有不可忽视的比重。雾计算节点因为地理位置分散，不会集中产生大量热量，并不需要额外的冷却系统，从而减少耗电。

基于以上优点，雾计算能够弥补云计算的不足，并和云计算相互配合协同工作。因此，云计算向“全面意义”上的转换会有一个“云+雾”的过渡。雾计算自提出以来就是作为云计算的延伸扩展，而不是云计算的替代。在物联网生态中，雾计算可以过滤、聚合用户消息、匿名处理用户数据保证隐秘性、初步处理数据并做出实时决策和提供临时存储以提升用户体验。相对的，云计算可以负责大运算量或长期存储任务，如历史数据保存、数据挖掘、状态预测和整体性决策等，从而弥补单一雾节点在计算资源上的不足。这样，云计算和雾计算共同形成一个彼此受益的计算模型，这一新的计算模型能更好地适应未来物联网应用场景。

以目前的城市道路监控系统为例，从监控探头到本地中心机房的通信层数一般为3~4层甚至更高，如果系统需要做出实时决策，则会面临网络延迟的挑战。

图 1.3 所示是一个智能交通灯系统，除了监控探头作为传感器，还有交通灯作为执行器。雾计算的引入将为这一系统带来更多的功能拓展的可能性。例如，在监控视频数据处理的过程中，相比上一帧画面，通常只有一部分画面变化，而