

边缘计算使能智慧电网

张聪¹, 樊小毅², 刘晓腾², 庞海天³, 孙立峰³, 刘江川²

1. 中国科学技术大学计算机科学与技术学院, 安徽 合肥 230027;

2. 深圳江行联加智能科技有限公司, 广东 深圳 518000;

3. 清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084

摘要

随着物联网技术、高速通信技术、智能芯片技术的发展, 协同利用这些技术提高传统电网在设备数据收集、储能策略分析和用电安全监控等方面的效能成为亟待解决的难题。对边缘计算技术如何助力电力企业智能化转型进行了着重分析, 讨论了边缘计算在构建低时延、轻量级、高效能和高可靠的智慧电网平台方面的优势, 介绍了智慧电网中的各类应用场景和对应的边缘计算解决方案。最后, 对国内外两种边缘计算平台及其使用的主要技术和应用场景进行了分析。

关键词

边缘计算; 电网智能化; 容器和虚拟化

中图分类号: TP393.4

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-0271.2019014

Edge computing enabled smart grid

ZHANG Cong¹, FAN Xiaoyi², LIU Xiaoteng², PANG Haitian³, SUN Lifeng³, LIU Jiangchuan²

1. School of Computer Science and Technology, University of Science and Technology, Hefei 230027, China

2. Jiangxing Intelligence Inc., Shenzhen 518000, China

3. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract

How to mitigate such pressure has become a critical challenge for global grid enterprises. Empowered by the development of IoT techniques, high-speed communications, and AI-chips, traditional grid enterprises are trying to adopt these new techniques to solve the challenge, especially in heterogeneous data collection, energy scheduling, and AI-enabled monitoring. Firstly, the background of smart grid and the history of edge computing were introduced. Then, edge computing enabled solutions were illustrated in three typical grid scenarios. Finally, two edge computing platforms at home and abroad were introduced. The main technologies and application scenarios of them were also analyzed.

Key words

edge computing, smart grid, container and virtualization

1 引言

改革开放以来,我国生产力的快速发展极大地增加了各行业对电力消耗的需求。从1978年底至2017年底,全国220千伏及以上输电线路长度从2.3万千米增加到68.8万千米;同时,变电容量从2 528万千伏安扩大到40亿千伏安。国际能源署《世界能源展望2018》报告显示,至2040年,我国的能源需求将增加26%。届时,人们对电气化技术的青睐也会使其全面渗入居民住宅和工业领域中,如电动汽车的普及,从而导致全球电力需求将增加90%。面对全球范围内电力需求的持续增长,如何有效地提高电网管理和控制的智能化水平,将成为关系到全球工业化发展和人民生活水平的巨大挑战。

随着物联网技术、人工智能技术和高速通信技术的逐步发展,与智慧电网相关的各种解决方案层出不穷,但仍存在许多亟待解决的痛点。首先,尽管物联网技术的逐步发展与应用使得大规模数字传感器可以被广泛地部署到电网设备中,实现该场景下电网数据的采集,但目前电网中设备种类较多,不同区域间的设备相对独立,如何快速接入不同区域和类型的电网设备,实现异构数据的大规模实时采集仍是需要解决的问题。其次,以深度学习网络为代表的人工智能技术可以大幅度提升海量数据的处理和分析能力,是实现智慧电网核心功能的“大脑”^[1]。但是,该技术需要大量的计算资源,而普通电网设备不具备此类资源。虽然利用云计算提供的弹性计算资源可以驱动“大脑”的运转,但其服务时延仍然较高,且无法处理敏感数据,因此不能很好地实现海量数据的实时分析和隐私保护。最后,高速通信技术的实施部署(如5G通信)能够保障电力场景中传感器数据的传输,提供稳

定的网络连接,并将最终的判断和决策及时进行反馈。但该技术只能提供高速稳定的网络连接方式,在物联网技术和人工智能技术都存在痛点的情况下,其作用有限。此外,地形和区域限制导致部分电网设备位置偏僻,部署的传感器可能不在高速通信基站的覆盖范围内,电力运营商无法持续收集此类数据。

最近,在国家电网有限公司2019年提出的《泛在电力物联网建设大纲》中,发展趋于成熟的边缘计算技术成为信息通信技术(information communications technology, ICT)与操作技术(operation technology, OT)的桥梁。泛在物联是指任何时间、任何地点、任何人、任何物之间的信息连接和交互。泛在电力物联网就是围绕电力系统各环节,充分应用移动互联、人工智能等现代信息技术和先进通信技术,实现电力系统各环节万物互联、人机交互,具有状态全面感知、信息高效处理、应用便捷灵活特征的智慧服务系统。泛在电力物联网是泛在物联网在电力行业的具体表现形式和应用落地。根据美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)的标准,智慧电网是一个将多种数字计算方式、通信技术和服务集成到电力系统基础设施中的电网系统。智慧电网作为构建泛在电力物联网的重要一环,可以利用边缘计算技术实现。在智慧电网的实施过程中,边缘计算利用容器技术可以实现不同设备中异构数据的实时采集,可以提供弹性计算资源承载深度学习模型。边缘的计算资源配置可以满足小区域数据离线处理和分析,从而保障各类数据的安全传输和处理。此外,边缘计算借助高速通信技术可以降低网络时延,提高网络传输带宽的利用率,实现高效稳定的数据传输。

本文首先介绍边缘计算的发展历程和技术特点,然后聚焦智慧电网中的几类业

务特点,分析典型应用场景,并分别介绍边缘计算技术在各场景中的解决方案和相关技术,最后介绍国内外两种边缘计算平台及其相关技术和应用场景。最近几年,随着硬件性能的不断提升,各类设备计算和存储能力不断提高,边缘计算技术获得较大发展,并受到学术界和工业界的广泛关注。

2 发展背景及进展

微软亚洲研究院于2008年提出了边缘计算的概念,但相关技术受限于设备和网络性能,与实际应用场景结合后不能提供较好的用户体验。2013年,诺基亚西门子通信技术有限公司和IBM公司联合推出了可以在移动基站中运行的计算平台,首次使用移动边缘计算描述边缘服务。2014年,欧洲电信标准协会(European Telecommunications Standards Institute, ETSI)成立了工业规范组,开始推动边缘计算的标准化,提出生态系统和价值链。2016年,ETSI提出多接入边缘计算,将边缘计算从电信蜂窝网络进一步延伸至其他无线接入网络(如Wi-Fi)^[2],华为技术有限公司、英特尔公司、ARM公司等联合成立边缘计算产业联盟(Edge Computing Consortium, ECC)。2017年,ECC推出边缘计算参考架构2.0,包含业务动态调度、云端部署协调等解决方案。2018年,谷歌公司推出两款大规模开发和部署智能联网设备的产品:云端芯片Edge TPU和软件Cloud IoT Edge,促进了基于人工智能的解决方案的部署。

近年来,随着物联网在行业领域的逐步深入,终端设备数量急剧增加。据思科公司互联网业务解决方案部称,2010年连接互联网的终端设备多达125亿台,预计到2020年将达到500亿台。终端设备的运行使网络

末端产生了大量数据,如何从海量数据获得有效信息,变得极富挑战性。传统的解决方案是将与数据分析相关的计算任务转移到云计算平台上执行。现代云计算平台于2006年由亚马逊公司提出,该类平台依赖虚拟化技术,可以有效地整合各类系统资源,降低任务管理和运行的成本,并为用户提供弹性且高效的计算服务。然而,庞大的用户侧数据运算如果完全依赖于云计算平台,会占用大量的网络带宽,导致云计算性能出现瓶颈。此外,越来越多的场景需要高速响应的计算服务,而云计算平台与物理设备的松耦合使得云计算存在时延和抖动,因此,那些需要将端到端时延控制在几十毫秒内的应用程序直接从云计算平台获得的收益有限,如无人驾驶和虚拟现实(virtual reality, VR)^[3]。2018年,5G通信时代正式开启,通过5G技术提供的高速移动网络,边缘计算技术可以满足此类低时延需求应用^[4-5]。边缘计算使用分布式计算范式,将数据、应用程序下放到边缘设备节点,计算主要或完全在分布式的边缘设备节点上执行,而不是在云中进行^[6]。随着越来越多的第三方应用以容器化而不是虚拟机的方式部署,边缘计算也逐步向容器化发展,即实现了已有服务的无障碍迁移,也满足了复杂需求下的敏捷开发。

3 相关技术

边缘计算的产生依托于现有的通信、存储、计算等技术。先进的网络和通信技术,如工业自动化无线网络(wireless network for industrial automation - factory automation, WIA-FA)技术^[7]和5G通信技术,推动了边缘计算的发展,轻量化的人工智能算法使得边缘计算具备神经网络运算能力。同时,边缘计算使用的容器技术和任务调度技术保证了边缘任务的有序、安全和

高效。本节重点介绍与边缘计算相关的技术。

3.1 计算技术

与云计算相比,边缘计算更靠近数据源头,能够节省数据传输时间,同时也对降低时延有了更高的要求。然而,边缘设备受到资源的约束较大,在处理资源密集型任务时,需要将任务分配到资源充足的云环境中。边缘计算技术主要包括计算卸载和时延控制。计算卸载技术能够将计算任务卸载到边缘计算服务器或边缘云服务器中,有效优化资源分配,并降低时延和能量消耗^[8]。现有的研究工作多将计算卸载描述为多用户计算卸载博弈问题,使用分布式计算卸载决策进行任务卸载^[9]。

3.2 存储技术

边缘计算在数据存储和数据处理方面具有较高的实时性要求,这就需要能够高效地存储和访问不间断的数据。高速预缓存技术能够有效地提升边缘计算的低时延性能。边缘节点能够预测用户的流量需求,并在分布式节点中预先缓存可能需要的内容,这种方式大大减少了从远程数据中心下载信息的时延。Tran T X等人^[2]提出了协作的边缘缓存方式,在进行边缘缓存的同时进行边缘处理,从而提高缓存的性能,节约网络成本。

3.3 网络技术

边缘计算设备之间、设备与云之间使用有线或无线连接,目前常用的通信技术包括3G、4G、WLAN、ZigBee等。同时许多先进的网络技术也在不断发展,为边缘计算提供了高性能的传输环境。下面介绍几种先进

的网络技术及其在边缘计算系统中发挥的作用。

- 内容分发网络 (content delivery network, CDN) 是基于互联网的高速缓存网络。CDN将代理服务器部署在网络的边缘,综合考虑节点的连接状态、负载等信息,将相关内容发送给接近的代理服务器,从而降低下载时延,提高响应速度。CDN和边缘计算同样接近用户,但CDN主要用于网络大文件分发,边缘计算则聚焦在行业和细分的业务上。因此,CDN将会逐渐将传统的集中式数据中心转化成部署在网络边缘侧的微型数据中心,通过接入边缘计算实现更低的时延,并提供更稳定的服务。

- 软件定义网络 (software defined networking, SDN) 是一种网络虚拟化方法,通过将控制平面与数据平面分离,实现对网络流量的灵活控制。SDN与边缘计算结合能够帮助系统进行网络资源管理,缓解网络冲突和分组丢失等问题,从而优化资源利用率,减少系统时延^[10]。

- 网络功能虚拟化 (network function virtualization, NFV) 利用虚拟化技术将网络功能与底层物理基础设施解耦^[11]。虚拟化技术使应用程序可以根据实际需求自动部署和灵活扩展,可与高效的迁移技术结合,实现低时延和高吞吐量^[12]。

3.4 人工智能

在工业和生活领域,人工智能算法得到了越来越多的应用,例如自动驾驶、监控设备对异常目标的识别和智能音箱的自然语言处理。现今机器学习框架有TensorFlow和Caffe等,但是大部分算法需要较多的计算资源,无法在边缘设备(如树莓派、Jetson)中运行。随着边缘计算的广泛应用,针对边缘设备的算法开始出现,例如2017年谷歌公司发布的TensorFlow Lite可以用于移动

设备和嵌入式设备,另外开源社区的Caffe高级版本Caffe2提供对移动端的支持。结合人工智能技术,边缘计算将在智能安防、自动驾驶、工业自动化等领域获得广泛的应用。

3.5 容器隔离技术

隔离技术是支撑边缘计算稳健发展的重要研究技术,边缘设备需要通过有效的隔离技术保证服务的可靠性和服务质量。隔离技术需要考虑两方面,一是计算资源的隔离,对应用程序使用的资源总量进行限制,各个应用程序仅能使用分配的内存、中央处理器(central processing unit, CPU)和网络资源。计算资源隔离使得各个应用程序不会因为资源越界而产生干扰,同时便于系统统计应用程序的资源使用情况和进行应用状态控制,如暂停、恢复、中断等。二是数据的隔离,即不同应用程序应具有不同的访问权限。在云计算场景下,某一个应用程序的崩溃可能导致整个系统的不稳定,造成严重的后果,而在边缘计算下,这一情况变得更加复杂。例如,在自动驾驶场景中,进程既要相互通信,又不可对车辆行驶数据产生干扰。此外,对数据进行隔离能够有效地限制其他程序对隐私数据的访问,增强边缘系统的隐私保护能力。

目前在云计算场景下主要使用虚拟机和Docker容器技术等方式保证资源隔离。边缘计算可汲取云计算发展的经验,研究适合边缘计算场景的虚拟机与容器隔离技术。容器化是一种通过将应用程序封装在容器中实现细粒度资源控制和隔离的技术,能够实现轻量化编程,且获得了主要云供应商的本机支持,包括亚马逊公司的Elastic计算云(EC2)容器服务、谷歌公司的Container Engine和微软公司的Azure容器服务。容器化本质上是配置内核用于管理

应用程序使用的资源。容器为云服务供应商提供了一种实现资源复用和控制的轻量级工具,是虚拟化的一种替代方法。然而,容器不允许操作系统堆栈独立于主机操作系统运行,禁止设置多操作系统。因此,容器化不一定能取代虚拟化。相反,这两者是相辅相成的,可以被放置到统一的云和用户框架中。

3.6 动态调度和面向恢复

容器隔离技术使得应用程序具有轻量、灵活、启动速度快的特点,容易实现系统弹性。目前许多数据中心开始将应用与服务封装为Docker,并部署到集群平台(如Kubernetes、Swarm、Mesos、Yarn和Rancher)上。例如,深圳江行联加智能科技有限公司(以下简称江行智能)边缘计算平台使用Kubernetes进行Docker集群管理,对计算资源进行了更高层次的抽象,使容器和资源管理更加细致。平台动态调度表现在以下方面。

- 自动部署:平台可以方便地部署多层容器的完整集群,一次性满足用户的前后端需求。
- 动态资源调整:平台可以随时扩展或者缩小容器规模,最大化资源利用。
- 负载均衡:Kubernetes将容器打标签并组织成组,内嵌的负载均衡器实时监控负载信息,随着系统负荷变化调整容器背后的实例副本数量,实现容器组的负载均衡。
- 版本控制:版本控制使容器可以在不同的开发与产品发布生命周期中确保一致性,方便升级或者回滚容器的版本。
- 扩展性强:平台的扩容能力能够将包含少数节点的集群扩展到拥有上百个节点的大规模集群中,结合硬件和网络资源,平台能够承受大量用户的并发访问。

4 边缘计算特点

边缘计算是对云计算的补充和延伸,可以为物联网中的终端设备提供更便捷、丰富的弹性资源,是连接信息和通信技术与操作技术的重要一环。具体而言,边缘计算具有以下特点。

- **智能化:** 将人工智能技术与边缘设备结合,不仅可以协同利用多个设备中的弹性计算资源实现普通物联网终端的数据智能化分析,还可以将在其他平台(如云计算平台或本地高性能计算中心)不断优化后的智能模型及时更新到边缘设备上,使边缘设备具有持续、安全、可靠的海量数据分析能力,提供更便捷的智能化服务。

- **低时延:** 边缘计算平台采用分布式计算在数据源头处理计算任务,可以有效地缩短响应时间。一方面,平台通过实时跨区域(如云计算平台)调度计算资源,处理各类智能业务应用,如机械臂控制、危险物体识别、人员身份验证等;另一方面,平台可以提供超低时延响应(小于10 ms),支持小区高并发应用服务,使边缘计算广泛应用到自动驾驶、虚拟现实等对网络时延有苛刻要求的场景中^[13]。

- **低能耗:** 充分利用本地现有的网络资源以及边缘设备的空闲存储和计算资源,在边缘节点处对数据进行过滤、计算和分析,依据安全策略动态调整设备到云端的数据流量,减少数据传输量和网络带宽占用,从而降低数据处理成本和设备能耗^[14]。

- **可靠性:** 边缘设备的计算能力使边缘计算系统具有较高的顽健性,即使某个云服务由于网络故障暂时不可用,边缘设备对数据的处理也可以暂时掩盖该故障,保证用户的正常使用^[15]。另外,分布式的架构使得边缘计算系统不会因为单点故障而产生较大影响,合理的任务负载均衡系统和

异常环境下的资源调度机制可以全天候保障用户流畅地使用各类服务。

5 智慧电网边缘解决方案

目前,传统电力企业面对不断涌现的新技术和新方法,亟待对现有电网进行智能化改造、减少人力成本、提高服务质量。传统的云计算解决方案面临诸多问题:首先,电力设备接口繁杂,数据获取难度高,使用云计算解决方案不仅需要电力行业工程师提供支持,还需专业技术人员编写相关接口,这增加了用人成本和开发时间;其次,云计算时延较高,无法对大量电力设备进行实时控制,也不能对数据进行实时获取和分析;最后,电网数据关系国计民生,云计算方案不能较好地制定差异化的安全策略,对不同类型数据进行保护。边缘计算的诸多特性可以较好地解决这些问题,本节分析了3类智慧电网的业务场景,并给出了基于边缘计算的解决方案。

5.1 电路网线和变电场所智能监控

5.1.1 业务场景

高压输电线路设施的运行维护与安全监控是国家电网的重要工作之一。用电设备的增加、用电量的不确定性给电网带来了巨大压力。例如,电动汽车的大量普及将增加电网负荷^[16]。同时,电路网线和变电场所环境复杂,施工机械和塑料等容易对电路设施和导线造成威胁。据国家电网有限公司统计,2016年全年国家电网共发生1 521次跳闸,同比增幅达36.4%;共发生550次故障停运,增幅达177.7%。目前输电线路和设施的检测与安全监控主要依靠工作人员定期上塔巡检、日间瞭望与测量的方式。电网中

设备量大、工作人员平均年龄高,诸多问题导致人工检测的方式缺点颇多,如效率低、周期长、需要停电维护、非实时决策、夜间无法运维等。技术层面上,先进的在线监测、带电检测手段严重不足。以上问题给高压输电线路的运行维护与安全监控带来了巨大挑战。为此,《电力发展“十三五”规划(2016—2020年)》提出:全面提升设备智能化水平;提升重要输电通道环境监测预警智能化水平;推进电网智能化运维工作;积极推动检修工作智能化;实现运检管理和生产指挥智能化。

5.1.2 边缘计算解决方案

针对电网监控存在的问题,目前大部分解决方案是将采集的视频或图片信息上传至服务器进行分析。但视频图像传输量大且有效信息少,会占用和浪费大量网络资源。出于对成本的考虑,此类方案会降低数据回传的频次,因而无法真正做到实时监控与预警。基于边缘计算的解决方案可以实现前后端协同的电网全天候智能监控。该解决方案可借助高清夜视摄像系统实现国家电网高压输电线路的在线监控。前端设备集成人工智能模块,实时拍照并进行检测,将异常结果回传到后端,减少大量无用数据的传输。后端配备计算能力较强的计算单元,使用回传数据进行深度学习,建立模型。系统可以定时更新前端装置的模型,增强异常检测能力。

5.2 储能电池预测性运维

5.2.1 业务场景

尽管物联网这个理念得到了广泛认可,物联网产业也被一致看好,但物联网节点的能源问题一直是物联网发展的一个重要瓶颈。物联网设备在能源方面面临的两大挑战

是电池的电量管理和使用寿命的延长。以近年来不断发展的电动汽车为例,目前电动汽车常用的电池有铅酸电池、锂电池、镍氢电池。这些电池能量密度高,其健康状况与车辆动力系统联系紧密。一旦电池偏离了正常工作状态(即处于亚健康状态或故障状态),就会给汽车带来严重的安全隐患。但是,传统的电池性能评估系统多借助少数参数建立特定数学模型,不能适应复杂的实际工作场景,难以做到及时、准确的判断和预警。因此,物联网设备能源领域需要能适应复杂的实际工作场景,准确预测电池性能的评估系统。即使电池处于正常的工作状态,若能对其运行性能进行客观、全面的评估,也对优化汽车整体性能和延长电池寿命具有十分重要的指导意义。

5.2.2 边缘计算解决方案

边缘计算解决方案使用人工智能和大数据的方法解决动力电池容量和健康估算难题。基于大数据和深度学习模型预测动力电池寿命的方法,边缘应用能够对动力电池的运行和健康状况进行实时监测,并对突发事件进行报警,有效提升了动力电池的安全性能。

解决方案中的评估系统由前端边缘盒子和后端云平台组成。前端边缘盒子通过控制器局域网(controller area network, CAN)总线接口实时获取电池的电特性参数和环境参数,使用电化学模型进行初始推理,并通过深度学习模型对电池综合性能进行实时评估。采集的电特性参数包括充放电电压、电流、电池温度等,环境参数包括环境温度、负载等。云平台作为后端,为本地的前端边缘盒子提供额外的数据存储能力和计算能力支持,以电池大数据的全局信息对各前端的人工智能深度学习模型的评估结果进行交叉验证和渐进优化。基于特

征学习的方法,利用多层次、多种类的神经网络(如卷积神经网络、长短期记忆网络)对电池健康状况进行拟合^[17]。

使用边缘计算技术的电池评估系统部署方便、可扩展性高,对提高电池的使用成熟度、降低电池充放电中的故障和危险发生率、提高安全性、延长使用寿命有深远意义。

5.3 配网智能化

5.3.1 业务场景

配电网位于输电的末端,用于保证电力系统与分散的用户连接。配电网由能量流与信息流融合而成,实现电力数据双向通信,是保证供电质量、降低运行费用、提高电网运行效率的关键环节^[18]。智能配网项目和技术一直是智慧电网发展的重要一环。根据美国能源部现代配电网发展报告,智能配电网具有以下特征:具有自我恢复能力^[19];用户可主动参与配电网的运行^[20];可抵御自然灾害与外部袭击,提供高质量的电能;能够接纳其他发电和蓄电形式;能够优化设备,降低电网运行费用。在业务场景中,智能配电网需要具备以下功能:电力设备状态监测、电力质量管理、新能源电力接入。

- 电力设备状态监测:电网中设备种类繁多,如变压器、断路器、避雷器、接触器等,传统人工定期巡检方式效率低,工作任务重,发现问题不及时。智能配电网需要及时发现异常,避免损失,提高电网的稳定性^[21]。

- 电力质量管理:智能配电网的部署有助于获取信息流进行双向互动。一方面,电力部门可通过收集、统计用户端信息,归纳一个地区的用电规律,以此匹配最佳的发电和配电方案,提高供电可靠性与用电效率;另一方面,用户可以自由选择用电消费时间和用电模式,节约生活开支^[22]。

- 新能源电力接入:以化石燃料为基础的传统发电方式面临着全球变暖、气候变化和碳排放增加的威胁。使用风能、太阳能等可再生资源可有效缓解上述问题^[18,22]。智能配电网的部署有助于分析新能源发电设备的数据,实现新能源发电的监控和预测,进而将新能源电力资源整合到能源分配系统中,平衡能源负荷^[19]。

5.3.2 边缘计算解决方案

随着用电可靠性的增加,一些重点区域需要实现不间断供电,事故响应时间需要控制在毫秒级。目前电网中多使用高级量测系统(advanced metering infrastructure, AMI),电网公司通过智能电表等工具收集用户和电力设备的数据。这些收集工具产生的数据量巨大,即使使用云计算也难以处理、分析和存储,影响配电网的响应速度^[23]。边缘计算通过部署在电网侧的设备收集、计算和存储智能电表数据,能够实时标记和处理数据,将缩减后的数据或结果传输到云计算中心。分布式的边缘计算设备充当了智慧电网和云之间的桥梁,通过减少时延、提高智慧电网的隐私性和局部性等额外功能,部分解决了云计算方式的难点。

使用边缘计算设备构建的智慧电网具有以下功能特点。

- 自愈性:边缘设备检测到异常后,能够迅速对故障区域进行孤岛控制,并运用调节机制消除过负荷、电压波动等问题,待恢复正常后并入电网^[23]。

- 安全性:强大的容错机制与即时的异常预测和处理保证了配网设备的正常工作,排除了大量传统电网系统的安全隐患。

- 高质量:结合收集的区域用电特征,进行针对性的电源输送,防止出现电能不稳定导致的电器损坏情况。

- 交互性:智能配网的边缘设备贴近用

户,增强了用户与配网的交流,用户可以随时查看用电信息,进行用电规划。

- 纳新性: 高效接入风力、太阳能等清洁能源,实现了资源的有效调度,平衡能源负荷。

6 边缘计算平台

6.1 边缘计算平台发展历程

在云计算场景下,不同行业的用户都可将数据传送至云计算中心,然后交由计算机从业人员进行数据的存储、管理和分析。云计算中心将数据进行抽象,并提供访问接口给用户,在这种模式下,计算机从业人员与用户行业解耦,他们更专注数据本身,不需对用户行业领域知识有太多了解。但是在边缘计算的场景下,边缘设备更贴近数据生产者,与垂直行业的关系更为密切,设计与实现边缘计算系统需要大量的领域专业知识。另外,垂直行业迫切需要利用边缘计算技术提高自身的竞争力,但是却面临着计算机专业技术不足的问题。因此计算机从业人员必须与垂直行业紧密合作,才能更好地完成任务,设计出下沉可用的计算系统。

随着边缘计算技术的成熟,各大互联网公司均在探索边缘计算平台的构建。2016年,亚马逊公司推出AWS Greengrass,通过其物联网和无服务器计算产品(Amazon Lambda),将AWS扩展到间歇连接的边缘设备。2018年,AWS Greengrass以机器学习推理支持的形式进行了改版,可在基于NVIDIA Jetson TX2和Intel Atom架构的边缘设备上运行Apache MXNet和TensorFlow Lite模型。微软公司在2017年开发者大会上推出了Azure IoT Edge,Azure IoT Edge支持云任务负载容器化,并可在树莓派、工业网关等智能设备上运行。2018年,谷歌公司

推出云端芯片 Edge TPU和软件Cloud IoT Edge,促进了基于人工智能的解决方案的部署。华为技术有限公司设计了包含边缘计算的昇腾芯片。同年,阿里巴巴公司宣布战略性地布局边缘计算,陆续推出了Link Edge、边缘节点服务(edge node service, ENS)等。

另外,创业公司也显示出蓬勃的发展势头。Rancher公司于2014年开始部署容器调度平台,随着边缘计算的发展,开始研究边缘云上的容器调度框架。2017年,Packet公司开始部署边缘微型数据中心,为客户提供原始计算能力。2018年,硅谷初创公司FogHorn公司与谷歌公司合作,以简化工业物联网边缘应用的部署。江行智能建立了软硬件综合边缘计算管理平台Edge-Box,形成高性能边缘解决方案。

未来边缘计算平台将边缘应用部署到每一个角落,实现边缘计算全覆盖。用户在任何时间、任何地方都能以极低的成本快速地使用边缘计算服务。用户在任何地方都可使用智能手机、电脑和Web浏览器看到物联网设备传递出来的数据。下面以两个边缘计算平台为例,介绍边缘计算平台如何为电力企业和其他行业提供便捷部署边缘计算的能力。

6.2 EdgeBox

6.2.1 平台特点

如图1所示,该平台为边缘解决方案和应用提供稳定的运行管理环境,简化应用开发、部署,可根据业务需要快速部署边缘侧应用。EdgeBox具有以下特点。

- 边缘大数据: EdgeBox使用独创的数据存储结构和压缩方式,采用PB级数据存储架构,可动态扩展容量,并实现高持久性、高扩展性及高可用性。分布式边缘计算

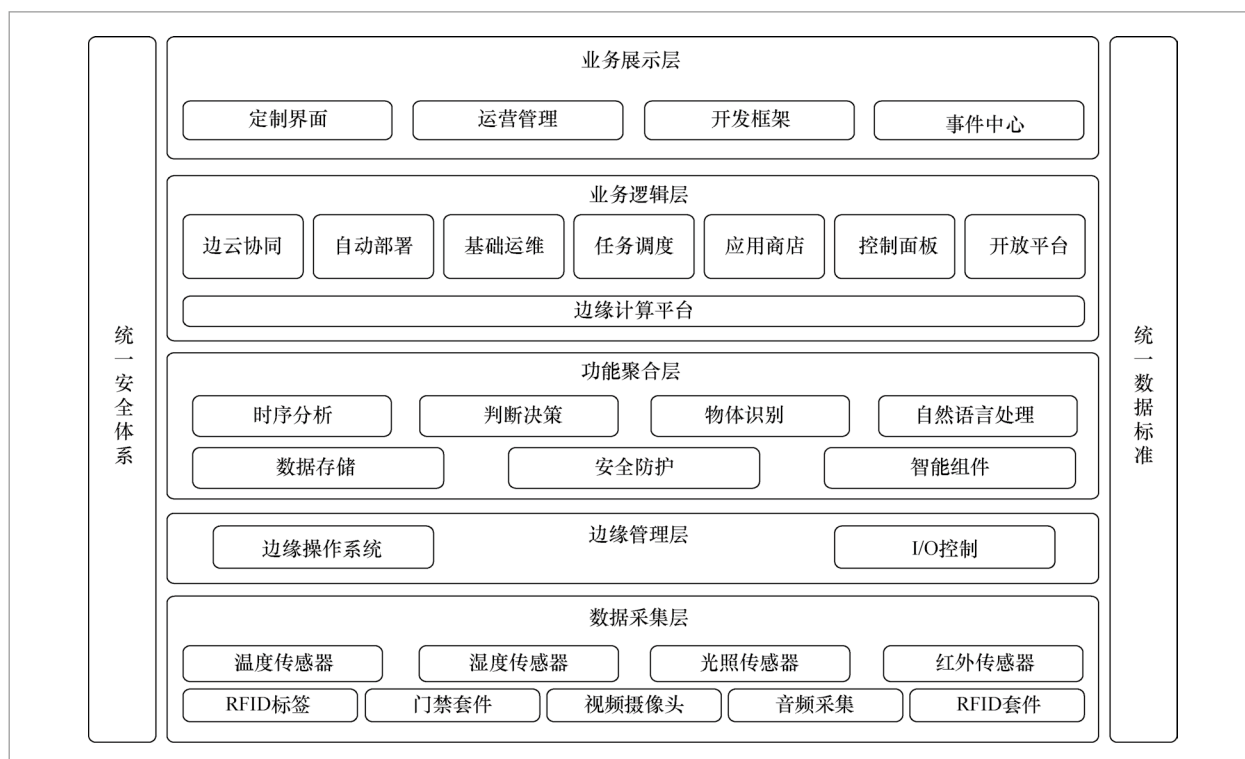


图1 EdgeBox 架构

使EdgeBox具备处理海量流式无线传感器数据的能力。

- **高效资源管理**: EdgeBox支持多租户环境下资源分离、调度及精确而详尽的资源使用状态的统计及汇总,便于进行高效的按需计费管理。

- **快速部署**: 一键部署边缘计算环境,使得边缘计算的扩展性极强,边际成本极低,为满足需求用量的动态变化问题,开发了弹性计算资源分配机制,满足用户爆发式的需求模式。

- **即时响应**: 数据在边缘端进行预处理或者完整的计算,实现快速的结果返回。低时延的特性使得EdgeBox能够实现工业生产、安防监控、生活应用领域中极低时延的控制策略。

- **用户自定义**: 借助EdgeBox开放的应用程序编程接口(application programming interface, API),用户可以轻松地搭建出自

定义的应用,实现可视化图形输出、数据分析、数据智能预警、感应器指令管理等功能。

EdgeBox具备多行业AI能力,拥有开放的人工智能组件,用户可根据需要添加组件,组件从平台下沉到边缘,进而实现边缘应用的智能化。其提供的组件基于先进的深度学习算法,涉及图像、视频识别的各个方面。其应用模式支持扩展更加丰富的人工智能组件,满足各行业人工智能需求。目前EdgeBox开放的人工智能组件有物体识别组件、人脸识别组件、异常聚集分析组件、肢体行为分析组件、电子围栏组件等。

EdgeBox采用虚拟机与容器混合的结构实现高效的资源管理^[24]。在底层,使用虚拟机建立不同的主机操作系统,并部署容器接口。用户可以选择直接在虚拟机中部署应用程序和服务,或者使用容器技术划分资源,混合结构允许云用户自主编排拥有的

资源。当操作系统级别上的资源压力相对较低时,使用容器不会影响应用程序的性能。EdgeBox使用该结构有效实现了资源和数据的隔离,满足了用户的多方面需求。

EdgeBox注重硬件与软件的高效结合。边缘计算系统具有碎片化和异构性的特点,在硬件层面上,可采用CPU、图形处理器(graphics processing unit, GPU)、现场可编程门阵列(Field-programmable gate array, FPGA)、ASIC(application specific integrated circuit)等各类计算单元,即便是基于同一类计算单元,也有不同的整机产品,例如基于英伟达GPU的边缘硬件产品,既有计算能力较强的DRIVE PX2,又有计算能力较弱的Jetson TX2;在软件系统上,针对深度学习应用,有TensorFlow、Caffe、PyTorch 等各类框架。不同的软硬件及其组合有各自擅长的应用场景,这带来了一个问题:如何选用合适的软硬件产品以满足自身应用的需求。在软硬件选型时,既要对自身应用的计算特性进行深入了解,从而找到计算能力满足应用需求的硬件产品,又要找到合适的软件框架进行开发,同时还要考虑到硬件的功耗和成本在可接受范围内。EdgeBox能够帮助用户对计算平台进行性能、功耗分析,并提供软硬件选型参考,帮助用户选择合适的软硬件组合,发挥边缘设备最大的计算效能。

6.2.2 EdgeBox边缘解决方案

(1) 电网通道异常检测

在电网通道异常监控工作中,由于输电设备数量大、环境复杂,现有的识别手段基本是通过有人直升机、无人机、视频监控、图像监拍等实现的,这些方法消耗了大量的人力、物力、财力,而且基本都是人工识别的,遗漏的情况严重且不能实时反馈,因此前端设备具有较好的智能识别功能是重中

之重。电网通道中的故障隐患通常包括电网设备周围的吊车、塔吊、施工机械和烟火异物等潜在危险。异常检测性能的评测需要考虑生产实际和技术指标,评价指标包括功耗和识别性能两个方面。

EdgeBox提供的解决方案综合考虑了前后端性能,通过对前端装置待机、拍照回传和识别功耗进行优化,可以满足充电后野外工作30天的性能指标。此外,后端装置识别图像速度快,平均0.8 s识别一张现场图片,满足了实时性需求。在识别性能上,平台把1万余张隐患图片作为训练样本,生成的深度学习模型可以用于四季各种天气下的异常分析,同时可以依据设备电池状态,动态调整误报水平,正常情况下,可将误检率控制在20%左右,漏检率控制在4%左右,对各类异常信息的识别精度为60%~90%。总体来说,EdgeBox能够在低功耗状态下,有效地监测电网通道异常信息,实现监控智能化。

(2) 变电站电池预测性维护

变电站中使用的备用铅酸电池数量大,且多分布于不同场地。传统检测需要人工进行充放电,并记录电池的状态数据,由专业人员进行数据分析。每个电池充放电过程长达12 h,耗费大量人力且无法实时获取电池信息,给管理维护带来了极大困难,亟须智能边缘平台进行统一管理。

EdgeBox为某变电站提供变电站备用蓄电池工作状态的监控及预测性维护功能。后端平台使用大量电池数据建立电化学模型和人工智能深度学习模型,并将其由平台下沉到边缘设备。在蓄电池上安装边缘人工智能设备,通过CAN总线接口获取电池电特性参数和环境参数,包含电池充放电过程中的电压、电流、温度以及环境温湿度等信息。由边缘设备进行电化学推理和深度

学习性能评估,然后将评估结果传至边缘管理平台。边缘平台及时向变电站工作人员反馈结果,进行维修更换等工作。在实地检测中,边缘平台实时呈现多个区域蓄电池的状态,并给出维护意见,节省了变电站人力物力的消耗。

6.3 FogHorn

6.3.1 平台特点

如图2所示, FogHorn将高性能事件处理器、机器学习算法和应用/软件开发工具包 (software development kit, SDK) 结合,进行工业领域数据分析,涉及的领域包括机械制造、电力储能、公共运输、智慧城市等。其主要特点如下。

- 性能高效: 使用高效的复杂事件处理器 (complex event processing, CEP) 对采集的数据进行实时分析,能够瞬时返回大量处理结果。

- 智能化: 使用边缘优化的表达式语言,允许机器学习模型被边缘化(将模型推到网络的边缘),从而将模型的大小减少80%,保证了模型在计算资源限制的环境下运行。

- 低成本: 在边缘处理大部分工业传感器数据,从根本上降低了数据的传输和存储成本,在数据密集型任务上优势较大,能够适应视频传感器数据量日益增长的需求。

- 开放性: 支持混合云和多云部署,开放性的部署方式可以实现更高效的云解决方案。

- 兼容性: 可运行在现有工业控制系统和资源受限的边缘计算设备上,减少在大型计算或新的工业控制系统上的投资,且支持计算资源的调整。

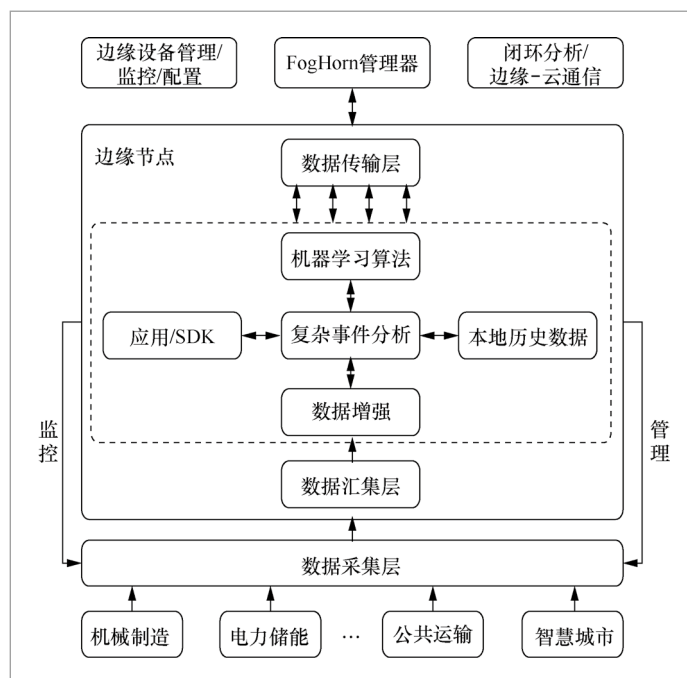


图2 FogHorn 边缘计算平台架构

6.3.2 FogHorn边缘解决方案

该公司的智能充电系统主要提供集成光伏太阳能、能量存储、高低压电力分配、控制和保护等功能,并为电动汽车提供多种充电模式。然而该系统存在误报电池状况、错误警报等问题。因此该公司想利用充电站产生的监控数据提升资源利用率,预测维护需求,减少系统误报次数,并且以更快的响应速度确保客户的高水平满意度。

FogHorn的解决方案包含一个两级架构,以最大限度地提高解决方案的性能,并且具有可扩展性。上层架构包括数据存储模块、机器学习模块和一个用来显示边缘处理结果的用户界面。较低层架构则用于数据提取和数据浓缩,例如解码、过滤、数据浓缩和数据对齐。该层还提供数据操作、分析建模、事件生成、数据存档和发布功能。首先利用边缘计算平台创建底层架构,收集电压、电流和温度等关键

流数据,并使用复杂事件处理器对数据进行采样、对齐等预处理操作,以便进行机器学习,并对充电状态的日常状态进行监控。系统将FogHorn平台添加到服务器后,显著减少了充电器发送到云的流量,降低了时延及后端服务器的成本和压力,并且有效减小了监控粒度,通过实时分析,加快了对事件发生的反应速度。同时平台还提供了一系列新的增值服务,比如电力分配、睡眠管理、完全充电通知等。

7 结束语

本文对如何利用边缘计算技术推动智慧电网发展这一问题进行了深入讨论,详细介绍了边缘计算技术在电路网线和变电场所智能监控、储能电池预测性运维和配电系统智能化这3个方面的业务场景和解决方案。作为云计算平台的有力辅助,边缘计算平台可以在电力行业,特别是在电力网络优化、电力数据传输、电力应用轻量化以及服务智能化等方面有更佳的表现。智慧电网的发展与人民生活水平的提高息息相关,边缘计算技术将助力全球电力服务企业,解决电网各业务场景中的疑难问题,完成电网普通设备的智能化扩展,实现传统电网系统的智能化改造,致力于各类智能技术在电力行业的效能最大化。

参考文献:

- [1] RAZA M Q, KHOSRAVI A. A review on artificial intelligence based load demand forecasting techniques for smart grid and buildings[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 1352-1372.
- [2] TRAN T X, HAJISAMI A, PANDEY P, et al. Collaborative mobile edge computing in 5G networks: new paradigms, scenarios, and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(4): 54-61.
- [3] MAO Y, YOU C, ZHANG J, et al. A survey on mobile edge computing: the communication perspective[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(a4): 2322-2358.
- [4] NUNNA S, KOUSARIDAS A, IBRAHIM M, et al. Enabling real-time context-aware collaboration through 5G and mobile edge computing[C]//The 12th International Conference on Information Technology-New Generations (ITNG), April 13-15, 2015, Las Vegas, USA. Piscataway: IEEE Press, 2015: 601-605.
- [5] HU Y C, PATEL M, SABELLA D, et al. Mobile edge computing-a key technology towards 5G[M]//ETSI white paper. [S.l.:s.n.], 2015.
- [6] NAQVI S A A, JAVAID N, BUTT H, et al. Metaheuristic optimization technique for load balancing in cloud-fog environment integrated with smart grid[C]//The 21st International Conference on Network-Based Information Systems, September 5-7, 2018, Slovakia. Cham: Springer, 2018: 700-711.
- [7] LIANG W, ZHENG M, ZHANG J, et al. WIA-FA and its applications to digital factory: a wireless network solution for factory automation[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2019(2): 1-21.
- [8] 屈志昊, 叶保留, 陈贵海, 等. 面向边缘计算的资源优化技术研究进展[J]. *大数据*, 2019, 5(2): 17-33.
- [9] QU Z H, YE B L, CHEN G H, et al. State-of-the-art survey on resource optimization in edge computing[J]. *Big Data Research*, 2019, 5(2): 17-33.
- [10] CHEN X, JIAO L, LI W, et al. Efficient multi-user computation offloading for mobile-edge cloud computing[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2016, 24(5): 2795-2808.
- [11] LIU J, WAN J, ZENG B, et al. A scalable and quick-response software defined vehicular network assisted by mobile edge computing[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(7): 54-61.

- 94-100.
- [11] LI S, GUO Z, SHOU G, et al. QoE analysis of NFV-based mobile edge computing video application[C]//2016 IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content (IC-NIDC), September 23-25, 2016, Beijing, China. Piscataway: IEEE Press, 2016: 411-415.
- [12] HU P, DHELIM S, NING H, et al. Survey on fog computing: architecture, key technologies, applications and open issues[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2017, 98: 27-42.
- [13] JARADAT M, JARRAH M, BOUSSELHAM A, et al. The internet of energy: smart sensor networks and big data management for smart grid[J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 56: 592-597.
- [14] SHI W, DUSTDAR S. The promise of edge computing[J]. *Computer*, 2016, 49(5): 78-81.
- [15] SATYANARAYANAN M. The emergence of edge computing[J]. *Computer*, 2017, 50(1): 30-39.
- [16] TAN K M, RAMACHANDARAMURTHY V K, YONG J Y. Integration of electric vehicles in smart grid: a review on vehicle to grid technologies and optimization techniques[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 720-732.
- [17] ZHOU Z, HUANG Y, LU Y, et al. Lithium-ion battery remaining useful life prediction under grey theory framework[C]//Prognostics and System Health Management Conference, August 24-27, 2014, Hunan, China. Piscataway: IEEE Press, 2014: 297-300.
- [18] OKAY F Y, OZDEMIR S. A fog computing based smart grid model[C]//2016 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), May 11-13, 2016, Yasmine Hammamet, Tunisia. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [19] AMIN M. Smart grid[J]. *Public Utilities Fortnightly*, 2015.
- [20] KUMAR N, ZEDADALLY S, RODRIGUES J J P C. Vehicular delay-tolerant networks for smart grid data management using mobile edge computing[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(10): 60-66.
- [21] 崔立真, 史玉良, 刘磊, 等. 面向智能电网的电力大数据存储与分析应用[J]. *大数据*, 2017, 3(6): 44-56.
- CUI L Z, SHI Y L, LIU L, et al. Applications of key technologies of storage and analysis in electric power big data for smart grid[J]. *Big Data Research*, 2017, 3(6): 44-56.
- [22] TUBALLA M L, ABUNDO M L. A review of the development of smart grid technologies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 59: 710-725.
- [23] SAPUTRO N, AKKAYA K. Investigation of smart meter data reporting strategies for optimized performance in smart grid AMI networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 4(4): 894-904.
- [24] FU S, LIU J, CHU X, et al. Toward a standard interface for cloud providers: the container as the narrow waist[J]. *IEEE Internet Computing*, 2016, 20(2): 66-71.

作者简介



张聪 (1986-), 男, 中国科学与技术大学计算机科学与技术学院副研究员, 主要研究方向为多媒体网络、互动视频直播、大数据与边缘计算等。



樊小毅 (1990-), 男, 博士, 深圳江行联加智能科技有限公司联合创始人、首席技术官, 主要研究方向为智能物联网, 包括大数据处理、物联网、人工智能等。



刘晓腾 (1996-), 男, 深圳江行联加智能科技有限公司人工智能 (AI) 算法实习生, 主要研究方向为深度学习、智慧城市和大数据分析。



庞海天 (1993-), 男, 清华大学计算机科学与技术系博士生, 主要研究方向为网络多媒体、边缘计算、大数据处理、人工智能、网络经济学分析等。



孙立峰 (1972-), 男, 清华大学计算机科学与技术系教授, 主要研究方向为在线社交网络、视频流处理、交互式多视角视频和分布式视频编码。



刘江川 (1975-), 男, 博士, 深圳江行联加智能科技有限公司创始人, IEEE Fellow, 主要研究方向为多媒体系统与计算机网络、云计算、社交网络、在线游戏、大数据和智能计算、新能源系统数据分析和优化、物联网和点对点网络等。

收稿日期: 2018-12-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61472204, No.61521002); 国家重点研发计划基金资助项目 (No. 2018YFB1003703); 北京市网络多媒体重点实验室基金资助项目 (No. Z161100005016051)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61472204, No.61521002), National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB1003703), Beijing Key Laboratory of Networked Multimedia Program (No. Z161100005016051)