



中国通信学会

CHINA INSTITUTE
OF COMMUNICATIONS

网络开源研究报告

(2021年)

中国通信学会
2022年6月

版权声明

本前沿报告版权属于中国通信学会，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本报告文字或者观点的，应注明“来源：中国通信学会”。违反上述声明者，本学会将追究其相关法律责任。

专家组和撰写组名单

专家组：

组长：

王建民 清华大学软件学院院长 教授

成员(以姓氏笔划为序)：

姓名	单位	职务
许志远	中国信息通信研究院	副总工
黄 韬	北京邮电大学	教授
	江苏省未来网络创新研究院	副院长

撰写组(按单位排名)

单位	姓名
北京邮电大学	汪硕、谢人超、刘江
中国信通院	郭雪、李晓明、张一阳
清华大学	黄向东、乔嘉林、何海洋
江苏省未来网络创新研究院	魏亮

前 言

随着网络通信领域技术与产业的不断变革，开源已成为技术发展的必然选择和重要基础，是推进各领域不断融合发展的关键驱动，对网络通信技术革新和产业演进起着十分重要的作用。国内外各行各业都开始重视开源组织的建设以及开源项目的发展，开展网络通信领域开源生态的建设，推进开源技术产业的发展，对驱动我国未来通信网络的建设和技术创新具有重要意义。

本报告梳理了开源的概念和重要性，系统调研了当前 5G、云计算等网络通信领域开源项目和开源组织生态的发展现状，对网络通信领域的开源技术产业进行了跟踪调研，为我国网络通信领域开源技术的发展提供了参考。

本报告共分为八个章节，在第一章背景中，首先概述了开源的概念和重要性，明确了国内外网络通信领域开源生态的总体情况和发展趋势；第二章简要说明了网络通信领域开源组织当前的发展现状，包括相关企业联合成立的基金会和项目；第三章着重介绍了开源协议的发展情况；第四章重点介绍了网络领域重点的开源项目，包括数据平面、控制平面和编排平面；第五章从 5G 基站与核心网两个方面介绍了 5G 领域重点的开源项目；第六章则是在云计算、边缘计算、云原生三个方向介绍了云领域主要的开源项目；第七章从电信运营商、互联网公司、高校与研究所介绍了开源技术产业的发展情况；最后第八章则是通过本报告进行的调研，对我国网络领域开源生态的发展提出的建议。



目 录

一、	网络通信领域开源技术发展背景	1
(一)	开源生态概述	1
(二)	国外开源生态总体情况	3
(三)	国内开源生态总体情况	5
(四)	开源生态发展趋势	10
二、	开源组织发展情况	12
(一)	开源组织介绍	12
(二)	结语	25
三、	开源协议发展情况	27
(一)	GNU	27
(二)	BSD	29
(三)	Apache	29
(四)	MIT	31
(五)	木兰	31
(六)	结语	32
四、	网络领域重点开源项目	33
(一)	数据平面	33
(二)	控制平面	47
(三)	编排平面	58
(四)	结语	64
五、	5G 领域重点开源项目	64

(一) 基站	66
(二) 核心网	80
(三) 结语	88
六、 云领域重点开源项目	92
(一) 云计算	92
(二) 边缘计算	98
(三) 云原生	109
(四) 结语	116
七、 开源技术产业发展情况	116
(一) 电信运营商	117
(二) 互联网公司	124
(三) 高校与研究所	134
八、 开源生态发展建议	145

一、网络通信领域开源技术发展背景

（一）开源生态概述

1. 开源的概念和内涵

开源一词起源于软件行业，即开放源代码，最初由自由软件运动中被提出，指任何人都可以访问、复制、修改和重新分发的软件代码，依托开源社区和同行评审，以分散、协作的方式开发。如今，开源已拓展到软件领域之外，成为一种软件生产界限以外的运动和工作方式，其协作、透明、包容、社区等理念广泛影响着其他行业和领域，促进着科学、技术的创新和进步。在网络通信等技术领域，开源意味着软件、硬件、数据等多种技术和资源的共享和开放，是促进网络信息技术创新的重要途径。

开源的内涵在于自由、共享和协作，不只是开放源代码的软件技术开发，开源包含更为广泛的开源技术领域以及合作创新的理念和机制，包括开源项目、开源文化、开源产品、开源经济，或是协作参与、快速原型和面向社区开发等原则。围绕开源，已经形成了巨大的技术生态体系，并且越是在新兴领域，开源比例越大。人们在使用开源软件时必须接受与专有软件截然不同的开源许可证，使用者在遵守许可证限制的条件下，可自由获取软件源代码和资源，并可使用、复制、修改和再发布。开源实质上是一种开放和共享的开发方式，依托整个互联网平台，累积所有人的智慧，实现持续的发展和 innovation。

2. 开源的重要性

开源已成为技术发展的必然选择和重要基础，是推进与其他领域

不断融合发展的重要力量，实现技术革新与产业演进的最佳途径，在网络通信领域，开源的重要性也愈发凸显。

在创新性方面，无论是在全球范围还是中国国内，开源正在推动网络通信、深度信息技术的创新发展，如云计算、物联网、5G、移动终端、大数据、智慧城市、区块链、量子计算机和人工智能等，开源成为了创新的重要途径也是核心动力。活跃的开源社区，让参与者能够获得社区小组或者其他公司的帮助、资源和观点。同时开源能使顾客和用户直接看到并参与到产品开发中来，这比闭源软件开发更能了解客户的需求。供应商可能只关注产品的某一特定方面，而一个社区能致力于开发出更多的功能，能创造出对用户更有价值的产品。

在可靠性方面，专有代码只靠单个作者或控制该代码的公司来更新、修复和保持正常工作。开源代码的存在时间可以超越其原作者，因为活跃的开源社区会不断进行更新。开放标准和同行评审可以确保开源代码经常得到适当的测试，严重的问题通常被标记和快速固定，小问题也经常很快会被发现。此外由于源代码可自由访问，而且开源社区非常活跃，因此同行程序员会积极检查和改进开源代码。开源模式下，代码变得充满活力和生机，而不是固步自封、停滞不前。

在透明性方面，开源允许使用者自行检查和跟踪想要了解的数据路径和类型，不必再依赖供应商。同时由于开源代码能够修改，使用者可以用来解决专属的业务或独特的问题，还可以依托社区帮助和同行评审帮助实施新解决方案。这解除了供应商的锁定，赋予了用户自由。

在许可方面，典型的闭源软件许可充斥着一些不公平条例，它通常是对产品供应商有利，而非客户。如果软件停止运行，或者供应商要求客户支付更多的费用，客户甚至无法起诉供应商的不当行为。而像 GPL、BSD 一类的开源许可证就是为保护客户专门设计的，而不是供应商，它确保客户可以按照自己的需求使用软件，而没有专制限制。

（二）国外开源生态总体情况

在国外，开源一直是科技产业发展的一大驱动力，尤其是在大数据、人工智能、云计算等新兴的网络和通信技术领域。对于企业来说，开源帮助企业站在巨人肩膀上，可以避免资源浪费、实现快速创新和产品迭代。2018 年的两起开源社区的收购案，如微软 75 亿美元收购 GitHub、IBM 340 亿美元收购红帽等，都表明了开源的价值。微软的 CFO Amy Hood 曾表示，微软收购 GitHub 的一个重要原因，就是能够获得与社区相关的技术。

在政府层面，美国政府支持非盈利国际开源组织建设，先后支持成立了 Apache 基金会、Linux 基金会、OpenStack 基金会等国际主流的开源组织，积极引领开源生态。美国国防部高级研究计划局（US Defence Advanced Research Projects Agency, DARPA）投入 3000 万美元，支持由美国多所大学和开放网络基金会（Open Networking Foundation, ONF）共同发起的网络研究项目——Pronto，使用开源可编程的网络构建端到端的 5G 网络，充分应用网络可编程属性，打造网络细粒度可见、可验证、闭环控制的网络试验床，以支撑丰富的

科学研究、验证，推动网络技术创新及未来网络开源生态建设。DARPA 曾于 1969 年启动的 ARPANET 奠定了现代互联网的基础，Pronto 项目也是自 ARPANET 创建以来美国政府对网络研究领域的最大投资之一。欧洲多国政府通过防止商业软件垄断支持开源软件发展，如多次对微软实行高额罚款，促进软件市场公平竞争，促使 Windows 系统与开源操作系统实现互操作，并解除了微软垄断性的捆绑销售策略。2021 年 9 月，欧盟委员会发布《开源软硬件对欧盟经济的技术独立性、竞争力和创新的影响研究报告》，这份报告从多个维度详细的阐述了开源软硬件对于欧洲经济的重大影响。欧盟还推出“IDABC”计划解决开源许可证的风险问题，通过制定欧盟公共许可证 EUPL 促进各成员国共享和重新利用由公共机构和行政机构开发或为其开发的软件；俄罗斯政府强制在政府信息系统中使用开源软件替换 Windows 系统。英国政府宣布公共事业部门在安装电子计算设备时，要求首选开源软件。英国的政府数字化服务（Government Digital Service, GDS）将开源理念引入了政府。不仅仅是使用开源代码，而且是创造开源代码。

在跨国企业层面，全球跨国企业联合推进开源组织建设。企业主导开源不仅可以引领技术和产业发展，同时，能够降低开发和市场开拓成本，提升综合竞争力。据红帽企业开源现状调查报告，目前有 90% 的 IT 领导者正在使用企业开源，企业开源的主要应用领域网络、数据库、安全均在 50% 以上。如 IBM、思科等联合推动 Linux 操作系统进步，英特尔、爱立信等共同推动 Openstack 的发展等。此外，互

联网和软件巨头企业牵头开源社区建设，积极构筑产业生态。如谷歌建立了 TensorFlow、安卓等知名开源社区，在全球范围内形成良好的商业生态。为了帮助推动开源工作，微软有一个专门的开源计划办公室（OSPO），其目标是帮助员工安全、有效、轻松地使用和参与开源。自 2004 年开始，Google 数据中心就一直使用定制的硬件设备。2011 年，Facebook 成立了 OCP（Open Compute Project）项目，并且于 2016 年底成立了新的 TIP（Telecom Infra Project）项目。2018 年 3 月，Linux 基金会联合主要厂商发起 DANOS（Disaggregated Network Operating System）项目，旨在打造开放、高效灵活的网络控制平面。同一时间，ONF 发布了下一代 SDN 接口战略，并在 Google 的支持下推出了 Stratum 项目，致力于实现真正的软件定义的数据平面平台，提供白盒交换机和开放软件系统。2018 年 10 月，AT&T 宣布将向 OCP 计划提交白盒基站网关路由器的技术规范，OpenStack 的 StarlingX 边缘计算项目首次发布。同时，Intel 的 DPDK、微软的 SONiC、Barefoot 的 P4 等关注数据平面性能的项目也越来越受到重视，网络的开源发展趋势方兴未艾。

（三）国内开源生态总体情况

开源软件在我国兴起于 1997 年，最初主要是为解决 Linux 系统的汉化问题。经过多年发展，开源软件已成为我国软件生态的重要组成部分，创造了显著的经济和社会效益。目前，我国开源软件的应用已逐渐渗透到众行业中。

总体来看，我国开源软件产业发展主要体现在如下四个方面：

一是大型企业开源战略逐渐清晰。华为、腾讯等 IT 巨头纷纷投身国际开源项目，积极加入开源软件基金会并为多个开源项目贡献代码，华为在 Linux 内核版本 4.8 至 4.13 开发周期中贡献度全球排名第 15，仅次于甲骨文。同时，各大公司相继推出自主开发的开源项目，如阿里巴巴发布的开源服务框架 Dubbo，百度发布的自动驾驶领域的阿波罗(Apollo)等开源软件。在网络操作系统方面，我国设备商、运营商等已经加入国际网络操作系统开源组织和标准化组织，并形成了不同的生态链。在网络控制方面，OpenDaylight 开源项目在中国发展迅猛，以中国移动、阿里巴巴、腾讯、中兴、华为为代表的多家通信、IT 巨头都加入了该项目，并大力构建相关的产业生态。ONOS (open network operating system) 是针对运营商网络场景打造的开源操作系统，当前 ONOS 的合作伙伴包括 AT&T、华为、中国移动、中国联通等。在网络编排方面，中国移动、华为联合发起了 OPEN-Orchestrator (OPEN-O)项目，随后与 AT&T 主导的 ECOMP 项目合并，由中国移动牵头成立了 ONAP 项目。

二是国内开源社区建设逐渐成熟。随着开源软件在我国的推广和发展，中文开源社区已从最初的爱好者团体发展到具有开发、应用、服务功能的稳定社区。以开源中国、绿色计算产业联盟、中国开源云联盟、中国人工智能开源软件发展联盟等为代表的开源组织通过整合产业链上下游资源，推动了我国开源软件的快速发展。此外，我国研发的木兰宽松许可证通过 OSI 认证，成为首个中英双语国际开源许可证，可被任一国际开源社区采用。2017 年起，清华大学大数据系统

软件国家工程实验室陆续开源了工业物联网数据库 **IoTDB**、迁移学习算法库 **TransferLearningLib**、时序数据质量算法库 **Quality**，形成了“清华数为”大数据系统软件社区。中国信通院于 2018 年牵头成立金融行业开源技术应用社区（**FINOC**），又于 2021 年牵头成立通信开源社区（**ICTOSC**）与科技制造开源社区（**TMOSC**）。一方面推动行业用户开源软件应用，另一方面将用户需求与上游社区进行有效联动。2021 年 9 月，由中国信通院发起的可信开源社区共同体（**TWOS**）正式成立，以提升开源项目质量，构建成熟的开源社区，推动开源行业应用。

三是开源软件应用日益广泛。开源软件降低了技术应用门槛，而我国巨大的应用市场也为开源软件带来了发展机遇。例如，小米、华为等手机厂商基于 **Android** 开源操作系统开发出自主手机操作系统 **MIUI**、**Emotion UI** 等。又如，云计算开源云参考架构 **OpenStack** 在我国金融、制造等领域得到了广泛的应用。

四是开源软件政策环境日益向好。近年来，我国政府高度重视开源软件发展，发布多项政策，积极引导社会资源投入，促进开源模式不断成熟。如国务院印发的《“十三五”国家信息化规划》明确指出，支持开源社区创新发展，鼓励我国企业积极加入国际重大核心技术的开源组织，从参与者发展为重要贡献者。

目前，开源在互联网领域、信息技术领域、移动终端（手机）领域已成为软件发展的主流。在互联网开源的网络服务器占比达 70%，在深度信息技术基于开源的占比达 90%，开源的移动终端（智能手机）

占比 84%。GitHub 中，2020 年较上一年新增了 1600 万开发者用户，预计 2025 年开发者用户的数量将达到 1 亿。这其中，在 GitHub 的中国开发者数量及开源贡献度增长已成为全球最快，GitHub 预测到 2030 年中国开发者将成为全球最大的开源群体。从这些数据可以看出，与国际几乎同步，开源成为我国推动深度信息技术创新发展的基础。来自各方的数据显示，2020 年中国开源的发展速度已成为全球最快，中国开源已经接近或部分达到世界先进水平。中国政府高度重视开源。2021 年 3 月 12 日，《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》首次明确地将开源写入国家总体规划纲要之中，中国开源从此开启了新的篇章。中国正在从人口红利进入到开发者红利时代，很快将成为全球第一大开发者市场。

如今，中国开源技术和产业在总体上与全球其他国家相比，正在接近一流水平，但尚有差距，仍然处于追赶状态，中国对开源的贡献虽大，却缺乏有重大影响力和话语权的开源产品。当下，主要的开源产品与开源平台均被少数国外科技巨头所控制，我国信息技术产业随时面临着被封锁的风险。中国少数企业开始进入全球开源的领跑者队伍，并且涌现出少数杰出的开源领袖，中国开源的国际合作已日趋紧密。近年来，中国开源的发展正处于加速发展阶段，中国开源的贡献在全球逐渐得到了公认。全球知名的开源社区和开源基金会逐渐加大对中国开源生态的整体合作，越来越积极地协助中国本土企业和开源组织发展，加速促进中国开发者与全球开发者的技术交流，正在形成全面合作，共生共赢的紧密盟友，中国开源产业在他们的支持和帮助

下，正在快速融入全球开源生态，并在某些领域发挥了不可替代的核心作用。

但同时，我们也要清醒的认识到，中国的开源社区、开源托管平台、开源项目、开源教育体系、开源基金会运营、企业开源治理以及开源风险防范体系等方面，还存在诸多薄弱环节，亟待改善解决。在中美科技竞争加剧的大形势下，美国单方面与中国科技脱钩，不断增加针对中国实体的管控名单，是中国科技发展面临的巨大挑战。2020年7月，Linux基金会发布中英双语白皮书，声称公开发布给全世界享用的开源技术不受制于美国EAR《出口管理条例》，坚持秉承开源无国界的开源文化，给中国开源界以支持。但遵照美国公司法条例，在具体开源使用层面，中国开源软件的应用确实存在着断供风险；现阶段我国开源生态发展尚未完善，开源供应链风险突出，如中国本土开源项目托管平台、开源社区孵化平台、开源风险综合防控平台等还非常薄弱；中国很多重点领域的开源技术与开源项目发展，还处于追赶阶段；当前的计算机教育模式，还不能完全匹配大量开源技术与产业的发展速度和规模；许多早期的优秀开源项目需要资金支持和孵化服务；开源相关的法律法规及开源文化的普及还处于初级阶段。中国科学院软件研究所也已经启动了开源软件供应链重大基础设施建设。目标就是为关键设备和系统提供高质量、低风险的开源软件供应链，打破国外IT巨头的行业价值链垄断。

相较于世界主流开源软件发展情况，我国尚存在如下不足。

一是缺乏专业的开源软件基金会。由于我国缺少能够将企业凝聚

在一起的开源基金会，大部分开源组织和企业仅仅希望快速应用开源软件以获取价值，彼此之间缺乏信任基础和合作意愿，不少企业选择将部分开源项目托管到国际开源社区，导致我国原本薄弱和稀少的开源资源更加分散，制约了我国开源生态的良性可持续发展。

二是**缺少有影响力的领军人物**。开源软件的发展和创新，离不开持续作出贡献的领军人物。由于我国缺乏有效的人才评价机制、持续的资金支持和专业的运营机构等，从而导致缺少既理解开源生态、认同开源文化，又具备熟练技术、善于协作的核心人物引领开源软件的发展。

三是**缺乏有影响力的开源项目**。开源项目是开源生态系统的核心，我国开源软件项目多聚焦特定的应用，缺少基础核心和原创类的开源项目。

四是**尚未形成优良的开源生态**。开源软件的发展与良好的开源生态相辅相成。在产业应用方面，我国尚未形成可持续、成规模的开源产业集群。在运营方面，国内缺乏专业化的开源社区运营体系，开源软件的公共服务平台和开源软件推进机构的建设还需加强。

（四）开源生态发展趋势

在开源社区方面，中国已经具备了全球最大的开发者群体，随着开源在各领域的深入推广和普及，以及在深度信息技术发挥的关键作用，中国的开源社区将成长为全球最活跃的开发社区之一，无论是项目规模还是技术开发者的活跃度。开源作为当代一种开放的创新协作模式——开放源码的分布式社区开发方式，正在被国内越来越多的

企业、组织和社团所接受，这种突破组织物理边界、高效敏捷的沟通和生产组织方式为许多传统行业注入了新的活力。中国开源企业将持续增加，成规模的开源社区和开源独角兽企业必然加速涌现。来自中国开发者、企业和科研机构的开源贡献在全球持续增加，获得越来越多的尊重和认同，中国开源的美誉度逐年提升。与此同时中国在全球开源生态中的整体地位也将同步提升，在一些优势领域将逐步占据领导地位。中国科技巨头中刮起的产学结合风，也为整个事件增加了一份砝码。华为、阿里、腾讯、百度等都通过校企合作，从源代码层面推动大学生参与到开源社区的建设和教育中去，掌握最为先进的开源技术，提升代码质量，为行业输送高端人才

在开源创新方面，不论是在全球范围还是中国国内，开源正在推动深度信息技术（机器学习、人工智能、自动驾驶、区块链、神经网络、量子计算等）的创新发展，是重要途径也是核心动力。开源技术在目前云计算、大数据、人工智能领域发展迅猛，已经成为技术主流。随着开源规模的扩大，国内开源数量增长的同时，也覆盖了全栈技术领域。开源与网络的结合掀起了技术创新的热潮，从垂直细分的数据平面、网络操作系统、网络编排层面到横向拓展的云计算、边缘计算、工业互联网场景催生了众多优秀的开源项目，驱动着技术之翼振翅高飞。未来网络在控制平面、数据平面等各个方面都成立了开源组织，如 **OpenDaylight**、**ONOS**、**ONAP**（open network automation platform）等，并被广泛认可，网络软件、硬件开源已经成为了未来网络技术发展的一大重要趋势。

在产业应用方面，开源正在成为中国信息技术产业的主流技术，广泛应用于互联网、电子商务、电子竞技、智能家居、消费电子以及现代服务业等领域，同时开源技术正在快速被金融、能源、通讯、航空航天、交通、教育、医疗等产业采用，开源技术在各行业的推广和普及在加速。

在商业市场方面，中国开源将逐渐走向海外，并获得全球商业市场。得益于中国的工程师红利、中国在互联网时代积累的场景红利，中国开源公司将有很大机会走向海外。在未来，中国将出现非常多、立足全球化的优秀开源公司，主要体现为创始人具有中国背景，或者工程师大部分来自中国，但客户遍布世界各地。未来十年，中国将迎来一批世界级优秀开源公司。

二、开源组织发展情况

（一）开源组织介绍

1. LFN

Linux 基金会于 2018 年 1 月成立新基金会 LF 网络基金会（LF Networking Fund, LFN），整合旗下开源网络项目，而涉及到的六大 Linux 基金会开源网络项目分别是 ONAP、OPNFV、OpenDaylight、FD.io、PDNA 和 SNAS。

LFN 旨在协调这六个目标相似的开源项目，消除不同项目之间的重叠或冗余，并创建更高效的流程，加快其工作。LFN 将为各个项目之间的合作提供一个平台，同时保证技术上的独立性。LFN 项目的加入秉持自愿原则，每个网络项目决定是否加入以及何时加入。而且每

个项目都将继续保持技术独立和发布蓝图，六个项目的技术指导委员会（TSC）保持不变，但是将由一个技术咨询委员会（TAC）监管，此外还有一个营销顾问委员会（MAC）。

前 Linux 基金会网络和编排主管 Arpit Joshipura 将担任 Linux 基金会的 LFN 执行董事，他表示 Linux 基金会将推动 LFN 的一般业务管理。

LFN 拥有 83 家企业成员，其中包括下图所示的白金会员。其中包括超过 60% 的全球移动用户，十大网络和企业厂商中的大部分，系统集成商、云服务提供商等。



图 2-1 LFN 白金会员成员

Joshipura 在接受采访时表示：“在过去的五年中，开源项目已经获得了显著增长，随着具体的使用情况或问题的出现，建立了多个单一项目，并且已经得到了部署。现在，Linux 基金会致力于跨项目进行架构讨论，需要从解决方案的角度来看待所有这些组件。”

这六个开源项目一起形成了从数据平面到控制平面、编排、自动化和端到端测试的网络栈的基础，LFN 将为跨项目协作提供一个平台。

Vision: Automating Cloud, Network, & IOT Services

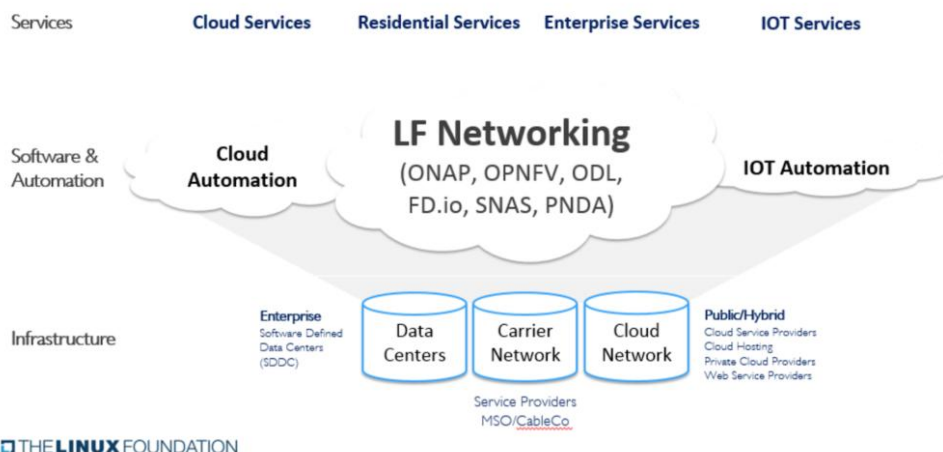


图 2-2 LF 网络栈基础

在 LFN 中成员们要求一个将不同的项目组合成一个软件堆栈平台的答案，同时希望跨项目进行架构讨论，例如多 VIM 协作和 VNF 入门。新的组织结构解决了成员之间重复收费的问题，之前的状况是成员想要加入任何一个项目都需要交会员费，但是 LFN 成立之后他们只需要交 LFN 的会员费，就可以参加这六个项目以及未来即将加入 LFN 的其他项目。预计下一个加入 LFN 的可能是 OpenContrail 项目，该项目在 2017 年 12 月由 Juniper 开源给 Linux 基金会托管。

LF Networking Structure Overview, effective Jan 1 2018

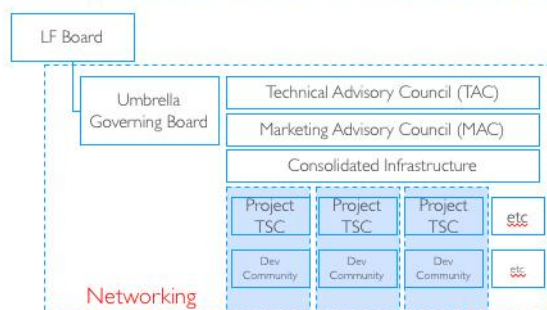


图 2-3 LF 网络概览

2. ONF

开放网络基金会 (Open Networking Foundation) 于 2011 年由 Deutsche Telekom、Facebook、Google、Microsoft、Verizon 和 Yahoo 创立。作为仍在发展壮大中的非盈利组织，其使命是加速开放 SDN 的部署。ONF 推广开放 SDN 和 OpenFlow 技术及标准，促进产品，服务，应用，客户和用户市场的发展。位于中国天地互连的“全球 SDN 测试认证中心 (SDNCTC)”是 ONF 面向亚太地区的权威认证中心。

其宗旨在于推动软件定义网络 (SDN) 和规范 OpenFlow 协议与相关技术，以促进互联网的进步。该标准制定和 SDN 促进组织将使计算机与网络之间的云计算模糊化，同时该计划旨在通过电信网络、无线网络、数据中心和其他网络领域中的简单软件更改来加速创新。

ONF 在推动网络行业转型的使命中处于一个关键的转折点，已成功交付了利用分类、商用硅、白盒硬件系统和开源软件的平台和解决方案。为此，ONF 为服务提供商和参与的供应链公司提供了极具破坏性的价值主张。ONF 董事会在文档中提到：“我们清楚地看到构建和部署网络的生态系统在发生变化。过去，我们依靠现有公司的专有产品和解决方案进行网络构建，我们部署的所有 ONF 平台都使用供应商，这些供应商已经接受了基于商用硅、白盒和开源平台的构建解决方案。一个新的生态系统正在出现，这标志着服务提供商格局发生重大转变的开始。通过这种转变，我们看到了强有力的证据，证明早期采用运营商将具有竞争优势。我们还看到，可能会出现一类新的供应商。在所有情况下，前瞻性思维组织将处于最佳位置，能够驾驭

这一转变，获得竞争优势。”

随着 ONF 平台和解决方案在 2019 年进入一级生产网络，ONF 的模型现已得到验证。朝着提供新的解决方案前进的同时，也带来了显著的资本和运维支出的节省。

截至 2020 年，ONF 已经促成了由 200 多个合作伙伴、成员和合作者组成的社区，并发明了独特的、精心策划的开源模型和运营商驱动参考设计流程，努力推动将平台引入其的生产网络。同时，ONF 将发布由这些组件构建的开源组件（ONOS、VOLTHA、层等）以及集成的移动、宽带和 SDN 平台。

3. OCP

开放计算项目（Open Compute Project, OCP）是由 Facebook 联合英特尔、Rackspace、高盛和 Arista Networks 在 2011 年联合发起的开源硬件组织，其使命是提供高效、灵活和可扩展的计算硬件设计，以有效地支持不断增长的计算基础设施需求。其出现是因为 CSP 发现传统的标准满足不了自己的业务需求，开始制定新的标准，OCP 是 Facebook 一次巨大的尝试，试图让 IT 行业以符合 Facebook 的方式提供组件；它希望硬件创新的速度接近于软件创新的速度，通过分离机架和服务器的组件的方式，这样就可以独立开发，但仍然通过通用接口进行合作。OCP 为个人和组织提供与他人分享知识产权的体系架构，以设计、使用、支持和推动交付最有效的服务器、存储器和数据中心硬件作为可扩展计算使命的工程社区，通过开源硬件和软件相结合，促进服务、存储和数据中心技术的开放与普及。

OCP 基金会在白盒交换机发展方面的主要工作组有：高性能计算（HPC）、开放计算网络、安全（孵化）项目、电信等项目，每个工作组孵化一个或多个项目。

由于发展迅速，参与该项目的企业如今已不限于 Facebook 一家。微软、LSI 公司等先后宣布加入 OCP 项目，以全新的开放态度参与整个行业。OCP 项目委员会成员包括来自英特尔、Rackspace、Arista Networks 和高盛等公司的高管。

时至今日，谷歌、微软、IBM、AT&T 等全球知名的云计算和电信企业先后成为 OCP 的铂金级别会员，使得该项目成为美国互联网数据中心的事实标准。浪潮也在 2017 年 1 月宣布正式成为开放计算项目的铂金级别会员，标志着浪潮同时成为中国和美国两大数据中心开放项目的核心成员。

在 2019 年 3 月的 OCP 全球峰会上，Submer 公司推出了全新的 SmartPodX 平台，以及适用于高性能，超级计算和超大规模基础设施的开放式计算项目（OCP）规范；华为宣布与 OCP 展开合作，将在其最新的全球数据中心采用 OCP 的 OpenRack，将有助于降低总体拥有成本（TCO）并提高规模计算领域的能效。

2019 年 6 月，首届 OCP China Day 在北京正式开启，聚焦人工智能、边缘计算、OpenRack、OpenRMC、SONiC、OAM 等前沿技术话题，来自 Facebook、LinkedIn、Intel、微软、百度、腾讯、阿里、诺基亚、中国移动、浪潮等资深技术专家分享了最新技术进展。

2020 年 5 月 12 日，以“Open For All”为主题的 2020 年 OCP 全

球峰会在线举行。作为 OCP 铂金会员，浪潮持续定义领先的开放计算产品，展示了多款基于开放计算的下一代数据中心解决方案，加速开放计算走进传统行业。

2020 年 11 月 13 日，由 OCP 基金会主办、浪潮承办的开放计算中国社区技术峰会在北京举行。超过 600 多名 IT 工程师和数据中心从业者参加了此次大会，来自 Facebook、微软、浪潮、腾讯、百度、阿里、中移动、Intel、三星、NVIDIA、朝亚、燧原科技等科技企业的资深技术专家进行了主题演讲，探讨开放计算在人工智能、边缘计算等新兴技术领域及未来数据中心基础设施层面的发展与应用，并分享了下一代数据中心创新实践和生态发展的经验和最新技术进展。

2021 年 7 月 27 日，由 OCP 社区主办、浪潮承办的第三届 OCP China Day 2021 在北京举行，近千名 IT 工程师和数据中心从业者参会。开放计算正成为当前乃至未来数据中心的创新主力，通过全球化协作的创新模式，解决数据中心基础设施可持续发展的重大问题，如能耗、高速网络通信、智能运维及循环利用等。

4. TIP

电信基础设施项目（Telecom Infra Project, TIP）是 Facebook 于 2016 年联合运营商、设备提供商、系统集成商以及其他的科技企业发起的电信领域基础设施构建解决方案，旨在通过共同合作发展新技术，以改变传统的构建和部署电信网络基础设施的方法。截至 2020 年已有数百家公司参与进去——从服务提供商和技术合作伙伴到系统集成商和其他连接利益相关者。目前，通过白盒交换机技术构建和

部署电信网络基础设施是最重要的研究方向。

其工作流程包括构思与定义、构建与测试、发布与部署三部分：

(1) 构思与定义：

需要从运营商和其他相关利益相关者那里确定相关的最佳市场机会。对业务驱动的用例进行优先级排序，并根据高级技术需求进行调整，以解决这些用例。

(2) 构建与测试：

测试和验证框架根据项目组的要求测量和测试网络元素、网络产品或端到端配置。通过 TIP 社区实验室，参与者协作生成并验证项目组解决方案、实验室测试计划、退出报告和规范。

在 TIP 的核心，将会把早期的 POC、产品和解决方案引入 TIP 实验室和测试环境，以推动开放和分类解决方案的验证和最终部署。TIP 的实验室和测试环境会产生徽章，突出一致性和成熟度，并在 TIP 的交换中详细说明。

(3) 发布与部署：

这个阶段将进行开放式网络组件、配置或端到端解决方案的商业部署的最终验证和最佳实践共享

2019 年 4 月，ONF 和 TIP 宣布联手推动开源光传输技术的进展，ONF 和未来网络发展白皮书(2020 版)96ODTN 项目和 TIP 的 OOPT 群原本目标一致，后来在演化中逐步形成了互补的发展路径，并进行了多次合作展示。2019 年 11 月，TIP 区域峰会上，TIP 与两家设备厂商 Infinera 以及 Edgcore 联合宣布西班牙电信继德国部署之后基于

Infinera 与 Edgecore 的解耦式基站网关 DCSG 实现首次商业部署。

5. CNCF

CNCF，全称 Cloud Native Computing Foundation（云原生计算基金会），成立于 2015 年 7 月 21 日（于美国波特兰 OSCON2015 上宣布），其最初的口号是坚持和整合开源技术来让编排容器作为微服务架构的一部分，其作为致力于云原生应用推广和普及的一支重要力量，不论您是云原生应用的开发者、管理者还是研究人员都有必要了解。

CNCF 作为一个厂商中立的基金会，致力于 Github 上的快速成长的开源技术的推广，如 Kubernetes、Prometheus、Envoy 等，帮助开发人员更快更好的构建出色的产品。同时推广技术，形成社区，管理开源项目并推进生态系统的健康发展。

CNCF 的组织由以下几部分组成：

(1) 会员：包括白金、金牌、银牌、最终用户、学术和非赢利成员，不同级别的会员在治理委员会中的投票权不同。

(2) 理事会：负责事务管理

(3) TOC（技术监督委员会）：技术管理

(4) 最终用户社区：推动 CNCF 技术的采纳并选举最终用户技术咨询委员会

(5) 最终用户技术咨询委员会：为最终用户会议或向理事会提供咨询

(6) 营销委员会：市场推广

TOC（Technical Oversight Committee），即技术监督委员会作为

CNCF 中的一个重要组织，其成员通过选举产生，它的作用包含以下几个方面：

- (1) 定义和维护技术视野
- (2) 审批新项目加入组织，为项目设定概念架构
- (3) 接受最终用户的反馈并映射到项目中
- (4) 调整组件间的访问接口，协调组件之间兼容性

同时每个 CNCF 项目都需要有个成熟度等级，申请成为 CNCF 项目的时候需要确定项目的成熟度级别。成熟度级别(Maturity Level)包括以下三种：

- (1) **sandbox** (初级)
- (2) **incubating** (孵化中)
- (3) **graduated** (毕业)

是否可以成为 CNCF 项目需要通过 **Technical Oversight Committee** (技术监督委员会) 简称 **TOC**，投票采取 **fallback** 策略，即回退策略，先从最高级别 (**graduated**) 开始，如果 2/3 多数投票通过的话则确认为该级别，如果没通过的话，则进行下一低级别的投票，如果一直到 **inception** 级别都没得到 2/3 多数投票通过的话，则拒绝其进入 CNCF 项目。如果想要了解当前所有的 CNCF 项目可以访问以下域名 <https://www.cncf.io/projects/>。项目所达到相应成熟度需要满足的条件和投票机制见下图：

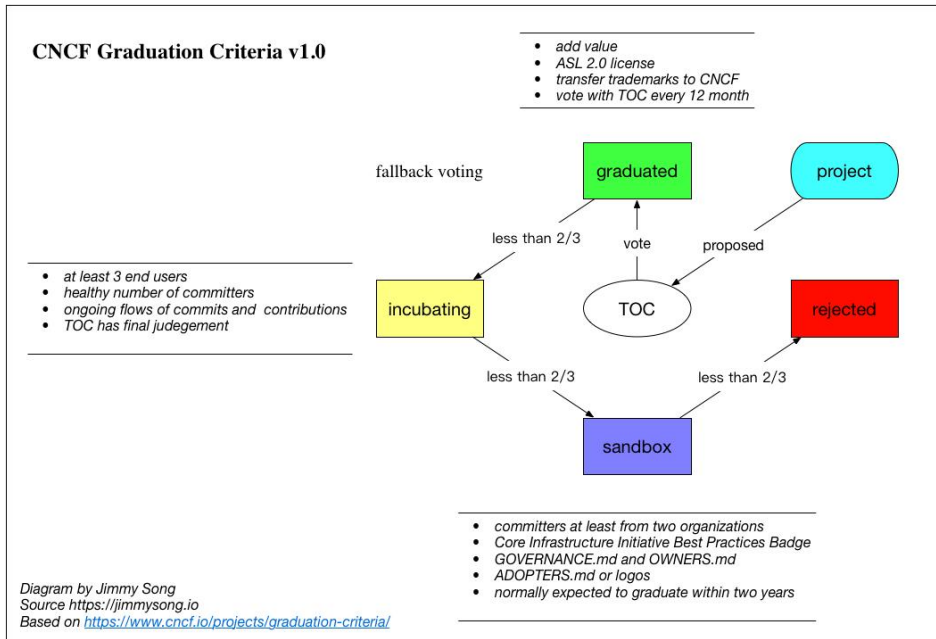


图 2-4 CNCF 项目毕业准则

6. ODCC

开放数据中心委员会（open data center committee，ODCC），前身为天蝎联盟，是由阿里巴巴、百度、腾讯、中国电信、中国移动、中国信息通信研究院、英特尔联合发起成立，由数据中心相关的企事业单位自愿结成的行业性的全国性的非营利性的社会组织。委员会旨在打造中国的数据中心开放平台，推动互联网产业发展和基础设施标准化、产业化进程，在中国通信标准化协会指导下，以开放、合作、创新、共赢为宗旨，围绕服务器、数据中心设施、网络、新技术与测试、边缘计算、智能监控与管理等内容，打造活跃、高效、有国际竞争力的生态圈和开放平台，推动形成行业统一、有国际影响力的规范和标准，促进产业合作、技术创新和推广应用。

ODCC 由决策委员会、顾问、行政办公室和工作组组成。现有六个工作组，分别为服务器工作组、数据中心工作组、新技术与测试工

作组、网络工作组、边缘计算工作组和智能监控与管理工作组。

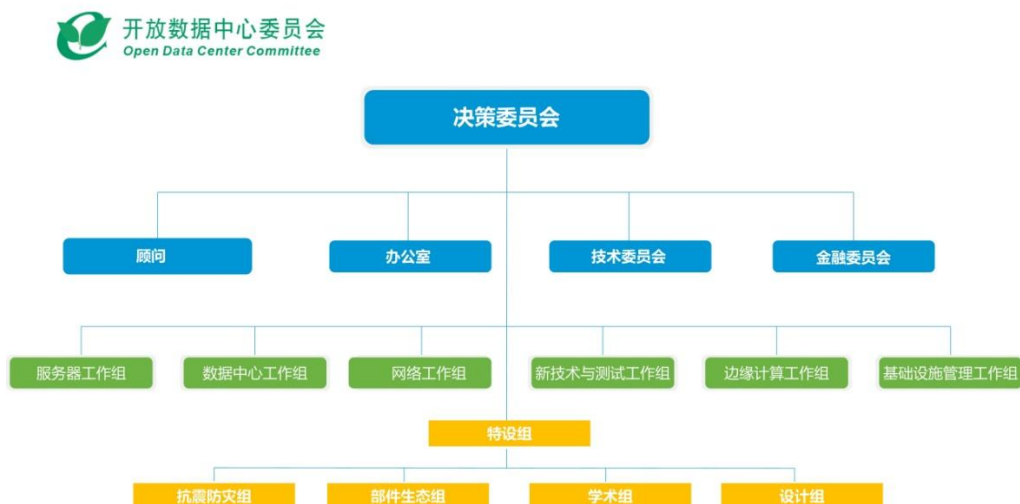


图 2-5 ODCC 决策委员会结构

服务器工作组：最新技术研究，涵盖服务器供配电、机柜、散热、监控等方面技术；整机柜服务器、边缘服务器、AI 服务器、GPU 服务器等典型形态；服务器能源效率；各种应用场景下的服务器软硬件平台等，产出白皮书、技术规范、研究报告等。

数据中心工作组：主要工作内容为微模块，预模块、电力模块及监控模块数据中心等。据统计，我国已经有超过 40 万个数据中心，而在这高速发展的背后，我国数据中心建设正面临着数量多、规模小、等级低、能耗高等问题，数据中心迫切需要变革，向标准化、产业化发展。在开放数据中心委员会（ODCC）的主要原则就是开放和分享，不做技术壁垒，以用户的实际需要出发，共同研发，在原有技术的基础上进行大胆突破，形成标准化应用，提高应用效率。

新技术与测试工作组：对数据中心尖端和预研技术展开研究，并在国内与国际同步推进新技术的探讨；建立完整的数据中心测试评估

体系，包括数据中心各类设备和系统的软硬件平台，以及一体化能力（绿色节能、服务能力、安全可靠等）的评测体系；推动标准研制，形成技术规范、研究报告、最佳实践、白皮书等成果。

网络工作组：技术与产品研究，范围涵盖数据中心网络架构、数据中心互联、数据中心网络软硬件系统、应用场景等，形成研究报告、技术规范、白皮书等成果，推动标准研制。

边缘计算工作组：研究边缘计算及其基础设施的技术，促进边缘计算在数据中心领域的技术研发和应用落地；推动相关标准研制，并完成相应白皮书、研究报告和案例分析。

智能监控与管理工作组：智能监控与管理技术研究，实现关键运营数据的标准化收集和智能化感知，构建更敏捷，更高效的运营流程；探索服务器、网络与风火水电的协同，征集实践案例，完成相关白皮书以及研究报告，推进相关标准研制。

目前 ODCC 已有决策成员 8 家：百度、阿里巴巴、腾讯、中国电信、中国移动和中国信息通信研究院、京东、美团；用户成员 3 家快手、赛尔网络、网易；供应商成员 80 余家。

ODCC 定期举办全会、工作组会议、沙龙和研讨会，每年举办开放数据中心峰会，吸引 8000 余人、40 多家媒体前来参会。ODCC 目前已累计发布 150 余项成果，对数据中心产业发展起到了积极的引领和推动作用，已成为数据中心产业发展风向标。

2020 年 9 月 15-16 日，由开放数据中心委员会主办的 2021 开放数据中心峰会”在北京召开。发布了《COCI 方升技术规范项目》、《OTII

IU 服务器项目》、《数据中心监控&自控系统技术白皮书》、《边缘计算架构及特征研究》、《基于边缘平台的虚拟企业网关（vCPE）研究》、《开放拥塞控制 Open CC 测试规范》、《开放拥塞控制 Open CC 技术白皮书》、《支持大数据存算分离架构的分布式存储系统测试方法》、《数据中心浸没式液冷服务器白皮书》等 50 余项技术规范。

2021 年 09 月 15 日由开放数据中心委员会（ODCC）主办，腾讯、阿里巴巴、百度、中国电信、中国移动、中国信息通信研究院、美团、京东等单位承办的开放数据中心峰会（ODCC 2021）在北京国际会议中心隆重举行。大会提出进一步加快数据中心绿色低碳发展，提高数据中心算力算效水平，优化数据中心智能化运营能力，增强数据中心可靠性和服务能力的行动纲领，并公布了 DC-Tech 数据中心低碳等级、低碳产品与解决方案、绿色等级、零碳、服务能力等级、智能化运营等级、可靠性等级、算力等级评估结果，以及 ODCC 2021“闪耀之选”的评估结果。

（二）结语

纵观整个开源项目的思路，让人不得不想到开源（Open Source）和解构（Dis-aggregation）两个关键理念，开源和解构以最纯粹的产业链水平分割模式，实现了价值转移。帮助参与的众多公司实现了技术分享和风险分摊：大家使用同样设备的巨大采购量带来了资本支出的降低；集体分享使用经验和各种管理工具又带来了运营支出的减少。开源的背后看似一切美好，但也存在着一些利益之争。像思科和 Juniper 这样的传统网络领导者可能会面临很大的收入压力，因为专

有业务的增值将越来越少。随着创建和部署解决方案的成本降低，运营商也想在网络中使用开源来降低成本，并扩展下一代网络。

由于美国对计算机技术进行研究的时间较久，同时大多数最先进地技术也被美国所把控，上述六个开源组织除 ODCC 是中国主导外，其他这些组织都在美国，而几乎所有开源许可证和代码托管平台也都由美国的学术界和工业界主导。

而中国开源目前处于高速发展阶段。中国本土开源代码托管平台崛起，以 Gitee、CODE CHINA、Trustie 为代表与国际知名开源社区、开源企业及开源基金会对接合作，大力发展中国开源项目建设，在新一代操作系统、分布式数据库、新一代人工智能框架等领域奋起直追，部分指标已经能够达到国际前沿的水平。近年来我国开源企业及开发者逐渐深入深度信息技术领域的创新，涌现出如 OpenHarmony（鸿蒙）、OpenEuler、PaddlePaddle、TiDB 等非常优秀的开源项目，在未来将迎来更大的发展空间。

中国开源技术的发展，围绕中国市场的特点和当前技术发展，正在形成一些热点的产业生态，如以芯片和操作系统为主的深度信息技术生态、多家开源数据库的创新生态、工业软件升级的工业互联网开源生态以及最热门的包括人脸识别、自动驾驶在内的人工智能生态、中间件和云计算大数据产业生态等。

三、 开源协议发展情况

开源协议，又称“较宽松公共许可证”或者“函数库公共许可证”，开源协议需要遵照开源定义十项要求，要求包括完全自由，公开，中立，不得歧视等等。依照开源协议开发的软件即为“开源软件”，别名“自由软件”，这些软件也就有了可以任意分发，群体贡献等特质。开源协议常常会规定其对应软件的“公共版权”（Copyleft），与常见的版权（Copyright）相反，以此推广其自由。在进行软件开发时，如决定作为开源发布，则可以在合规的协议中选择一个，而如果运用了他人的代码进行开发，则需要使用他人代码的开源协议。

开源协议是自由的，但并不意味着其软件也必须自由，开发者有权在协议的允许下将开源的代码用于闭源软件的开发。就算不可变为私有，开源协议依然全部允许软件的发售。

（一）GNU

GNU 通用公共许可协议是被广泛使用的自由软件许可证，给予了终端用户运行、学习、共享和修改软件的自由。许可证最初由自由软件基金会的理查德·斯托曼为 GNU 项目所撰写，并授予计算机程序的用户自由软件定义（The Free Software Definition）的权利。GPL 是一个 Copyleft 许可证，这意味着只要项目的某个部分（如动态链接库）以 GPL 发布，则整个项目以及派生作品只能以相同的许可条款分发。这与宽松自由软件许可证有所区别，如 BSD 许可证和 MIT 许可证就是其中被广泛使用的例子。GPL 是第一个普遍使用的 Copyleft 许可证。

历史上,GPL 许可证系列一直是自由和开源软件领域最受欢迎的软件许可之一。根据 GPL 许可的优异自由软件程序的例子有 Linux 内核和 GNU 编译器集合 (GCC)。大卫·A·惠勒认为,GPL 提供的 Copyleft 对于基于 Linux 的系统的成功至关重要,给予向内核贡献的程序员保证他们的工作将有益于整个世界并保持自由,而不至于被不提供反馈给社群的无良软件公司所剥削。

2007 年,发布了第三版许可证 (GNU GPLv3),以解决在长期使用期间发现的第二版 (GNU GPLv2) 所发生的一些困扰。为了使许可证保持最新状态,GPL 许可证包含一个可选的“并延伸到未来版本”条款,允许用户在 FSF 更新的原始条款或新版本之间进行选择。有些开发人员在软件许可使用时,选择省略它;例如, Linux 内核已经在 GPLv2 下获得许可,就不需包括“并延伸到未来版本”的声明。

GPL 授予程序接受人以下权利:

- 基于任何目的,按你的意愿运行软件的自由 (自由之零)。
- 学习软件如何工作的自由,按你的意愿修改软件以符合你的计算的自由 (自由之一)。可访问源代码是此项自由的先决条件。
- 分发软件副本的自由,因此你可以帮助你的好友 (自由之二)。
- 将你修改过的软件版本再分发给其他人的自由 (自由之三)。

这样可以让整个社区有机会共享你对软件的改动。可访问源代码是此项自由的先决条件。

(二) BSD

伯克利软件包是一个派生自 Unix（类 Unix）的操作系统，1970 年代由伯克利加州大学的学生比尔·乔伊开创，也被用来代表其派生出的各种包。

BSD 许可证非常地宽松，因此 BSD 常被当作工作站级别的 Unix 系统，许多 1980 年代成立的计算机公司都从 BSD 中获益，比较著名的例子如 DEC 的 Ultrix，以及 Sun 公司的 SunOS。1990 年代，BSD 大幅度被 System V 4.x 版以及 OSF/1 系统所取代，但其开源版本被用在互联网的开发。

最初的 Unix 包源自 1970 年代的贝尔实验室，操作系统中包含源码，这样研究人员以及大学都可以参与修改扩展。1974 年，第一个伯克利的 Unix 系统被安装在 PDP-11 机器上，计算机科学系而后将其用作扩展研究。

其他大学开始对伯克利的软件感兴趣，在 1977 年，伯克利的研究生比尔·乔伊将程序整理到磁带上，作为 First Berkeley Software Distribution (1BSD) 发行。1BSD 被作为第六版 Unix 系列，而不是单独的操作系统。主要程序包括 Pascal 编译器，以及比尔·乔伊的 ex 行编辑器。

(三) Apache

Apache 许可证是一个由 Apache 软件基金会发布的自由软件许可证，最初为 Apache http 服务器而撰写。Apache 许可证要求被授权者保留著作权和放弃权利的声明，但它不是一个反著作权的许可证。

此许可证最新版本为“版本 2”，于 2004 年 1 月发布。

Apache 许可证在 Apache 社区内外被广泛使用。Apache 基金会下属所有项目都使用 Apache 许可证，许多非 Apache 基金会项目也使用了 Apache 许可证：据统计，截至 2012 年 10 月，在 sourceforge 上有 8708 个项目使用了 Apache 许可证。

Apache 许可证是宽容的，因为它不会强制派生和修改产物使用相同的许可证进行发布（与一些著作权许可证不同，参见比较）。但它仍然要求对所有未修改的部分应用相同的许可证，并且在每个许可文件中，必须保留再分发代码中的任何原始著作权，专利，商标和归属通知（不需要包括任何部分的派生作品）；并且在每个更改的许可文件中，都必须添加一条通知，说明对该文件进行了更改。

如果声明文本文件作为原始作品发布的一部分包含在内，则派生作品必须在包含该通知文本文件的可读副本，可以是文档或显示在软件中。

声明文件的内容不会修改许可证，因为它们仅用于提供信息，并且可以在许可证文本中添加更多属性声明，前提是这些声明不能被理解为修改许可证。修改可能有适当的著作权声明，并可能为修改提供不同的许可条款。

除非另有明确规定，否则许可证持有者向授权者提交的任何文稿将根据许可证的条款进行，没有任何条款和条件，但这并不排除与授权者有关的这些贡献有单独的协议。

(四) MIT

MIT 许可协议之名源自麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT), 又称“X 许可协议”(X License) 或“X11 许可协议”(X11 License); MIT 内容与三条款 BSD 许可协议(3-clause BSD license) 内容颇为近似, 但是赋予软件被许可人更大的权利与更少的限制。

有许多团体均采用 MIT 许可证。例如著名的 SSH 连线软件 PuTTY 与 X 窗口系统。Expat、Mono 开发平台库、Ruby on Rails、Lua 等等也都采用 MIT 许可协议。

使用 MIT 许可证的一个显著好处就是两头兼顾, 有的开发者认为 GNU GPL 的许可过于自由, 而另一些开发者则认为所有软件最终都应该成为专有软件。由于 MIT 许可的开放语言, 它既适用于社区开发人员, 也适合希望生产专有软件的团队。

(五) 木兰

木兰协议是我国首个开源协议, 这一开源协议共有五个主要方面, 涉及授予版权许可、授予专利许可、无商标许可、分发限制和免责声明与责任限制。在版权许可方面, 木兰协议允许“每个‘贡献者’根据’本许可证‘授予您永久性的、全球性的、免费的、非独占的、不可撤销的版权许可, 您可以复制、使用、修改、分发其‘贡献’, 不论修改与否。”木兰协议比 Apache License 更友好一些, Apache License 要求列出每个修改文件, 其实很多项目做不到这一点, 所以 Mulan PSL 直接取消了这项要求。

(六) 结语

各类协议均满足开源的基本要求，即可传播，可修改，可商用，不得限制等，另外所有协议都明确说明不负责。但各类协议尚有区别。

Apache、MIT、BSD、木兰均可以在修改代码的条件下从开源修改为闭源，但是 GNU 下的 GPL 不允许。因此如果需要发布闭源程序，就需要避免 GPL 协议的使用。

MIT 有着极为自由的特征，更注重代码本身的发展，在修改之后无需提供版权说明，而且还可以在修改后的代码以作者的名字来促销。所以对应的，如果希望自己的成果得到关注和著名，MIT 协议可能不是很适合。

与之相比，BSD 许可证不允许用作者的名字做商业用途，而 Apache 需要在每一个修改之后提供版权的说明。如果希望能够比较简单地进行开发，不写许多日志，还是避免 Apache 为好。

木兰作为国产的协议，与 Apache 对比来说，更加自由一些，它不要求对每个修改都提供版权说明。同时木兰切实解决了一项法律问题，即授权导致的互诉漏洞：若 A 用开源协议授权了 C，而又想关于自己的产品起诉 B，则 C 也可以去起诉 B。木兰对条款的规定使得这个问题不复存在。

开源协议是当今开放和合作趋势的展现和成果之一，开源是为了让众人站在前面巨人肩上的运动，而开源协议是这项运动的证明和保证。

四、 网络领域重点开源项目

网络的架构随着业务的需求变化在不断进行演进。SDN 作为未来网络最有潜力的一种网络体系架构，针对当前互联网不可管、不可控、路由体制臃肿、QoS 难以保证、新业务难以开展、新技术新思想难以试验等问题提出一套整体的解决思路。根据 SDN 理念和网络相关领域的发展，网络现有组织架构可以被分为负责进行数据包转发的数据平面，负责控制转发行为的控制平面以及负责更新和管理计算资源的编排平面。接下来从这三个方面对网络领域重点开源项目进行介绍。

（一）数据平面

网络中的数据平面负责数据包的处理、转发等工作。其核心设备为交换机，可以是物理交换机，也可以是虚拟交换机。不同于传统网络转发设备，应用于 SDN 中的转发设备将数据平面与控制平面完全解耦，所有数据包的控制策略由远端的控制器通过南向接口协议下发，网络的配置管理同样也由控制器完成，这大大提高了网络管控的效率。交换设备只保留数据平面，专注于数据包的高速转发，降低了交换设备的复杂度。

1. Open vSwitch

Open vSwitch (OVS) 是一个高质量的，多层虚拟交换机，其目的是让大规模网络自动化可以通过编程扩展，同时仍然支持标准的管理接口和协议。Open vSwitch 非常适合在虚拟机环境中用作虚拟交换机。除了将多种标准控制和可视化接口展示给虚拟网络层外，它还支

持多物理服务器分布。Open vSwitch 支持多种基于 Linux 的虚拟化技术，包括 Xen/XenServer, KVM 以及 VirtualBox。Open vSwitch 也可以以性能为代价，完全在用户空间执行无需 Linux 内核模块的帮助。

OVS 大部分代码是用平台无关的 C 编写的并且很容易移植到其他环境，当前版本的 Open vSwitch 支持以下功能：

- 具有中继和接入端口的标准 802.1Q VLAN 模式
- 在上游交换机可绑定 LACP 的 NIC
- NetFlow, sFlow (R), 镜像增加可见性
- QoS 配置及监控
- Geneve, GRE, VXLAN, STT 以及 LISP 隧道
- 802.1ag 连接错误管理
- OpenFlow1.0 及大量扩展
- 绑定 C 和 Python 的事务配置数据库
- 使用 Linux 内核模块的高性能转发

OVS 包含的主要模块和特性有：

- ovs-vswitchd 实现 switch 的主要模块，包括一个支持流交换的 linux 内核模块。
- ovsdb-server 轻量级数据服务器供 ovs-vswitchd 查询并获取配置信息。
- ovs-brcompatd 让 ovs-vSwitch 替换 Linux bridge，包括获取 bridge ioctls 的 Linux 内核模块。

- `ovs-dpctl` 用来配置 `switch` 内核模块。
- 一些脚本和说明书辅助 OVS 安装在 Citrix XenServer 上，作为默认 `switch` 并附带有一些额外的功能。
- `ovs-vsctl` 查询和更新 `ovs-vswitchd` 的配置。
- `ovs-appctl` 发送命令消息，运行相关后台程序。

此外，OVS 也提供了支持 OpenFlow 的特性实现，包括 `ovs-openflowd` 一个简单的 OpenFlow 交换机。

- `ovs-openflowd`，一个简单的 OpenFlow 交换机。
- `ovs-testcontroller` 一个简单的 OpenFlow 控制器，主要用于测试。
- `ovs-ofctl` 用于查询和控制 OpenFlow 交换机和控制器。
- `ovs-pki` 为 OpenFlow 交换机创建和管理公钥框架。
- `ovs-tcpundump` 为 `tcpdump` 的补丁，用于解析 OpenFlow 的消息。

Open vSwitch 工作流程如图 4-1 所示：

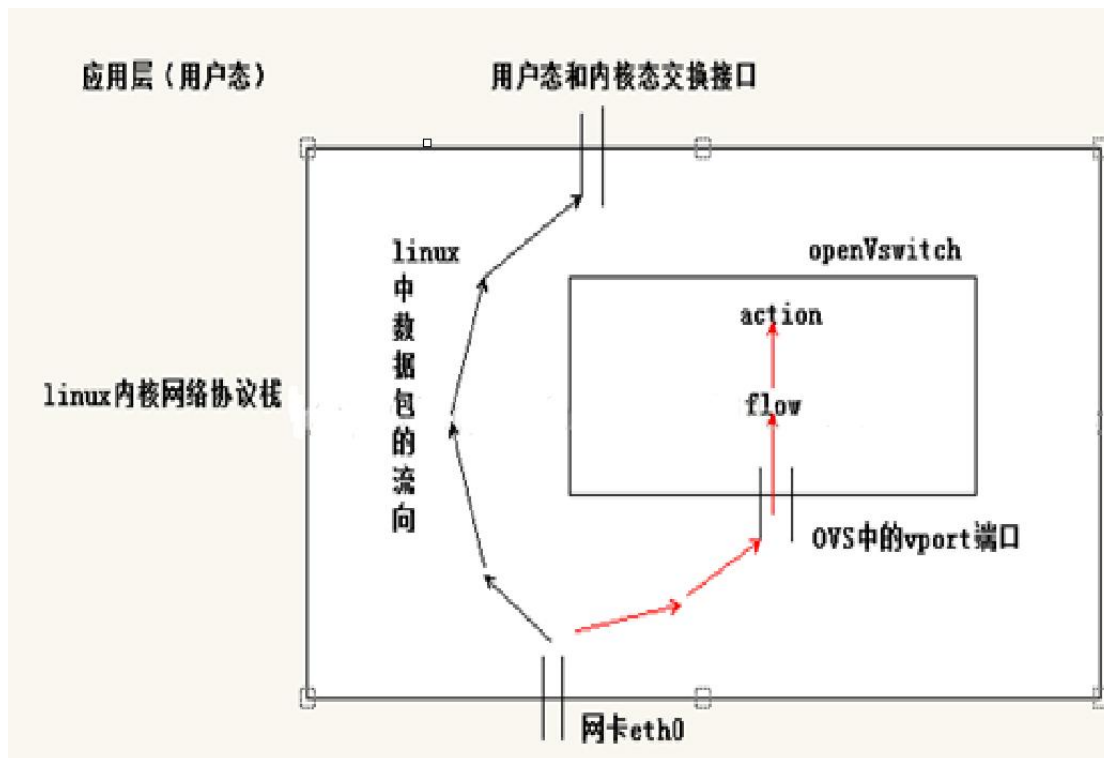


图 4-1 OVS 的工作流程

一般的数据包在 linux 网络协议栈中的流向为黑色箭头流向：从网卡上接受到数据包后层层往上分析，最后离开内核态，把数据传送到用户态。当然也有些数据包只是在内核网络协议栈中操作，然后再从某个网卡发出去。

但当其中有 OVS 时，数据包的流向就不一样了。首先是创建一个网桥：`ovs-vsctl add-br br0`；然后是绑定某个网卡：`ovs-vsctl add-port br0 eth0`；这里默认为绑定了 eth0 网卡。数据包的流向是从网卡 eth0 上然后到 open vSwitch 的端口 vport 上进入 open vSwitch 中，然后根据 key 值进行流表的匹配。如果匹配成功，则根据流表中对应的 action 找到其对应的操作方法，完成相应的动作（这个动作有可能是把一个请求变成应答，也有可能是直接丢弃，也可以自己设计自己的 action）；如果匹配不成功，则执行默认的动作，有可能是放回内核网络协议栈

中去处理(在创建网桥时就会相应的创建一个端口连接内核协议栈)。

上述内容说明了大概的工作流程,在工作中一般可以在如下几处来修改内核代码以达到自己的目的:第一个是在 `datapath.c` 中的 `ovs_dp_process_received_packet(struct vport *p, struct sk_buff *skb)` 函数内添加相应的代码来达到自己的目的,因为对于每个数据包来说这个函数都会被调用;第二个就是自定义流表;第三个和第二个相关联的,是根据流表来设计自己的 `action`,完成自己想要的功能。

2. DPDK

DPDK (Data Plane Development Kit), 是一组快速处理数据包的开发平台及接口。其产生的背景就是证明 IA (Intel Architecture) 多核处理器能够支撑高性能数据包处理的证明。在多核以前,软件依靠 CPU 频率提升而获得更高性能,软件性能会随着处理器的频率升高,即使软件不做改动,性能也会跟着上一个台阶。但这样的逻辑进入多核时代已无法实现。在过去的 10 年里,服务器平台的处理器核心数目扩展了很多,强大的硬件平台为软件优化技术提供了有力的支持。另外,以太网接口技术也经历了飞速的发展。从早期主流的 10Mbit/s 与 100Mbit/s,发展到 1Gbit/s。到如今,10Gbit/s 网卡技术成为数据中心服务器的主流接口技术。而 CPU 的运行频率基本停留在 10 年前的水平,为了迎接超高速网络技术的挑战,软件也需要大幅度创新。于是,结合硬件技术的发展,DPDK 这个以软件优化为主的数据面技术产生了。

在早期 Linux 和服务器平台上,网络处理器无法实现,以 Venky

Venkastraen、Walter Gilmore、Mike Lynch 为核心的 Intel 团队开始了可行性研究，希望借助软件技术来实现，很快他们就取得了一定的技术突破，设计了运行在 Linux 用户态的网卡程序架构。传统上的网卡驱动程序运行在内核态，以中断方式来唤醒系统处理。在早期，外设访问速度远低于 CPU 的运行速度，所以中断方式十分有效，但随着技术的发展，大量的高速端口开始出现，I/O 速度超越 CPU 的运行速率，成为一个技术挑战。于是，用轮询来处理高速端口开始成为必然，这构成了 DPDK 运行的基础。此后，Intel 与 6wind 进行了合作，交由在法国的软件公司进行部分软件开发和测试，6wind 向 Intel 交付了早期的 DPDK 软件开发包。2011 年开始，6wind、Windriver、Tieto、Radisys 先后宣布了对 Intel DPDK 的商业服务支持。随着时间推移与行业的大幅度接受，2013 年 Intel 将 DPDK 这一软件以 BSD 开源方式分享在 Intel 的网站上，供开发者免费下载。2013 年 4 月，6wind 联合其他开发者成立 DPDK 开源社区，DPDK 开始走上开源的大道。

为了在 IA 多核处理器下实现高性能数据包，DPDK 使用了众多关键技术：

- 轮询，避免中断上下文切换的开销。
- 用户态驱动，这既规避了不必要的内存拷贝又避免了系统调用。
- 线程的调度仍然依赖内核，利用线程的 CPU 亲和绑定的方式，特定任务可以被指定只在某个核上工作，这可以避免线程在不同核间频繁切换。

- 降低访存开销，网络数据包处理是一种典型的 I/O 密集型工作负载，所以利用一些高效方法来减少访存的开销能够有效地提升性能。
- 利用 IA 新硬件技术，IA 的最新指令集以及其他新功能是 DPDK 提升数据包处理性能的源泉。

对于 DPDK 的整体框架，如图 4-2 所示的组织架构图展示了 DPDK 以基础软件库的形式，为上层应用的开发提供一个高性能的基础 I/O 开发包。

- 核心库 **Core Libs**，提供系统抽象、大页内存、缓存池、定时器及无锁环等基础组件。
- **PMD** 库，提供全用户态的驱动，以便通过轮询和线程绑定得到极高的网络吞吐，支持各种本地和虚拟的网卡。
- **Classify** 库，支持精确匹配 (**Exact Match**)、最长匹配 (**LPM**) 和通配符匹配 (**ACL**)，提供常用包处理的查表操作。
- **QoS** 库，提供网络服务质量相关组件，如限速 (**Meter**) 和调度 (**Sched**)。

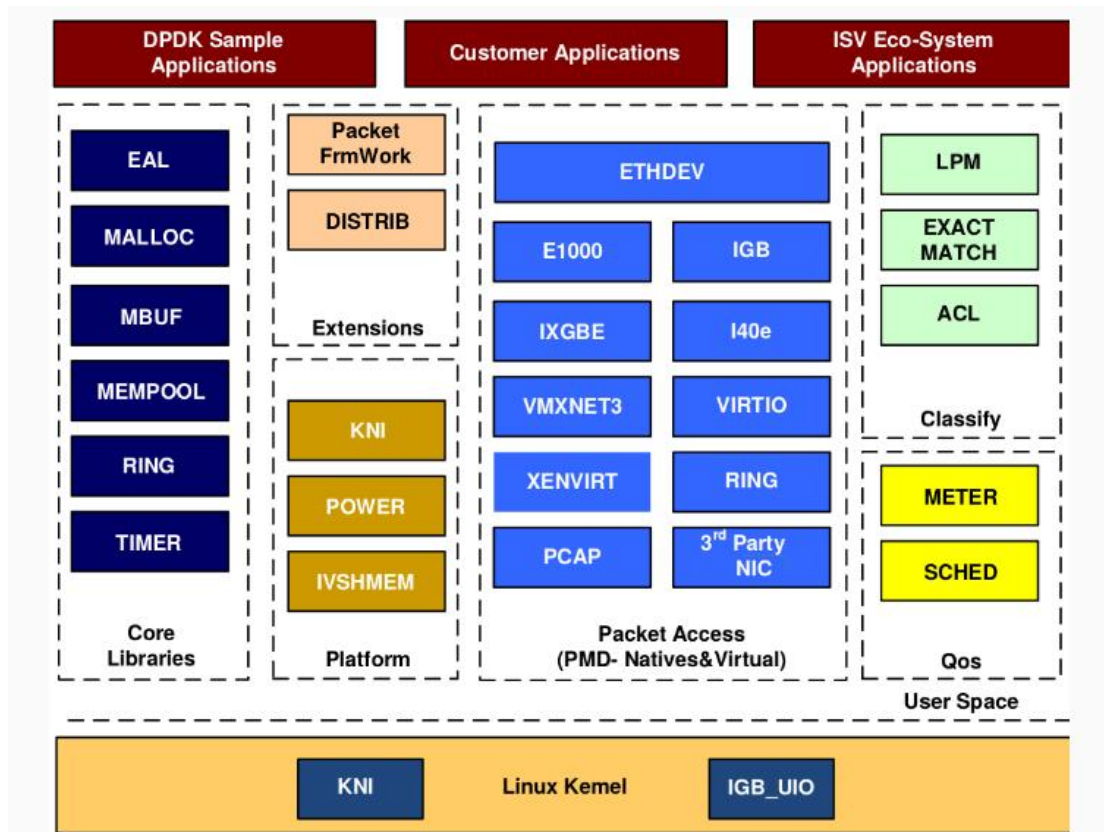


图 4-2 DPDK 架构图

总之，DPDK 将 IA 上数据包处理的性能提升到了一个新的高度，对于满足要求的场景下的网络业务软件化产生了积极的作用。它立足 IA 的 CPU 虚拟化技术和 IO 的虚拟化技术，对各种通道做持续优化改进的同时，也对虚拟交换的转发面进化做出积极贡献，加速了各种虚拟化的网络功能部署到现实的网络节点上。此外，随着发展，以应用为中心的趋势不断推动用户态协议栈的涌现，有些也将 DPDK 的一些优化想法加入到协议栈的优化中，取得了比较好的效果。可以说，由 DPDK 加速的用户态协议栈将会越来越多地支撑起计算节点上的网络服务

3. VPP

VPP (Vector Packet Processing) 平台是一个可扩展框架，能够提

供开箱即用的交换机/路由器功能。它是 Cisco 的 Vector Packet Processing (VPP) 技术的开源版本，从 2002 年被提出后发展至今，VPP 已经成为目前生产环境中运行的重要软转发设备。它运行在多种架构的用户空间上，包括 x86、ARM、以及 x86 服务器和嵌入式设备的 Power architectures 上。

VPP 采用一种模块化的设计。它读取来自网络 IO 层的最大可用数据分组矢量 (vector of packets)，再通过一个分组处理图形 (Packet Processing graph) 进行处理。对于这种模块化的设计还需注意的一点是，VPP 对于分组的处理顺序不是一个分组通过整个图形后再将第二个分组通过图形，而是在一个图形节点处理了矢量里全部的分组后，再移动到下一个图形节点处理。这是因为矢量中的第一个分组使指令高速缓冲存储器做好了准备活动，剩余的分组也就能在极速性能中被处理，这使得处理矢量中分组的固定成本能够被整个矢量分摊，不仅能导致非常高的性能，而且是统计可靠的。如果 VPP 落后了一点点，那么下一个分组矢量将包含更多的分组，因此固定的成本能够被更多数目的分组分摊，这就降低了每个分组的平均处理成本，使得系统能够赶上步伐。如果多核是可用的，那么这个图形调度程序能够调度矢量和图形节点给不同的核。

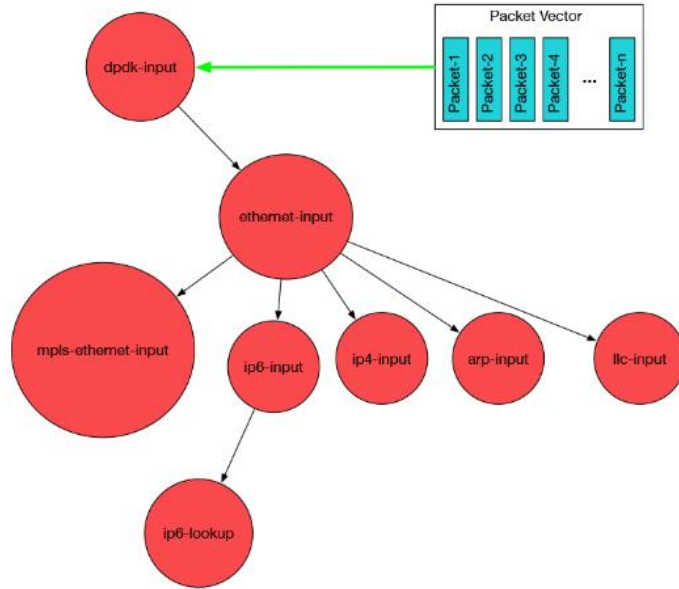


图 4-3 VPP 分组处理流程图

VPP 是可扩展的。这种图形节点的模块化架构也能帮助 VPP 更方便的扩展。只需要分离于源代码库为 VPP 建立一个独立的二进制插件，将该插件从插件目录中加载，就能重新排列分组图形和引进新的图形节点。该方式允许了新的功能通过插件引进，而不需要去修改核心基础设施的代码。

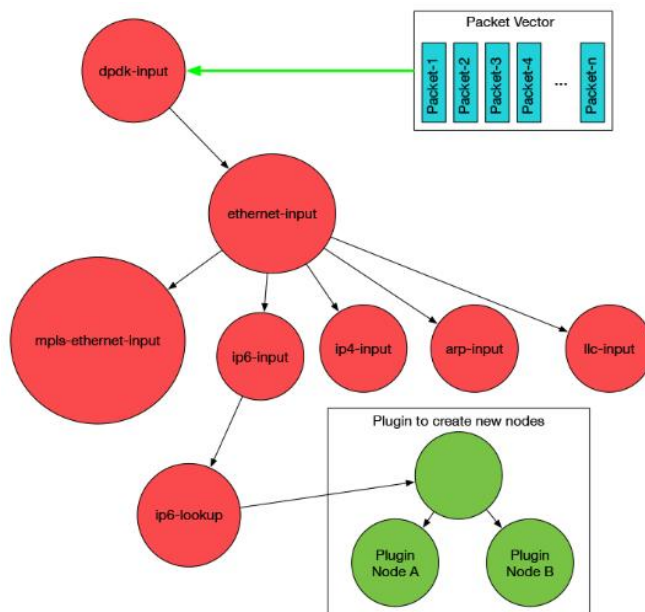


图 4-4 为分组处理流程创建插件

VPP 还是可编程的。它提供了高性能的底层 API，API 通过共享内存的消息总线工作，沿着总线传递的消息被指定为能够用来创建 C 客户端库和 Java 客户端库的一个简单的接口定义语言，这也有可能为绑定其他编程语言提供了未来支持。这些客户端库使编写控制 VPP 的外部应用变得非常容易。共享内存消息总线的方式也有着非常高的性能。所以这种方法为本地可编程提供了一个完整的、功能丰富的解决方案，简单而高效。至于远程编程，可以通过高级 API 使用数据平面管理代理。数据平面管理代理通过底层 API 与 VPP 应用进行交流，这可以在一个盒子（或者 VM 或者容器）中进行本地的运行。而同时盒子（或容器）也将通过某种形式的结合暴露更高层次的 API 供远程编程使用。

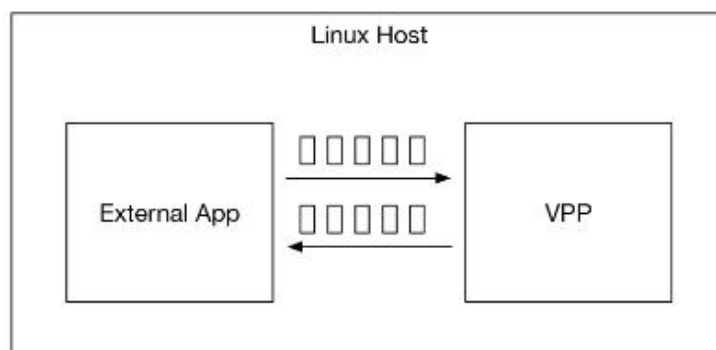


图 4-5 本地使用 VPP 编程

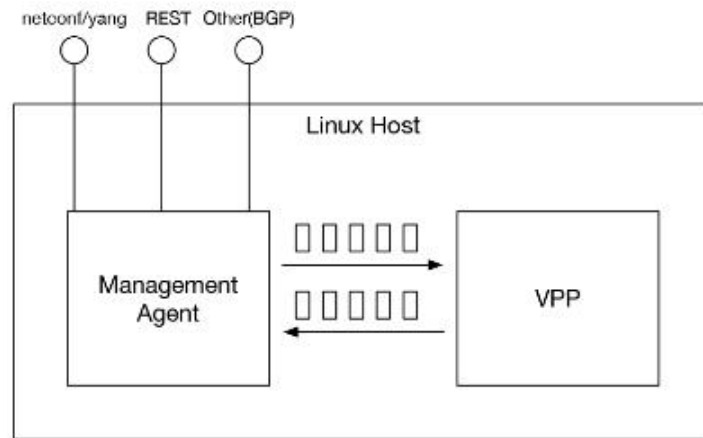


图 4-6 远程使用 VPP 编程

经过几年的发展，目前，VPP 技术可被用来与 DPDK 相结合，共同为优化数据包处理的性能做着积极的贡献，为 NFV 数据平面的加速提供了有力的支撑。

4. P4

P4 (Programming Protocol-Independent Packet Processors) 是 2015 年由斯坦福大学 Nick McKeown 教授、普林斯顿大学 Jennifer Rexford 教授、Google、Intel、微软和 Barefoot Networks 等共同发起创立的对网络数据平面处理逻辑进行描述与编程的开源项目，同时 P4 也是对底层设备数据处理行为进行编程的高级语言。使用者可以直接使用 P4 语言编写网络应用，经编译器编译后，使底层设备按照用户的意图完成相应的功能需求。P4 开源社区现已超过 60 个成员，正在开发各种新的网络功能与应用，并且基于可编程语言可灵活定义交换机内部数据报文处理过程，可为网络设计者提供自上而下的完整网络设计处理流程。

截至目前，P4 语言分为 P4 14 和 P4 16 两大版本。其中，2017

年 5 月 P4 社区 (p4.org) 发布的 P4 16 语言是当前 P4 语言的最新版本。一个 P4 16 结构文件应包含类型声明, 常量声明以及用户需要的控制和解析模块的说明。有些数据包处理任务无法在 P4 中表达, P4 16 支持外部功能或方法来解决这个问题, 即在 P4 之外实现计算功能, 可以从 P4 程序中调用。和 P4 14 相比, P4 16 的语言风格发生了较大的变化, 它在整体语言风格上向 C++ 语言进行了借鉴和学习。此外, P4 16 允许程序在任意目标上执行, 对于执行的包处理类型和自定义功能的目标, P4 16 都提供了表达的语言机制。P4 语言的开源项目都托管在 GitHub 中, 在 p4lang 组织的仓库中还有很多开源项目。

P4 应用场景及发展重点是实现服务器功能卸载、实现网络新功能。例如, 可以使用 P4 降低主机侧负载, 并在 SmartNIC 上实现 5G 网络协议; 使用 P4 帮助 OpenFlow 控制器向 NIC 和交换机推送安全策略; 对于虚拟应用, 使用 P4 降低 NFV 系统宿主 VNF 功能负载和增强 VNF 功能。2017 年 11 月, 在新加坡举行的 IETF 100 上, Barefoot Networks 和思科使用 Barefoot 的 6.5Tb/s Tofino 交换机和 FD.io VPP 展示了 IOAM 的实现方式。2018 年 3 月 5 日, 赛灵思公司联合 Barefoot 共同演示了可帮助网络运营商以纳秒级精细粒度对每个数据包实现可视性的端到端网络性能监控解决方案。2018 年 12 月, Barefoot 推出了 Tofino 2 芯片, 实现了 12.8Tb/s 转发能力, 全面提高了网络交换机的性能, 推动了工业网络架构的发展。综上, P4 从 CPU 到高端的 ASIC 都有广泛的应用前景。

2019 年 4 月 9 日, ONF 宣布完成与 P4.org 的合并, 并主持所有

P4 的工作。同时，Stratum 和 COMAC 等项目也在谋求与 P4 的结合。在之后不久，Intel 收购了 Barefoot Networks，以加快其以太网交换机平台的交付速度，并宣布将开始生产 200Gb/s 和 400Gb/s 级别规格产品。2019 年 10 月，中国联通在实验室成功实现了基于 Tofino 交换机的面向 5G 核心网 CUPS 架构的 UPF 卸载方案。该方案专门为 5G 核心网 CUPS 架构定制，方案中采用了完全分离部署的处理模式，控制平面和用户平面均可以按需扩展，同时也提供灵活处理方式，既可以独立部署，也可以集成在 Fabric 中进行部署。目前，单个 UPF 节点最大可支持 3Tbps 的吞吐率，未来随着 PISA 架构交换机的发展，性能可以进一步提升，此外，诸如负载均衡，QoS，DPI 等相关的 L4-L7 功能也会相继引入。

5. FRR

FRR 是一个路由软件包，它为基于 TCP/IP 的路由服务提供路由协议支持，例如 BGP，RIP，OSPF，IS-IS 等(请参阅支持的协议与平台)。FRR 还支持特殊的 BGP 路由反射器和路由服务器行为。除了传统的 IPv4 路由协议，FRR 还支持 IPv6 路由协议。通过支持 AgentX 协议的 SNMP 守护程序，FRR 提供路由协议 MIB 只读访问(SNMP 支持)。

FRR 使用高级软件体系结构以提供高质量的多服务器路由引擎。FRR 具有用于每个路由协议的交互式用户界面，并支持常见的客户端命令。基于这种设计，可以轻松地将新的协议守护程序添加到 FRR。FRR 是根据 GNU 通用公共许可证发行的。

由于 FRR 开源项目是从 Quagga(另一个适用于 Linux 的路由协议套件)派生而来的，因此 FRR 继承了属于 Quagga 的优点以及在此基础上进行了改进，有许多增强功能。

创建 FRR 的目的是提供整个数据中心的第三层连接，从脊椎交换机和叶交换机一直到主机，虚拟机和容器。它旨在简化路由协议栈。企业可以使用 FRR 将主机，虚拟机和容器连接到网络。FRR 提供简化的现代数据中心设计、子网的自由性和移动性、增强网络灵活性、使用 Anycast 进行无状态负载平衡。

FRR 可用于 Cumulus Networks NetQ 的连接性，以便在主机上启用 BGP 和 OSPF。NetQ 使用 FRR 作为其路由套件，与 Cumulus Networks 的其它软件一起工作，将容器广播到路由的结构中。该连接技术与 Docker Engine 和 FRR 协同工作，侦听 Docker Engine 事件流，并从 FRR 构建的路由结构中通告和撤回各个容器 IP 地址。

FRR 大大简化了自动化过程，简化了使用无编号接口的过程，从而简化了通过软件的寻址、连接和服务发布的过程，所有这些操作都无需手动配置复杂的协议。FRR 可以作为裸机应用程序部署，也可以在容器内部部署，以实现最大的部署灵活性。

(二) 控制平面

在 SDN 之前，网络控制平面与数据平面紧耦合，负责一些高层的、中心化的逻辑处理，这种紧耦合的方式带来管控效率低下、网络组织的僵化。SDN 管控技术旨在通过构建网络虚拟化层和智能化网络操作系统，在一张物理网络拓扑的情况下合理的划分虚网，并采用

有效的隔离机制，进而实现高效的网络管控与资源调度。其中的关键技术是 SDN 控制器。

1. ODL

OpenDaylight 项目在 2013 年初由 Linux 协会联合业内 18 家企业（包括 Cisco、Juniper、Broadcom 等多家传统网络的巨头公司）创立，旨在推出一个开源的通用 SDN 平台。OpenDaylight 项目的设计目标是降低网络运营的复杂度，扩展现有网络架构中硬件的生命期，同时还能够支持 SDN 新业务和新能力的创新。OpenDaylight 开源项目希望能够提供开放的北向 API，同时支持包括 OpenFlow 在内的多种南向接口协议，底层支持传统交换机和 OpenFlow 交换机。OpenDaylight 拥有一套模块化、可插拔且极为灵活的控制器，能够被部署在任何支持 Java 的平台上。目前，OpenDaylight 的基本版本已经实现了传统二、三层交换机的基本转发功能，并支持任意网络拓扑和最优路径转发。

OpenDaylight 使用模块化方式来实现控制器的功能和应用，其发布的“Hydrogen”版本总体架构如图 4-7 所示。在 OpenDaylight 总体架构中，南向接口通过插件的方式来支持多种协议，包括 OpenFlow1.0/1.3、BGP（Border Gateway Protocol，边界网关协议）等。服务抽象层（Service Abstraction Layer，SAL）一方面可以为模块和应用提供一致性的服务，另一方面支持多种南向协议，可以将来自上层的调用转换为适合底层网络设备的协议格式。在 SAL 之上，OpenDaylight 提供了网络服务的基本功能和拓展功能，基本网络服务

功能主要包括：拓扑管理、状态管理、交换机管理、主机监测以及最短路径转发等；拓展网络服务功能主要包括：DOVE（Distributed Overlay Virtual Ethernet，分布式覆盖虚拟以太网）管理、Affinity 服务（上层应用向控制器下发网络需求的 API）、流量重定向、LISP（Locator ID Separation Protocol，位置标识分离协议）服务、VTN（Virtual Tenant Network，虚拟租户网络）管理等。OpenDaylight 采用了 OSGi（Open Service Gateway Initiative，开放服务网关协议）体系结构，实现了众多网络功能的隔离，极大地增强了控制平面的可扩展性。

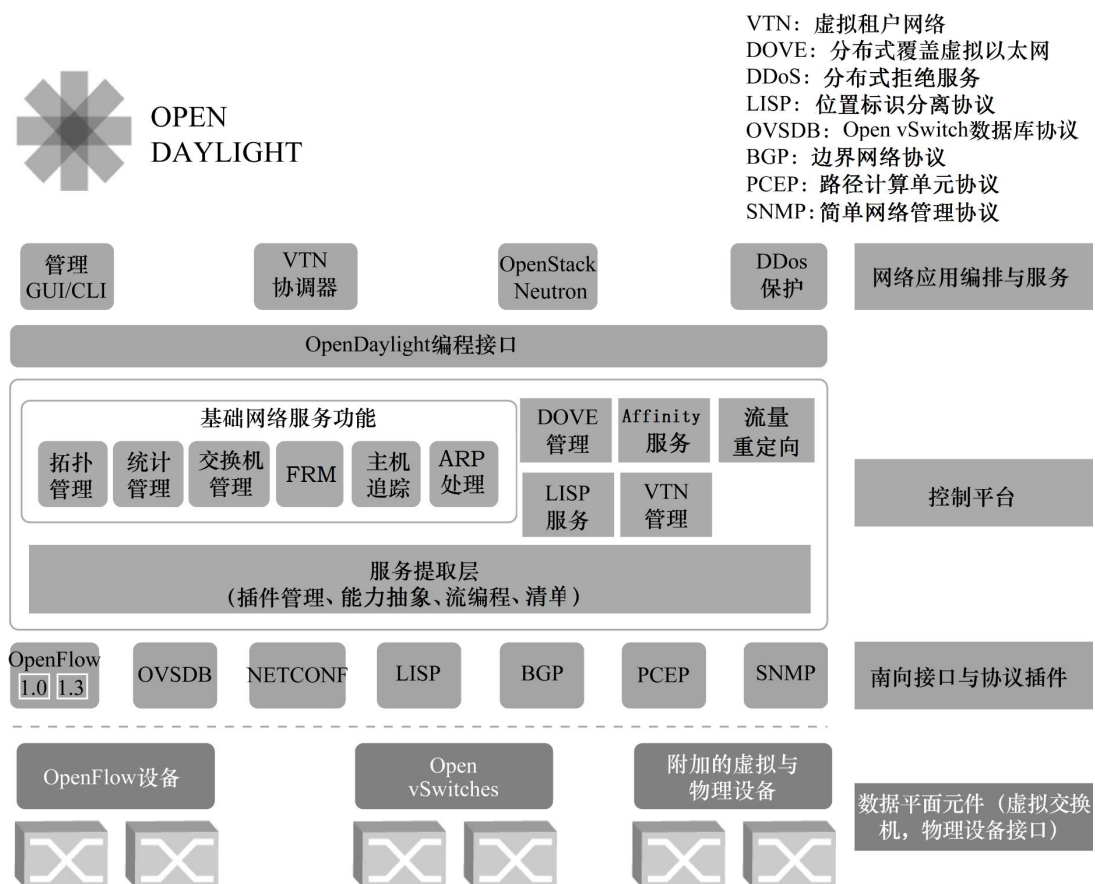


图 4-7 OpenDaylight 的系统总体架构

表 4-1 OpenDaylight 控制器模块功能

模块名	功能
SAL (服务抽象层)	控制器模块化设计的核心，支持多种南向协议，屏蔽了协议间差异，为上层模块和应用提供一致性的服务
Topology Manager (拓扑管理)	负责管理节点、连接、主机等信息，负责拓扑计算
Stats Manager (统计管理)	负责统计各种状态信息
Host Tracker (主机追踪)	负责追踪主机信息，记录主机的 IP 地址、MAC 地址、VLAN 以及连接交换机的节点和端口信息。该模块支持 ARP 请求发送及 ARP 消息监听，支持北向接口的主机创建、删除及查询
ForwardingRules Manager (FRM, 转发规则管理)	负责管理流规则的增加、删除、更新、查询等操作，并在内存数据库中维护所有安装到网络节点的流规则信息，当流规则发生变化时负责维护规则的一致性
Switch Manager (交换机管理)	负责维护网络中节点、节点连接器、接入点属性、三层配置、Span 配置、节点配置、网络设备标识
ARP Handler (ARP 处理器)	负责处理 ARP 报文

表 4-1 简单介绍了 OpenDaylight 控制器几个主要模块的功能。

服务抽象层（SAL）是整个控制器模块化设计的核心，它为上层控制模块屏蔽了各种南向接口协议的差异。SAL 框架如图 4-8 示，服务基于插件提供的特性来构建，上层服务请求被 SAL 映射到对应的插件，然后采用适合的南向接口协议与底层设备进行交互。各个插件之间相互独立并与 SAL 松耦合，SAL 支持上层不同的控制功能模块，包括拓扑服务(Topology Service)、数据分组服务(Data Packet Service)、流编程服务(Flow Programming Service)、统计服务(Statistics Service)、清单服务(Inventory Service)、资源服务(Resource Service)、连接服务(Connection Service)等。

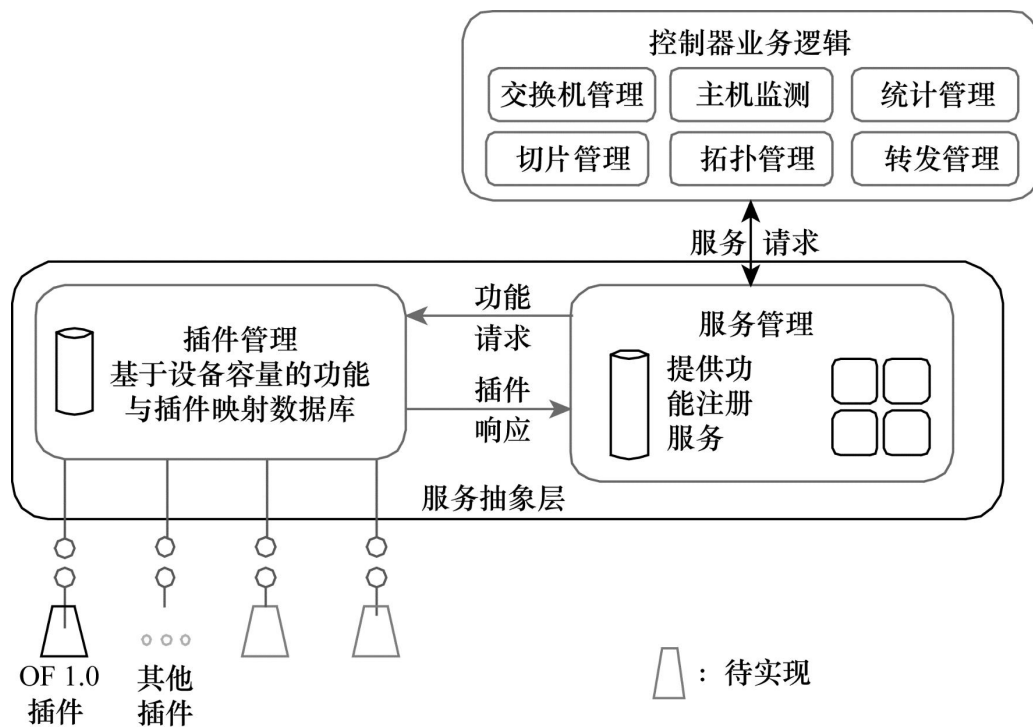


图 4-8 服务抽象层 (SAL) 系统框架

2. ONOS

ONOS 是 2014 年 12 月由 On.Lab 实验室主导开发的分布式开源控制器平台，其核心目标是打造一个满足运营商网络要求的开源网络

操作系统。2014年8月，On.Lab实验室在Sigcomm2014 HotSDN会议上发表了一篇名为《ONOS: Towards an Open, Distributed SDN OS》论文，论文中首次公开了ONOS作为一款具有高性能、分布式的SDN控制器的架构设计。ONOS的主要赞助商成员包括AT&T、Huawei、Cisco、Intel等多家企业，其赞助商成员和OpenDaylight项目具有很高的重复率。2015年4月22日，中国联通与ONOS开源组织签署战略合作意向书，成为国内首个加入ONOS组织的运营商。2015年12月7日，北京邮电大学FNL实验室正式加入ONOS项目，成为ONOS项目的国内首个高校成员。ONOS控制器的社区目前相对比较活跃，现正以每季度一个版本的速度进行更新。

ONOS目前支持包括OpenFlow在内的多种南向协议，同时提供开放的北向API，其分布式核心架构采用了多种分布式技术，在版本迭代过程中分别采用了Zookeeper、Hazelcast和Raft。自论文发布至今，ONOS版本更新的主要目的是提高性能，从而满足论文中1M(百万)/s流表项安装的要求。

ONOS采用Java语言进行开发，基于OSGi框架，使用Maven构建项目，支持新模块运行态加载和注销(模块的热插拔)，其控制器架构和其他控制器架构类似，大致可分为南向协议层、适配层、南向接口层、分布式核心层、北向接口层和应用层，其整体架构围绕分布式核心展开，如图4-9所示。

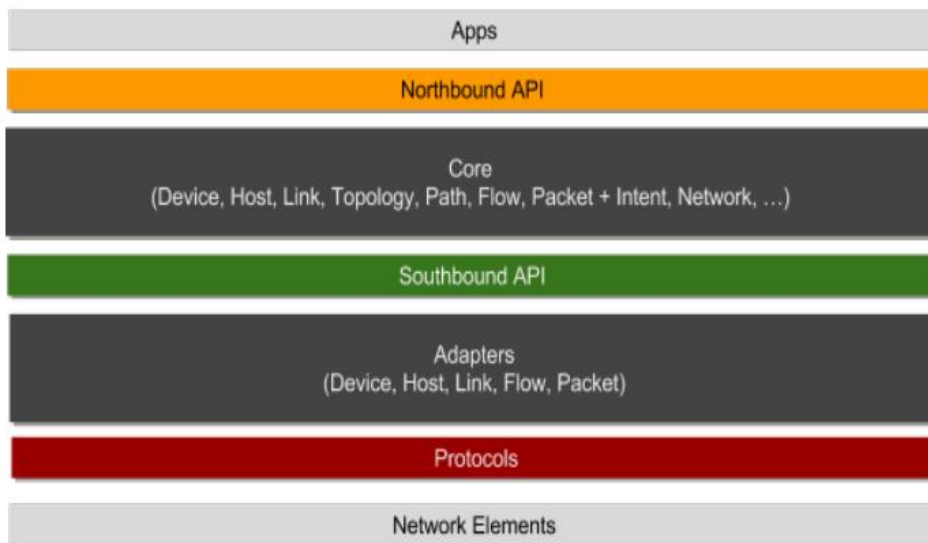


图 4-9 ONOS 架构示意图

其中，南向接口层支持以插件形式加入新的南向接口协议，从而支持多南向协议，从而支持 SDN 控制器对 SDN 交换机和传统网络交换机的统一管理，实现网络的平滑过渡。分布式核心层可实现分布式控制器的信息同步，其性能满足运营商对网络拓展性，可靠性和高性能的要求，从而实现电信级别 SDN 控制平面。北向接口层为应用层提供了网络全局视图接口等众多灵活的编程接口，使得应用层可调用接口完成应用开发，实现对网络的控制、管理和业务配置，满足运营商对 SDN 网络操作系统的要求。

另外，ONOS 系统架构中定义了服务和子系统两个基本概念。其中，服务 (Service) 是由多个组件形成的功能集，这些组件按照 ONOS 的架构层级创建一个垂直切片，而多个组件共同提供的服务就成为一个子系统 (Subsystem)。ONOS 总共定义了设备、链路、主机、拓扑、路径服务、流表规则和数据报文七个子系统，各子系统之间相互独立，各自管理各自的事务，却又是一个有机的整体，ONOS 子系统划分如

图 4-10 所示。

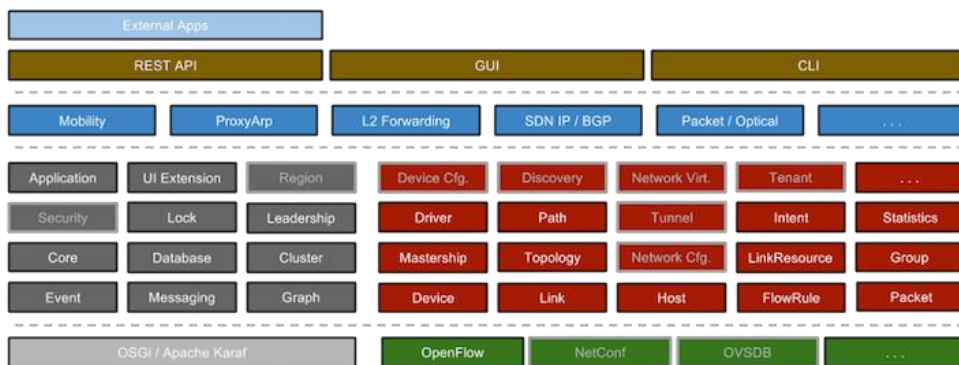


图 4-10 ONOS 子系统划分

ONOS 各子系统具体提供的主要服务功能如表 4-2:

表 4-2 ONOS 控制器子系统功能

子系统名	功能
Device (设备)	管理底层基础设备
Link (链路)	管理设备链路信息
Host (主机)	管理终端主机以及其所处网络位置信息
Topology (拓扑)	管理时序性网络拓扑视图
PathService (路径服务)	根据最新的网络拓扑视图计算出基础设备间或终端主机之间的路径
FlowRule (流表规则)	管理基础设施 match action 流规则并提供流的度量方法
Packet (数据报文)	允许应用监听来自网络设备的数据包并通过网络中的设备发送数据。

3. Floodlight

Floodlight 是一款基于 Java 语言的开源 SDN 控制器，遵循 Apache 2.0 软件许可，支持 OpenFlow 协议。Floodlight 的日常开发与维护工作主要由开源社区支持，其中包括很多来自 Big Switch Networks 公司的工程师，同时 Floodlight 也是该公司商业控制器产品的核心部分。Floodlight 作为免费的开源控制器提供了与商业版本相同的 API，使得开发者可以把 Floodlight 上的程序快速移植到商用版本的控制器上。

Floodlight 与 NOX、POX 等其他控制器类似，也使用了“层次化”架构来实现控制器的功能，同时提供了非常丰富的应用，可以直接在网络中部署数据转发、拓扑发现等基本功能。此外 Floodlight 还提供了友好的前端 Web 管理界面，用户可以通过管理界面查看连接的交换机信息、主机信息以及实时网络拓扑信息。Floodlight 通过向 OpenFlow 交换机下发流表等方式来实现数据分组转发决策，以达到对交换设备集中控制的目的。

Floodlight 整体架构由控制器核心功能以及运行其上的应用组成，应用和控制器之间可以通过 Java 接口或 REST API（Representational State Transfer API，表征状态转移 API）交互，整体架构如图 4-11 所示。

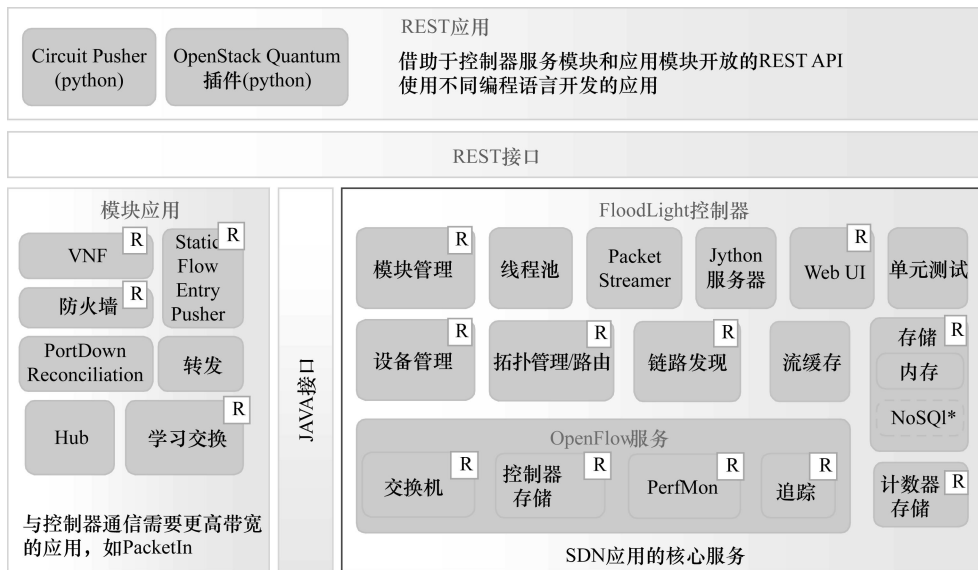


图 4-11 Floodlight 系统架构

Floodlight 使用模块框架实现控制器特性和应用，在功能上 Floodlight 可看作由控制器核心服务模块、普通应用模块和 REST 应用模块 3 部分构成：

- 核心服务模块为普通应用模块和 REST 应用模块提供 Java API 或 REST API 基础支撑服务；
- 普通应用模块依赖于核心服务模块，并为 REST 应用模块提供服务；
- REST 应用模块依赖核心服务模块和普通应用模块提供的 REST API, 这类应用只需调用 Floodlight 控制器提供的 REST API 就可以完成相应的功能，可使用任何编程语言进行灵活的开发，但受到 REST API 的限制，只能完成有限的功能。开发者可以使用系统提供的 API 创建应用，也可以添加自己开发的模块，并将 API 开放给其他开发者使用。这种模块化、分层次的部署方式实现了控制器的可扩展性。

通过表 4-3 对 Floodlight 控制器各模块进行介绍。

表 4-3 Floodlight 控制器组件功能

组件类型	组件名	功能
主要核心服务模块	FloodlightProvider	处理控制器和交换机连接以及 OF 消息分发的模块
	DeviceManagerImpl	管理网络中的主机等终端设备
主要核心服务模块	LinkDiscoveryManager	负责管理网络中的链路，发现交换机之间的连接关系
	TopologyService	维护拓扑信息
	RestApiServer	提供 REST API 服务
	ThreadPool	为其他模块分配线程的线程池
	MemoryStorageSource	提供数据存储及变更通知服务
	Flow Cache	流缓存，用于控制器记录所有有效的流，当事件被一个不同模块监听或者随时查询交换机时，流缓存就会更新，这样可以整合不同模块对流的更新和检索
普通应用模块	Packet Streamer	提供数据分组流服务，使用此项服务可以让任何交换机、控制器和观察者之间有选择地交换数据
	Firewall	通过检测 Packet-in 行为使得流在 OpenFlow 交换机上强制执行 ACL

	LearningSwitch	实现了一个普通交换机的二层转发功能
	VirtualNetworkFilter	实现在一个二层的域中建立多个逻辑的二层网络
	Forwarding	实现两个设备之间的数据分组转发
	PortDown Reconciliation	实现在端口关闭的时候处理网络中的流
REST 应用模块	Circuit Pusher	用于创建 2 台设备之间的虚链路
	OpenStack Quantum	支持 FloodlightOpenStack 的 Quantum 插件，用来管理网络

(三) 编排平面

网络中的编排指对服务器、存储设备、网络转发以及网络服务设备进行资源分配和排列，以满足用户或管理员的需求。传统网络的运营支撑系统（OSS）能够完成高层业务编排，但由于传统网络设备的封闭，OSS 只能进行一些简单的管理和操作，业务的最终交付和资源的调配还需要网络管理员手工完成。随着网络的作用从用户间通信发展到获取特定服务，网络流量大幅增加，业务形式越发多样化，传统设备封闭的编程能力和 OSS 受限的编排能力无法满足日渐增长的业务需求。

SDN/NFV 技术的出现和发展，填补了传统网络中网络资源开放性的不足，也为更大范围自动化的网络编排提供了可能。SDN 将传统网络设备中本地嵌入的控制逻辑提取到远端，并且提倡通过开放的

接口实现网络的可编程性，大大提高网络部署灵活性。NFV 技术侧重于 L4-L7 中网络服务的虚拟化，通过将网络功能从专用硬件中解耦出来，运行在通用服务器、通用存储和通用转发设备中，实现网络功能的灵活部署。

SDN/NFV 作为下一代网络的演进方向，已经得到了业界的广泛认可，随着 SDN/NFV 技术逐渐引入运营商网络，运营支撑系统 OSS 也需要变革，业务编排器如今被业界认为是运营支撑系统的演进版本，成为了下一代网络变革中的关键技术，其关键作用是使业务敏捷上线和网络高效运营。目前，各大运营商都在积极拥抱开源技术，开发自己的业务编排系统，迎接网络的变革。

1. ONAP

2017 年 2 月，AT&T 和中国移动宣布 ECOMP 平台和 Open-O 平台合并为开放式网络自动化平台(Open Network Automation Platform, ONAP), 是试图克服新软件和虚拟化技术带来的互操作性挑战而提出的重要开源计划之一。

ONAP 融合了 ECOMP 和 Open-O 的现有功能，它是一个为 VNF、SDN 网络以及构建在这两项基础设施之上的高级服务提供设计、创建、协调、监控和生命周期管理能力的软件平台，ONAP 还为这些功能提供了在动态实时云环境中自动化的、策略驱动的交互能力。ONAP 不仅是一个运行平台，它还可以运用图形化设计工具创建新的功能或服务。

ONAP 在 2017 年 11 月 16 日发布了首个版本，名为 Amsterdam。

这个版本着重支持三种网络功能和服务：虚拟防火墙(vFW)、虚拟客户端设备(vCPE)、在虚拟演进分组核心(vEPC)上运行的 LTE 语音服务。由于 ONAP 的首个版本主要精力集中于合并此前 ECOMP 和 OPEN-O 的大量代码，所以仍然缺乏在生产网络中使用所需的稳定性。但是，已经有大量的运营商和企业加入到 ONAP 中，并开始贡献力量。

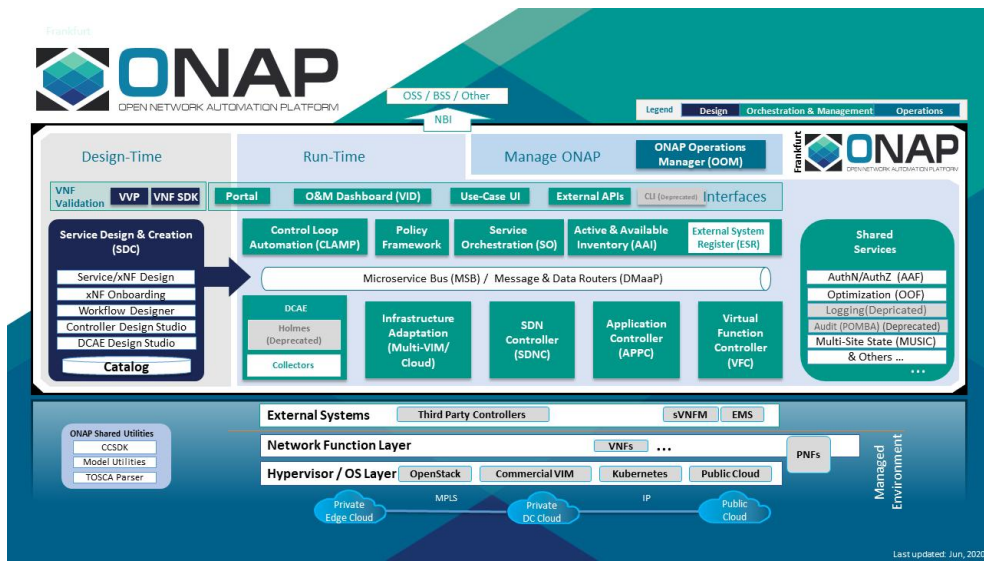


图 4-12 ONAP 平台架构(Frankfurt 版本)

ONAP 体系结构由设计时和运行时函数以及管理 ONAP 本身的函数组成。图 4-12 提供了 ONAP 体系结构及其基于微服务的平台组件的高级视图。

ONAP 的主要活动，即设计、部署和操作服务，是基于 ONAP 的两个主要框架，即设计时框架和运行时框架。为了设计、部署和操作服务并确保这些动态服务，ONAP 活动构建如下：

- 服务设计，服务设计是建立在一个健壮的设计框架，该框架允许规范服务的所有方面——建模构成服务的资源和关系，

指定指导服务行为的策略规则，指定应用程序，分析和控制回路关闭事件所需的弹性管理服务。

- 服务部署——服务部署构建在一个编排和控制框架上，该框架是策略驱动的(服务编排器和控制器)，在需要时提供服务的自动实例化，并以弹性的方式管理服务需求。
- 服务操作，服务操作是建立在一个分析框架，密切监视服务行为在服务生命周期基于指定的设计，分析和政策，使反应从控制框架的要求，处理情况从那些需要医治那些需要扩展的资源弹性适应需求变化。

图 4-13 提供了一个简化的架构功能视图，它突出了几个关键组件的作用：

- 为将服务和资源加载到 ONAP 并设计所需服务的设计时环境。
- 外部 API 为 ONAP 平台提供向北的互操作性，Multi-VIM/Cloud 为 ONAP 工作负载提供云互操作性。
- OOM 提供管理本地云安装和部署到 kubernetes 管理的云环境的能力。
- ONAP 共享服务为 ONAP 模块提供共享功能。MUSIC 允许 ONAP 扩展到多站点环境，以支持全球规模的基础设施需求。ONAP 优化框架(OOF)提供了一种声明式的、策略驱动的方法，用于创建和运行优化应用程序，如 home /Placement 和更改管理调度优化。日志记录提供集中的日志记录功能，审计 (POMBA)提供理解编排动作的功能。

- ONAP 共享实用程序提供了支持 ONAP 组件的实用程序。
- 持续改进的信息模型和框架工具，以协调拓扑、工作流和策略模型，这些模型来自许多 sdo，包括 ETSI NFV MANO、TM Forum SID、ONF Core、OASIS TOSCA、IETF 和 MEF。

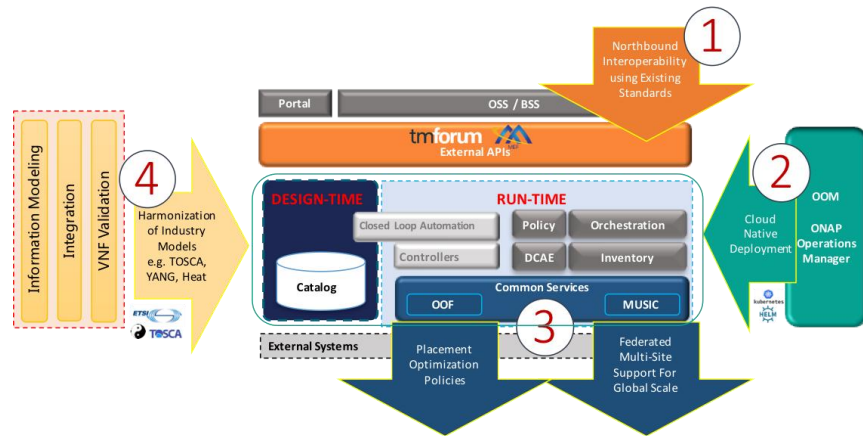


图 4-13 ONAP 架构的功能视图

ONAP 的功能特性主要有：为物理和虚拟网络的策略编排和自动化提供平台；为 VNF、SDN 网络以及构建在这两项基础设施之上的高级服务提供设计、创建、协调、监控和生命周期管理能力；快速实现自动化新服务；元数据策略驱动架构，更加灵活；组件可复用；弹性可扩展。

开放式网络自动化平台有以下优点：

- 通用自动化平台，实现服务和连接的通用管理，同时应用程序单独运行
- 针对大规模工作负载和服务，为供应商不确定、策略驱动的服务设计、实现、分析和生命周期管理提供统一的操作框架
- 编制虚拟和物理网络功能
- ONAP 提供服务或 VNF 配置功能，与其他开源编配平台形成

对比

- 模型驱动的方法使 ONAP 能够支持使用不同 VNFs 的服务作为公共服务块
- 服务建模使运营商可以使用相同的部署和管理机制，也可以使用相同的平台

ONAP 使用云技术和网络虚拟化提供服务，实现更快的开发和更高的运营自动化。它使服务提供商能够快速添加功能并降低运营成本，为服务提供商和企业更好地控制其网络服务，并使开发人员能够创建新的服务。最终，由于网络更好地适应，扩展和预测使得用户能够体验无缝连接。

2. OPNFV

网络功能虚拟化（NFV）的主要目标是提高服务的灵活性，以达到更好地利用资源的目的。为了实现这一目标，网络运营商们迫切地需要一个开放源码的参考平台来验证多厂商互操作的 NFV 解决方案。NFV 开放平台（OPNFV）是一个全新的提供这样一个平台的开源项目。OPNFV 是针对 NFV 领域的一个开源项目，和其他开源项目的主要区别在于其并不专注于开源代码的开发，而是致力于将其他开源项目通过集成、部署和测试进行系统级的整合，从而搭建一个基准的 NFV 平台。而如今在 NFV 领域中恰恰缺少一个这样的平台，使得不同开源标准及协议间能够互通协作，以符合 NFV 的实际应用环境。OPNFV 将使业界合作促进 NFV 的发展进步并且确保一致性、性能和互操作之间的虚拟网络基础设施。OPNFV 的初始范围将提供 NFV 的

基础设施（NFVI），虚拟化基础设施管理（VIM），API 和其他 NFV 要素，它们共同构成的虚拟网络功能所需的基础设施（VNFs）管理和网络业务流程（Mano）的组件。

（四） 结语

截止目前，在数据平面、控制平面和编排平面，各自都出现了许多优秀的开源项目，比如引领 SDN 数据面可编程范式的 P4、推动 SDN 应用的 ODL、促进 SDN/NFV 融合的 ONAP。虽然各个层次的目的都是推动 SDN 等更加开放的网络架构的发展，但是目前为止，各个层次的发展并不同步，在交互方式、标准等方面没有达成一致认识，仍处于不断变动的时期。每个领域中有先行者，比如 P4，也有看似没有潜力的落后者，比如 openflow。

在可预见的未来，网络领域开源项目取得更广泛应用和发展的关键在于——对于网络架构、各层次之间的接口、每个层次的任务等方面达成更深入的共识，以此在保证各层次能够协同工作的前提下，实现并行快速发展。

五、 5G 领域重点开源项目

5G 即第五代移动通信技术（5th generation mobile networks），是最新一代蜂窝移动通信技术，也是继 4G（LTE-A、WiMax）、3G（UMTS、LTE）和 2G（GSM）系统之后的延伸。移动通信网络由无线接入网、传输网和核心网组成。无线接入网即基站，通过无线连接将用户终端连接到移动网络；传输网用于连接核心网与无线接入网，是负责承载数据传输的网络；核心网是移动通信网的中枢，负责整个移动通信网

络的管理和控制。

5G 网络具有高带宽、低时延、海量连接等特性，将加速工业互联网、物联网、AR/VR、自动驾驶等多种行业应用的发展。与 4G 网络相比，在无线接入网方面，5G 网络将重塑网元功能、互联接口及组网结构；在核心网方面，将趋向采用云化分布式部署架构，核心网信令网元将主要在省干和大区中心机房部署，数据面网元根据不同业务性能差异拟采用分层部署方案，随着物联网（IOT）等垂直行业的业务发展，5G 控制平面也将呈现大规模部署趋势。5G 网络的应用场景主要包括：eMBB(增强移动宽带)、uRLLC(低时延高可靠)、mMTC(海量大连接)。eMBB 将为移动互联网业务提供前所未有的极致体验，主要满足超高清视频、下一代社交网络、沉浸式游戏、全息视频等移动互联网业务需求，随时随地(包括小区边缘、高速移动等恶劣环境和局部热点地区)为用户提供无缝的高速业务。uRLLC 和 mMTC 将满足物联网和垂直行业的多样化应用需求。其中，uRLLC 面向车联网、工业控制、远程手术等对时延和可靠性具有极高要求的垂直行业，为用户提供毫秒级的端到端时延和接近 100%的业务可靠性保证。而 mMTC 主要面向智慧城市、环境监测、智慧农业、森林防火等以传感和数据采集为目标的应用场景，具有小数据包、低功耗、海量连接等特点。

如今，开源技术凭借其快速迭代、开放、免费等特点获得广大研究人员的青睐，并迅速成为未来网络发展的重要组成，覆盖未来网络发展的方方面面。5G 网络同样也需要利用开源技术，通过创立开源

项目促进 5G 网络多方面的快速迭代发展。本章主要从不同的方面介绍了 5G 领域的重点开源项目及其发展对 5G 网络产生的影响。

(一) 基站

基站，也称无线接入网，是 5G 网络的核心设备，提供无线覆盖，实现有线通信网络与无线终端之间的无线信号传输。基站的架构、形态直接影响 5G 网络如何部署。受覆盖距离和接入容量的限制，距离太远或者数量太少都会影响 5G 信号传输，因此需要高密度的基站部署来保证网络传输质量。本节将详细介绍在 5G 大规模部署阶段涌现出的各种开源项目，降低基站搭建成本的同时也使 5G 网络建设更方便、快捷、灵活。

1. 5G 小基站

在 5G 时代，室内场景已成为主流，预计超过 80% 的数据流量将发生在室内，面向垂直行业的室内场景，如 VR/AR、4K/8K 等业务形式也在不断增多，这对运营商的室内覆盖能力提出了新的要求。同时 5G 网络部署在更高的频段，这使得单站覆盖范围变小，而 5G 如果实现与 4G 相同的网络覆盖，需要的基站数量将是 4G 的 2 倍以上。基于上述背景，易部署、易维护、低功耗、低成本的 5G 小基站越来越受业界的关注，小基站的建设有望迎来爆发。

5G 小基站引入了超密集组网架构，具有可视化运维、精确定位、智能分析的能力，除了能够解决网络覆盖问题外，还能满足垂直行业用户对于精细化建网、智能运营、位置服务、客户精细化服务等方面的需求。在 3G/4G 时代，运营商部署的小基站大多数主要以传统 DAS

实现室内覆盖，小基站主要被用来实现网络扩容和重点区域的覆盖保障。然而 5G 网络主要占用高频段，导致信号很难穿透墙壁或建筑物，传统 DAS 系统存在利用难、升级贵、部署复杂等缺陷，因此，具备容量高、成本低、部署简单等优势 5G 小基站开始崭露头角，成为了室内网络数字化的重要手段。此外，除了室内网络覆盖的基本需求之外，垂直行业市场还希望网络性能高、运维效率高、业务多样化。传统 DAS 存在故障发现难、定位难、监管难以及精准覆盖难等问题，难以满足行业用户的多样化需求；而宏站成本较高，灵活性较差，也无法满足用户需求。此时，小基站就变得至关重要。

由于小基站部署灵活、建造简单、成本低、效率高，在 5G 的深度和广度覆盖上，小基站都有巨大发展潜力。在 5G 时代热点区域容量的大幅提升，导致传统的宏基站越发无力应对，其覆盖范围小、成本高的问题，导致综合造价高，且站址资源难以获取。而小基站将会以密集组网的方式成为 5G 网络建设中的主流，从 4G 到 5G 将迎来加速增长。多样化小基站将助力 5G 快速建网，为与城市环境更好融合，节省站址资源，小基站建设成灯杆、广告箱等各种形态；为破解基站能耗难题、解决突发灾难时的通信问题，便携式小基站、无人机小基站应运而生，并逐步走向成熟。

目前各大电信设备厂商为强势进入 5G 小基站格局争相推出了小基站解决方案。2014 年 9 月，大唐移动在推出了 NEOsite 双模一体化皮基站方案，2015 年 7 月推出了 Cubesite、Padsite 和 Pinsite 三款小基站产品。2018 年 1 月，爱立信首先发布了以室内部署为主的 5G

NR 中频段的无线点系统产品，以 100MHz 带宽结合 4 天线技术，速率高达 1.5Gbit/s，并支持新的 5G 频段（2.6GHz~5GHz）。2018 年 2 月，中国电信、Verizon、AT&T、NTT docomo、DT、SKT、KTF 等全球多家运营商面对 5G 部署带来的挑战共同组成了开放无线接入网（O-RAN）联盟，期望以网络智能化、接口开放化、硬件白盒化和软件开源化的理念，实现对无线接入网（RAN）的革新，从而进一步提升下一代无线通信网络的开放性水平。2019 年 2 月，中国电信联合 Intel、H3C 在 2019 年的世界移动通信大会（MWC）上首次展示完整的基于 O-RAN 概念的 5G 白盒化室内小基站原型机。

随着 5G 小基站的白盒化将使移动通信产业链由封闭走向开放，进一步激活产业活力，重塑产业生态；同时也给运营商带来了新的机遇，使运营商可以更加快速、高效、低成本地提供新兴业务与应用，满足普通客户和垂直行业的各类特殊需求。在 5G 大规模部署阶段，小基站将迎来发展机遇，5G 小基站通过软硬件解耦的设计思路，满足 5G 新时代对接入网的需求，提供高性价比大带宽、低时延、万物互联的 5G 云服务，可以为用户、为行业带来更高性价比的 5G 覆盖解决方案和高质量的业务体验，助力 5G 网络多元化发展。

2. Open Cellular

Open Cellular 是一个软件定义的、旨在改善全球偏远地区连接性的成本效益高的开源无线接入平台，2016 年由 Facebook 发布。该平台由两个子系统组成：集成了电源、同步等系统的多用途基带计算（GBC），以及集成了模拟前端的视频系统。其供电方式支持太阳能、

电池以及 PoE（以太网供电）等多种方式。在软件方面，考虑到系统部署在偏远地区现场维护困难，Facebook 推出的是开源实时的操作系统，从而为监控和远程操作提供方便。而且这样一个网络盒子可支持从 2G 到 LTE 等多种网络制式。它的硬件设计也是开源的，配上必要的固件和控制软件，任何运营商、OEM 厂商都可以本地制造，部署和运营基于这一平台的移动网络。



图 5-1 OpenCellular 组件：套板、安装支架、外壳、射频电路板、GBC 电路板

Open Cellular 最大的优点是当“回程连接”断开时，它还可以使用。因为它不仅包含天线（用来广播的无线信号），还有一个核心网络硬件（处理这些无线信号）。当它无法连接互联网时，用户仍然可以用它进行本地通信，比如语音通话、发送短信等。部署成本低是 OpenCellular 的另一优点，主要从两方面降低成本：一方面因为其软硬件都可以外包生产，另一方面是该平台从设计上就减少了对市政设施租用的依赖，大大降低基站部署在该部分的开销。换句话说，Open Cellular 的射频基站和基带控制系统都足够简单，部署方便快捷。相比之下，传统无线架构下的基站设备十分昂贵，在各个地方部署困难，

而且无法实现小型用户的部署。

Facebook 开源该平台的目的，是想通过把硬件设计、必要固件及控制软件等开放出来，让电信运营商、OEM、研究人员创业者等能够开发、实现、部署以及运营基于该平台的无线基础设施。传统无线基础设施相对比较昂贵导致运营商很难普及到效益不高的偏远地区，而更小的组织和个人想要解决网络城市连接问题也非常困难。平台设计原则包括模块化设计、针对不同人口密度提供可伸缩的解决方案、降低建设和运营成本以及易于安装等。

Facebook 计划通过电信基础项目开源新的 Open Cellular 硬件，同时，Facebook 表示 Open Cellular 项目将配合此前推出的 TIP (Telecom Infra Project) 建设开源社区。目前已经开发出支持 2G 网络的产品。此前，Facebook 还已经开发了 60GHz 高速射频和天线系统。

3. ORAN

ORAN (Open Radio Access Network, 开放无线接入网) 联盟，由运营商主导，在 2018 年由中国移动、美国 AT&T、德国电信等 12 家运营商以发展无线接入网为宗旨共同成立的，旨在打造一个“开放”、“开源”与“智能”的高灵活、低成本无线网络，从而使新一代无线接入网更加开放和智能化。该组织推动 RAN 接口开放化、硬件白盒化、软件开源化、网络智能化，打破传统封闭的 RAN 架构，降低 RAN 部署成本，提升 RAN 敏捷性和加速创新。主要工作是开发标准，作为 3GPP 标准的补充，包括 9 大工作组，确保多个供应商设备相互操

作。

随着无线通信网的发展，传统的无线接入网设备使移动网络运营商（MNO）被“锁定”在专有 RAN 上，无法满足多样化需求，且处处受限。随后，SDN 和 NFV 的兴起为网络核心带来了更大的灵活性和更高的成本效率。然而，RAN 仍然是单一供应商系统。近年来，全球移动网络运营商一直推动 5G 采用 Open RAN 架构（也称为 ORAN），促进创新的同时使 5G 网络更加灵活。ORAN 联盟致力于实现一个开放、智能的 RAN。联盟正在开发开放式虚拟化网络元素，如开放式 DU 和开放式 CU。与 Akraino 一样，重点在于构建可重用和标准化的模块化参考设计。这种方法不仅加快了集成和部署的速度，而且还使开发人员可以跳过编写通用功能的代码块，从而使他们腾出时间进行创新。O-RAN 的工作与 Akraino 蓝图的开发紧密相关，其思想是 Akraino 的蓝图对硬件层进行抽象，然后 O-RAN/ONAP 软件栈在该层之上运行并与 API 进行交互，具体如图 5-2 所示。

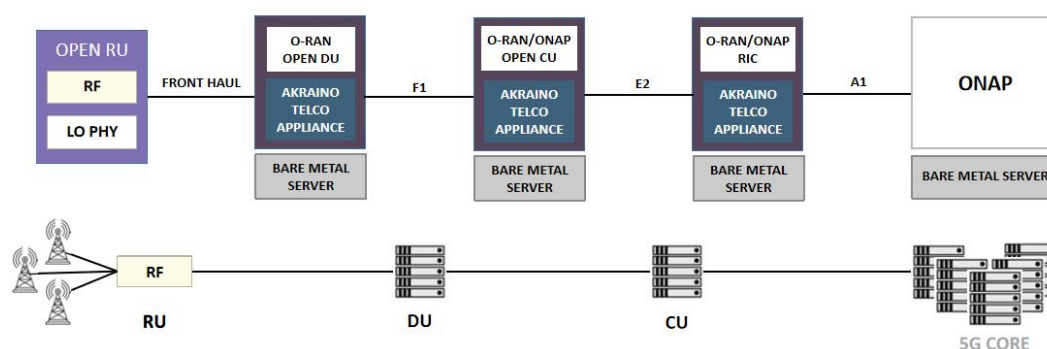


图 5-2 开放的 5G 网络组成结构

ORAN 架构运行在开放的云计算平台，尽可能把现有 RAN 的功能从专有的硬件和嵌入式操作系统平台上剥离，迁移到通用的硬件、

操作系统和云平台上,并提供服务管理和编排(SMO)框架实现 ORAN 运营的高度智能化、网络功能的服务化和可定制化。在服务提供商的网络中,SMO 提供服务远远超出对 RAN 管理的服务,还可以包括诸如:核心网管理服务、传输管理服务、端到端切片管理服务等内容。如图 5-3 所示为 ORAN 内部逻辑架构,大致可分为 O-RAN 无线电单元(O-RU)、分发单元(O-DU)和集中式单元(O-CU)三部分。其中,O-CU 负责协议的分组数据汇聚协议(PDCP)层,O-DU 负责所有基带处理、调度、无线电链路控制(RLC)、媒体访问控制(MAC)和物理层(PHY)的上部,O-RU 负责物理层处理的组件,包括无线电发送器和接收器的模拟组件。ORAN 使用开放的、可互操作的标准定义了这些单元之间的接口,使移动网络运营商能够匹配来自多个不同供应商的 RAN 组件,取代传统的封闭接口和专有硬件及协议,使得 RAN 架构变成更加灵活、开放、解耦。O-RAN 联盟已经创建了 30 多个规范,其中许多规范定义了单元之间的接口。通常所说的 RAN 虚拟化,其实主要是指 O-CU 和 O-DU 的虚拟化,它们是可以搭建在 x86 服务器平台上的。而 O-RU 是射频收发,主要涉及软件无线电、白盒无线电,目前还无法实现虚拟化。

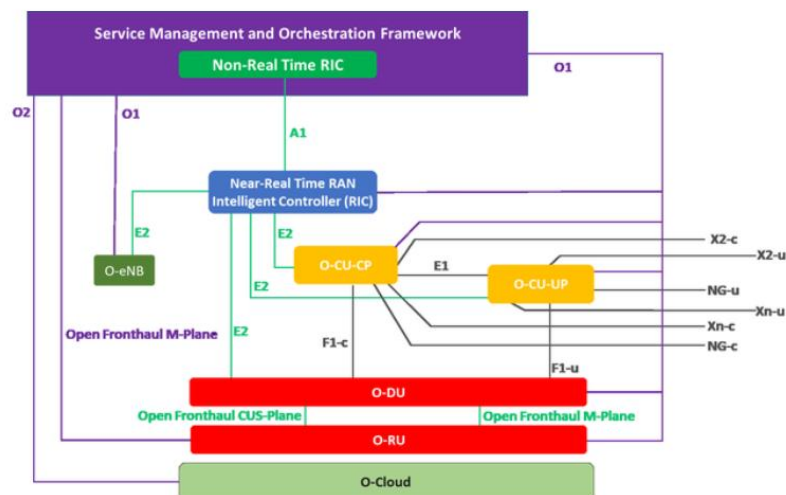


图 5-3 ORAN 的内部逻辑架构

ORAN 解决的关键软件开发之一是 RAN 智能控制器(RIC), RIC 在 5G 核心的 RAN 控制器与接入网之间提供了接口, 从而实现了策略驱动的闭环自动化。RIC 是将 RU、DU 和 CU 转换为 vRAN 的接口部件, 可提供更快、更敏捷的服务部署和可编程性。RIC 与 CU 位于同一位置, 它通过回程连接到核心网的编排和自动化堆栈, 并通过中传连接到 CU 和 DU。它将运行在 Akraino REC 的蓝图之上, 该蓝图经过优化以最大程度地减少了 RIC 和 DU/CU 之间的延迟。Akraino REC 与位于核心网边缘的区域控制器集成在一起, 可将 REC 全自动部署到边缘站点。

5G RAN 支持多运营商接入、多业务接入、多租户接入。通过切片技术以及虚拟化技术, 将不同要求的功能模块部署到不同的位置, 以实现 QoS 优化。支持多运营商共建共享基站资源, 降低建网成本。近实时 RIC 中包含多个 xAPP, 均可由第三方独立部署, 通过 AI 推理模型和策略与不同的 RAN 功能关联。结合技术发展及市场应用需

求，部署开放的 5G RAN 并不是一蹴而就的，开放智能的无线接入网的构建可划分为三个阶段：

(1) 第一阶段：针对现有的具备条件的硬件设施进行升级，依托无线开放接口和智控组件（RIC），打通基站、UPF、MEC 等网元，实现基本的云网协同，降低基站建设成本。

(2) 第二阶段：构建无线云，统一承载云集站、无线智能组件、边缘计算等多种能力，北向支持 SaaS 应用，向行业客户、特定用户提供“云网融合”的一站式综合服务，降低无线网络及边缘云服务成本。

(3) 第三阶段：基于移动的网络云和移动云进行基站云化部署，形成无线网+移动云的云网一体服务方案。实现无线服务能力整体上云，云网资源统一编排，打造向客户提供差异化云网融合的综合服务能力。

面对 5G 时代的到来，结合开放的网络技术，国内外各组织积极参与到实现开放 5G RAN 部署的工作中。目前国内三大运营商基于开放式架构，将网络能力进一步拆分、组合、封装，最终生成产品来支撑千行百业的发展。电信基于开放架构制定了云改数转战略，为行业客户打造一体化定制融合服务，推出了“致远、比邻、如翼”三类服务模式，实现云网一体、按需定制。其推出的自研小站，综合考虑了蓝牙/UWB 等多种接入方式，支持高精度定位算法，BBU 采用全云化架构，支持无线网络能力开放为行业客户提供室内定位，网络能力动态调度等服务。移动基于开放架构推出了“优享、专享、尊享”三

种模式，构建了 5G 专网产品体系 1.0，支撑 5G 专网产品体系和重点客户发展。中国联通发布了 CUBE-Net3.0 网络创新工程合作伙伴计划，开展全方位网络创新。2019 年 9 月，日本电信企业 DOCOMO 基于 O-RAN 开放前传和 X2 首次实现了多供应商 4G、5G 基站互操作，2020 年 9 月引入 5G O-CU/DU，以及 O-RU，2021 年 3 月退出 Open RAN 生态系统，与合作伙伴一起推动向海外电信运营商提供 Open RAN。2021 年 5 月，德国电信、Orange、西班牙电信和沃达丰联合发布了《Open RAN 系统的优先技术要求清单》，计划从 2022 年开始大规模部署 Open RAN。分步实施，阶段部署，确保开放 RAN 与同类最佳的传统 RAN 解决方案达到同等水平。其中沃达丰已于 2021 年 6 月开始启动部署欧洲首个 Open RAN 商用网络(农村场景)。截至 2021 年第一季度，全球已有 23 家运营商公开声明在网络中采用无线云网络。预计到 2025 年，全球运营商无线云网络将覆盖 52.5% 的用户。

然而，ORAN 的部署仍面临巨大挑战。接口规范尚未成熟。不同厂商的研发进度不同支持的特性不同，对标准规范的理解不同，跨厂商基站设备间的互通性测试工作、解耦工作周期长。运营商技术要求更高。5G NR 的开放、解耦要求最终由运营商将各个模块通过标准化协议组装起来，形成完整的功能体，对外提供服务。网络设备软件模块升级面临挑战。对于 O-RAN 开放、解耦架构体系，如何顺利、平滑的进行网络设备的升级、不同厂商的设备是否可以独立升级还是需要整体打包升级，都是亟须解决的问题。参考操作系统，将多家厂商

设备及驱动融合在一起，可以独立升级，利用分层的思想上层应用体验更好。网络安全问题更加严峻。开放、解耦使得模块间的通信机会增多，技术细节更加透明，当生产规模成更大的价值网络后，安全问题不容忽视。O-DU 和 O-RU 来自不同厂家时，O-DU 不能完全控制 O-RU，需要通过更高层来辅助管理，这会带来通过前传接口向 O-DU 北向系统发起中间人攻击的风险；近实时 RIC 与 gNodeB 之间尚未有明确的功能界限划分，可能会造成决策冲突、网络不稳定，攻击者可以利用恶意的 xAPP 故意触发与 gNodeB 相冲突的 RRM 决策而导致服务拒绝。此外，在 O-RAN 规范中也已经指出 xAPP 之间存在直接冲突、间接冲突、隐式冲突，冲突会导致网络不稳定或性能下降，攻击者就可能会利用这个漏洞来攻击网络，令网络存在安全风险。

4. CrowdCell

CrowdCell 是 2019 年在 TIP 峰会上发布的全球第一个 5G Open RAN 小基站，是一个基于 UE Relay 技术，无需接入有线回传即可工作，且支持 SDR（软件定义无线电）的新型小基站。采用无线蜂窝网络进行回传，可快速利用现网基础设施资源，提高室内外覆盖和容量。由于支持 SDR，CrowdCell 的内置系统可通过软件进行编译和修改。因此对于多种接收制式，它都可以灵活应对。

在物联网场景中，CrowdCell 支持 NB-IoT，能够广泛应用物流跟踪、智能停车、智慧城市 等领域。利用蜂窝网进行回传，运营商无需投入巨资重新建设 NB-IoT 宏网实现物联网的深度覆盖，不受地点、时间的限制，可以节约 99% 的建网成本。用户部署 NB-IoTCrowdCell

仅需要提供电力供应，普通电池即可提供超长时间的电力供应。同时，CrowdCell 还可以作为手机终端和宏站之间的中继，通过与宏站已经建立的回传链路，充分利用和放大室外宏站的能力，实现室内补盲，提升用户体验。CrowdCell 作为无人机基站时，大多应用于应急通信、公共安全、热点覆盖和数据收集等场景中。

在全球范围内，运营商和网络服务提供者面临的挑战都在不断地加剧，满足多样的室外覆盖和提升室内补盲质量已经成为关键性网络需求。CrowdCell 凭借支持 UE Relay 和 SDR 来实现对现有资源的充分利用，满足多场景多制式多用途的建网需求，开启一个开放共享、灵活适用的新型网络世界。

5. vRAN Fronthaul

vRAN Fronthaul 项目组由 Vodafone、CableLabs、BT、TIM、Orange、Bharti Airtel 和 Reliance Jio 等 10 家运营商积极推动，主要探索在无法敷设光纤的情况下虚拟 RAN 的前传替代解决方案，这些替代方案包括：G.Fast、以太网、微波和 DOCSIS。vRAN Fronthaul 专注于开发可在 vBBU 和 RRU 之间通过非理想前端部署和操作的虚拟化 RAN 解决方案，解决成本高昂的光纤前传问题，尤其针对 5G 时代将敷设更多的光纤前传，成本太高。

目前该项目正在试验阶段，还未启动 RFI 流程。

6. 5G NR

5G NR（5G New Radio）是一个基于 OFDM 的统一的、功能强大的 5G 无线空口设计的全球标准，是下一代非常重要的蜂窝移动技

术基础。它将提供响应更快的移动宽带体验，并将移动技术扩展到连接和重定义众多新行业中。目前通过与 TIP 协作，为 5G NR 接入点定义一个易于配置和部署的白盒平台。

5G NR 必须满足不断扩大且极其多样化的连接要求和部署类型。5G NR 还需要充分利用各种可用频谱监管范式和频段中的每一点频谱——从 1GHz 以下的低频段，到 1GHz 到 10GHz 的中频段，再到 24GHz 以上的高频段，称为毫米波 (mmWave)。因此，没有一个单一的技术组件可以定义 5G NR。相反，5G NR 将由多项技术发明构建而成。5G NR 设计的首要决策之一是无无线电波形和多址技术的选择，如图 5-4 所示引入的可扩展的 OFDM 参数集能够支持不同的频段/类型和部署模型。

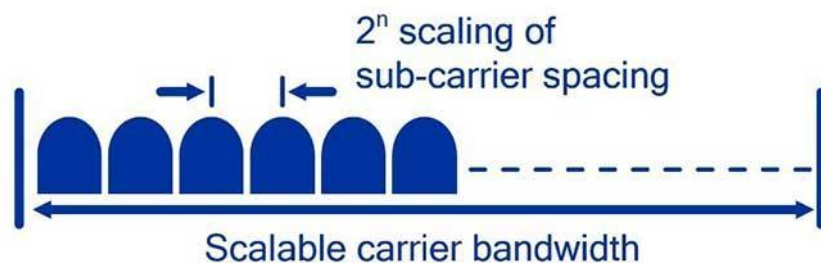


图 5-4 OFDM 参数集支持的频段和部署模型

5G NR 设计的另一个关键组成部分是一个灵活的基于时隙的框架，它将允许网络运营商在同一频率上有效地复用预想(和不可预见)的 5G 服务。除了用于 5G NR 服务的可扩展参数集和灵活框架外，物理层设计还包括可提供强大性能和灵活性的高效信道编码方案。3GPP 5G NR Rel-15 规范将利用 ME-LDPC 作为 eMBB 数据信道的编码方案来实现吞吐量缩放。此外，5G NR 选择 Polar 信道编码作为

eMBB 控制信道的编码方案，5G NR 大多采用 CRC-Aided Polar (CA-Polar)码提高性能。5G NR 中的大规模 MIMO 技术利用基站上能够进行 3D 波束形成的 2D 天线阵列，来使用中频频谱的较高频带，同时其自包含的时隙结构和增强的参考信号使信道反馈更快、更准确。5G NR 不仅能够在中频段频谱中使用更高频率进行宏/小蜂窝部署，而且还可在 24GHz 以上频段为移动宽带带来新的毫米波机会。

2016 年 10 月，高通推出的 6GHz 以下 5G NR 原型系统和试验平台，是推动 5G 迈向商用非常重要的一步。6GHz 这段频段是基于 5G 达到优质覆盖非常重要的关键，高通在这个原型系统上面应用非常多的技术。2018 年 6 月，华为、三星等企业发布新闻公报称，国际标准组织“第三代合作伙伴计划”(3GPP)全体会议已批准第五代移动通信技术 5G NR 的独立组网标准。2018 年 8 月，高通公司推出了全球首款面向智能手机和其他移动终端的全集成 5G 新空口 (5G NR) 毫米波及 6GHz 以下射频模组。这两个分别支持毫米波和 6GHz 以下的射频模组，可适应不同区域不同运营商的不同频段。第一版 5G NR 标准 (3GPP Release 15) 将会支持增强型移动宽带 (eMBB)，同时也计划支持部分 URLLC 功能，mMTC 将可能在第二版 5G NR 标准中被囊括其中。3GPP RelX-15 5G NR 规范将为增强移动宽带和超越奠定基础，5G 网络的飞速发展将推动更多新技术的开创，如 5G NR 频谱共享以解锁更多频谱并支持新的部署类型，5G NR 超可靠低延迟通信 (URLLC) 以支持新的任务关键型服务，5G NR Cellular-V2X (C-V2X) 以带来新的自动驾驶能力，5G NR 集成接入和回程 (IAB)

以降低回程成本更高效的网络加密，5G NR 大规模物联网（mIoT）以解决低功耗广域物联网问题。

（二）核心网

核心网又被称为骨干网，由所有用户共享，负责传输骨干数据流，核心网通常是基于光纤的，能实现大范围的数据流传送。3GPP 将 5G 核心网络（5GC）定义为一个可分解的网络体系结构，引入了以 HTTP/2 作为基准通信协议的基于服务的接口(SBI)，以及控制平面和用户平面分离(CUPS)。5G 网络功能软件的这种分解、SBI 和 CUPS 都非常支持基于云原生容器的实现。如图 5-5 所示，5GC 网络采用的是 SBA 架构（Service Based Architecture，即基于服务的架构）。SBA 架构基于云原生构架设计，借鉴了 IT 领域的“微服务”理念。由于传统网元是一种紧耦合的黑盒设计，网络功能虚拟化（NFV）从黑盒设备中解耦出网络功能软件，但解耦后的软件依然是“大块头”的单体式构架，需进一步分解为细粒度化的模块化组件，并通过开放 API 接口来实现集成，以提升应用开发的整体敏捷性和弹性。微服务架构很好的解决了大模块化问题，把原来具有多个功能的整体拆分为多个具有独自功能的个体，每个个体实现自己的微服务，微服务之间通过 API 交互，且每个微服务独立于其他服务进行部署、升级、扩展，可在不影响客户使用的情况下频繁更新正在使用的应用。从单体式架构（Monolithic）到微服务架构（Microservices）的转变使网元大量增加，然而虚拟化平台部署方式使网络易于伸缩和升级。模块化和软件化是 5G 核心网的显著特点。

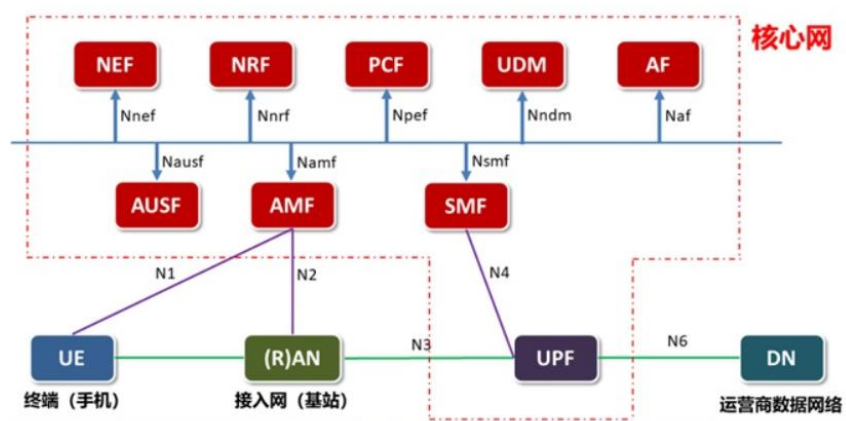


图 5-5 5GC 网络架构

5G 核心网的创新驱动力量源于 5G 业务场景需求和新型 ICT 使能技术，旨在构建高性能、灵活可配的广域网络基础设施，全面提升面向未来的网络运营能力。5G 时代要求未来能形成虚拟化、分层化的核心网络，以及资源开放、适宜开发新业务的网络架构，从而能够提供从网络运营到业务服务的经济和可持续发展的模式。相比于传统 4G 核心网(EPC)，5G 核心网采用原生适配云平台的设计思路、基于服务的架构和功能设计提供更泛在的接入，更灵活的控制和转发以及更友好的能力开放。本节重点围绕着业界各方在 5G 核心网领域发起的开源项目进行分析介绍，并阐述它们在网络通信领域的地位和影响。

1. OAI

OAI (OpenAirInterface) 是欧洲 EURECOM 组织发起并维护的一个开源 SDR LTE 项目，旨在搭建一个开放的、具有各种制式空中接口的、主要基于 CPU 的 SDR 的实验平台。

OpenAirInterface 逻辑上可划分为 OpenAir0、OpenAir1、OpenAir2 和 OpenAir3 四个模块。其中，OpenAir0 是无线嵌入式系统设计模块，

包含了一些硬件相关的设计文件和 **firmware** 之类。**OpenAir1** 用于基带信号处理，包含了一些物理层的功能模块，例如 **OFDM**、调制解调、信道估计、编解码等等。**OpenAir2** 主要是中间层介入协议，包括在 **PC** 上通过 **Linux** 的 **IP** 网络设备驱动与 **MPLS** 的互联开发第二层协议栈。**OpenAir3** 属于无线网络，包括为全 **IP** 蜂窝与 **IP/MPLS** 网状而开发的第三层协议栈。根据 **3GPP** 的标准，在基于 **Linux** 操作系统的通用处理器 (**Intel x86/ARM**) 上实现了符合 **Release 10 LTE** 标准的 **UE**，**eNB**，**MME**，**HSS**，**SGW** 和 **PGW**。也就是说，**OAI** 完全实现了 **LTE** 协议的核心网 (**EPC**)、基站 (**eNB**) 以及用户终端 (**UE**) 三部分。如图 5-6 所示为 **OAI** 整体结构图，其中，用户终端 (**UE**) 主要包含 **PHY**，**MAC**，**RLC**，**PDCP**，**RRC** 和 **NAS** 等功能。然而，由于 **OAI** 组织把开发重点放在 **EPC** 和 **eNB** 上，**UE** 的代码实际运行十分不稳定，但其物理层下行还是比较稳定的。

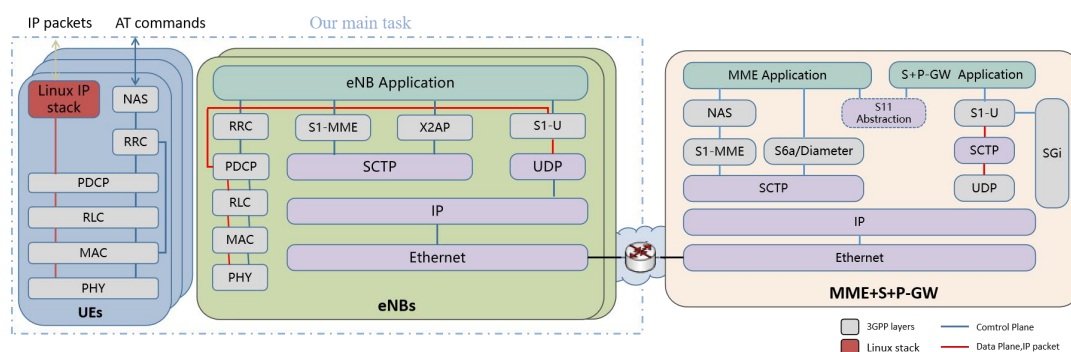


图 5-6 OAI 整体结构

仿真和 **SDR** 是 **OAI** 实现通信系统的两个主要功能。而仿真主要是对物理层中的各个信道的仿真以及系统级仿真。**OAI** 的应用场景十分广泛，包括物理层链路仿真、**LTE** 系统级仿真、**SDR LTE** 系统、

无线安全研究、通信新技术测试、专业测试网络搭建、NB-IoT 等。OAI 还可以与许多标准的 RF（射频）硬件设备（e.g. Ettus USRP）结合使用，也可以与 EURECOM 定制化的 RF 硬件设备结合使用。此外，OAI 平台还包含了大量的仿真平台，用于对各种通信算法的验证。

2. Free5GC

Free5GC 是第 5 代(5G)移动核心网的开源项目，总体架构基于 3GPP 标准、遵循 SBA 框架，采用虚拟化方式实现网络功能，可运行 5G 核心网的标准服务，并且可以模拟相应工作流程。Free5GC/mano 的总体架构如图 5-7 所示，虚拟层由 MANO、VIM 对硬件资源进行管理并抽象成通用的计算、网络、存储资源供 VNF 使用，由 VNFM 对 VNF 生命周期进行管理，NFVO 提供接口进行编排。Free5GC 的 VIM 可支持 k8s 或者 openstack，如果使用 k8s，也就是创建 k8s 集群的方式由 k8s 对硬件资源进行统一管理，则需要将一台（或几台）主机安装成 K8s 控制节点，其他主机作为工作节点 join 到集群中承载工作负荷，其他的实体（如 VNFM、NFVO、各 VNF 等）以 k8s pod 的方式进行运行。在实际 5G 环境中，多数厂商已经采用容器技术承载网络功能服务。

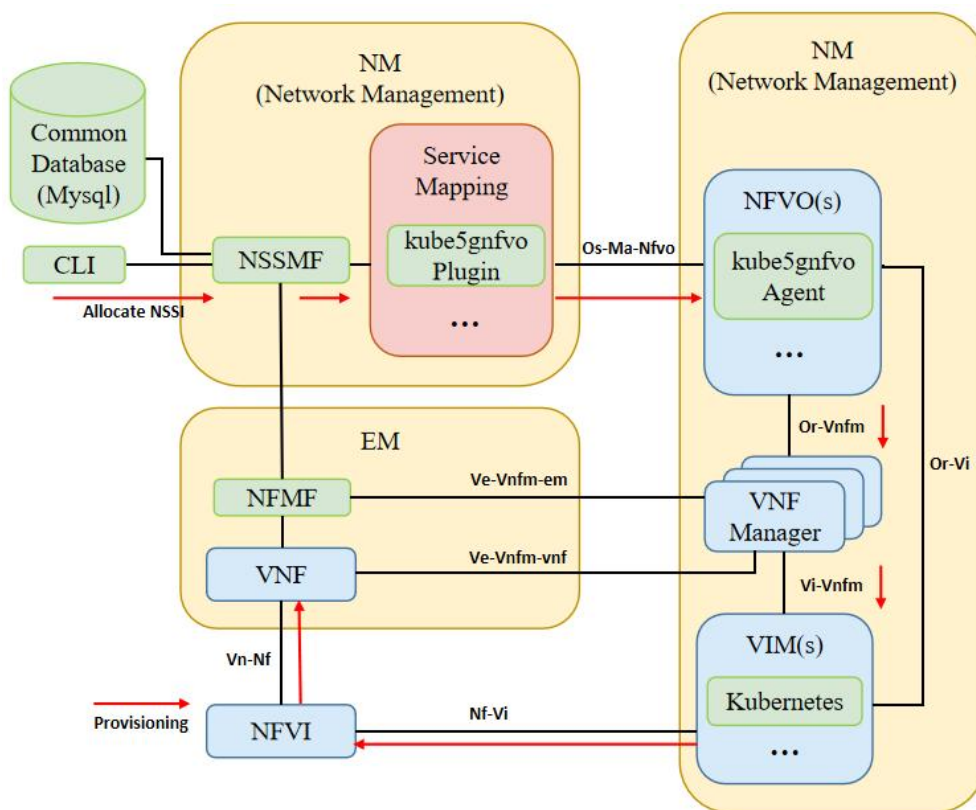


图 5-7 Free5GC/mano 的分层架构图

目前，该项目的主要贡献者是国立交通大学（NCTU），而项目的最终目标是实施 3GPP 第 15 版(R15)及更高版本中定义的 5G 核心网(5GC)。

3. OpenUPF

OpenUPF（Open User Plane Function）是用于第 5 代（5G）移动核心网络用户面功能的开源项目。该项目的目标是实现 3GPP Release 16（R16）及更高版本中定义的用户面功能网元（UPF）。OpenUPF 被设计为一个单独的 VNF，为用户流量提供高性能的转发引擎。UPF 是连接运营商和垂直行业的桥梁，是 5G 拓展行业市场的钥匙。5G 作为新一代信息技术推动着众多行业的创新与变革。业界纷纷探寻 5G+行业的融合发展路径，实现数字化、智能化转型升级。UPF 作为

5G 核心网的重要网络功能，担负着数据流量的处理、路由等核心功能。随着 5G 边缘计算的拓展，UPF 已逐渐从运营商的核心层走向行业客户的接入层。面向行业应用场景，需要轻量化、低成本、灵活部署的 UPF。当前，UPF 与控制面(SMF) 的接口(N4) 尚未完全开放、服务化能力尚未完全实现，一定程度上影响了 5G 响应行业客户需求的能力。运营商网络核心侧的 UPF 需要承载面向全网的业务、用户数为百万级以上、业务功能要求全、容量和性能要求高。作为核心网的关键设备，系统级的 UPF 部署和维护成本相对较高。N4 接口的非标准化，造成 UPF 与 SMF 同厂商的绑定，无法满足边缘用户侧 UPF 轻量化、低成本和灵活的部署需求。

OpenUPF 强调从“基础” UPF 出发，定义简单高效的行业 UPF，同时聚焦特定行业用户，探索灵活易扩展的“可定制化” UPF，其架构如下图 5-8 所示。OpenUPF 具备用户业务数据流的路由转发、N4 耦联管理、PFCP 会话管理、QoS 控制、隧道封装解封装、流量计费、访问控制、数据缓存等核心功能。SBA 架构采用了控制面(CP, Control Plane) 和用户面 (UP, User Plane) 分离的方式，让用户面功能摆脱“中心化”的约束，使其既可灵活部署于核心侧，也可部署于接入侧。下沉到接入侧的 UPF 通过 ULCL (Uplink Classifier) 功能来完成本地分流。如图 5-9 所示，会话管理功能 (SMF, Session Management Function) 通过 N4 接口下发流量过滤器给 UPF，控制 ULCL 的插入和移除。ULCL 对比业务流量与过滤器，按需将流量转发到本地。

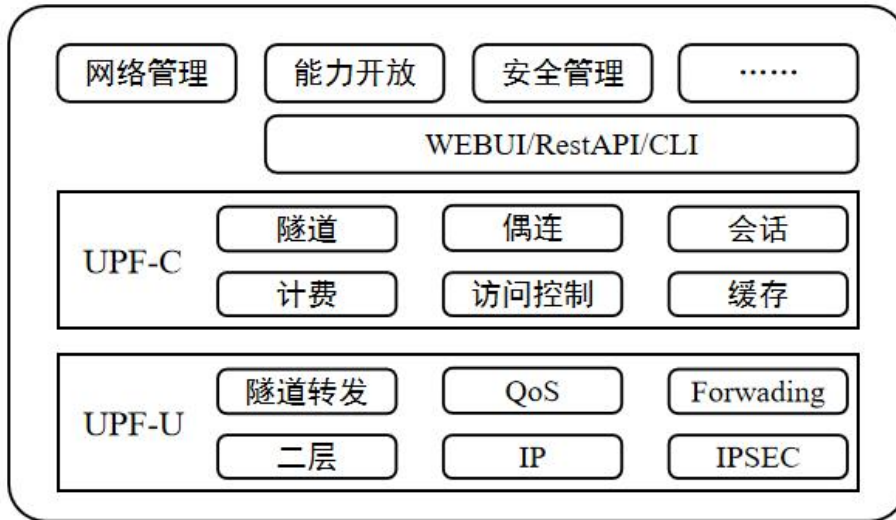


图 5-8 OpenUPF 架构图

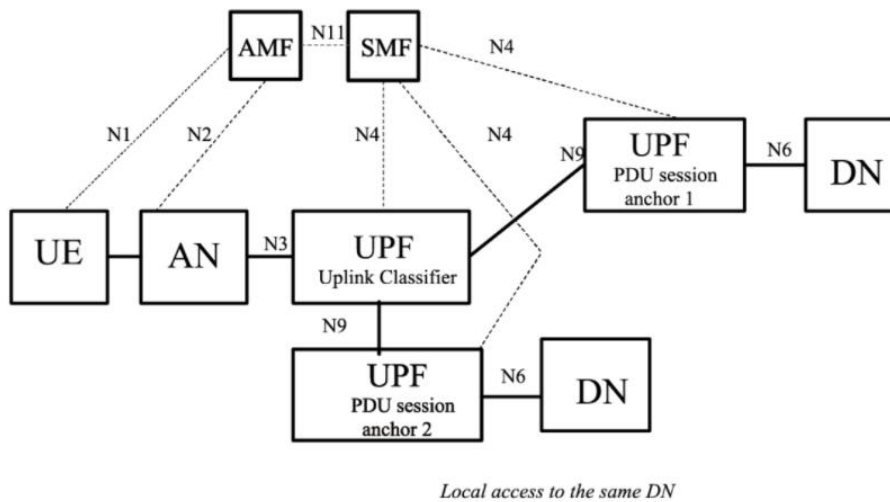


图 5-9 ULCL 架构

传统核心网的控制面（Control Plane）和用户面（User Plane）未实现标准化的分离，C/U 之间的接口实质上仍为设备内部接口。4G 网关实现了 C/U 分离后，由于其中涉及的信令信元多、不同运营商策略规则差异大，导致 C/U 之间的接口仍未事实上的私有接口。5G 的 UPF 和 SMF 之间的 N4 接口亦如此。非标准化接口在 5G 时代引发一系列问题。云化的发展使核心网的云更加集中，面对多样行业的 UPF 应按照场景、要求来部署，而不应被控制面的云所绑定。非标准

化的 N4 接口降低了网络部署的灵活性，增加网络管理的复杂度，限制了 5G 网络服务行业客户的生态发展。面向 5G 的 OpenUPF 以其提供行业领先性能的核心原则为基础，同时在数据路径中集成智能，以在真正分布式网络架构中提供差异化服务。因此，OpenUPF 从功能简化与 N4-接口定义细化两方面同时推进工作。统一 UPF 架构设计，打造开放、标准的 5G 控制面和用户面之间的 N4 接口，构建统一的测试认证体系。此外，OpenUPF 可以在真正的云原生用户平面上运行，也可以支持公共云和私有云产品的混合。它支持分布式架构，使用户平面更靠近边缘，并支持移动边缘计算(MEC)用例以支持数据路径服务。更靠近边缘且具有非常低的延迟，这是 5G 演进的一个组成部分。

2019 年 12 月，中国移动研究院联合大唐、Intel、香港应科院在中国移动实验室进行了 SMF 和 UPF 的对接测试，初步验证了异厂家解耦的可行性。后续分阶段逐步把 OpenUPF 的工作推向深入并落地。2020 年 1 月，中国移动启动 OpenUPF——面向行业的 5G UPF 及 N4 接口开放合作伙伴计划，从开放接口、开放设备、开放服务和开放智能四个方面定义可靠、可管、可信、简洁、灵活、开放的 UPF。同时通过构建完整的技术体系以推动产业成熟、增强网络能力、助力 5G 服务垂直行业用户。同年 3 月，中国移动依次发布了《面向垂直行业的 N4 解耦 UPF 设备规范》、《面向垂直行业的 N4 接口规范》、《5G OpenUPF 白皮书》等文件进一步定义和规范 UPF。6 月初 3GPPCT4 成立 5GUPF N4 接口开放和增强标准项目。

（三）结语

本章分别从基站和核心网两方面对 5G 领域的重点开源项目展开介绍，在业务与技术的双重驱动下，5G 网络的架构也正在发生巨大变化，传统的基站设备和核心网架构灵活性较差，不支持网络功能的虚拟化，无法满足未来网络智能化、动态化、协同化的要求。从模型驱动到数据驱动；从宏观规划到精准管控，从网络业务分域自治到网业协同、网随业动，从封闭系统到敏捷定制、生态开放。不论是 5G 基站的研究，还是 5G 核心网的设计，都必须要走开放化的道路，匹配各种网络拓扑，适用业务密集区与业务稀疏区的不同要求，能够应用于室外和室内场景，支持多运营商共享；能够面向更加复杂多样的行业市场，需要通过智能化网络快速引入新能力，灵活满足行业客户的各种需要，为运营商拓展新的商业模式创造必要的技术条件；需要进一步降低成本，包括设备采购成本，运维成本，降低 5G 业务的使用门槛。

5G 基站的设计和部署深深地影响着整个 5G 网络的发展和应用，领域内专业人士对 5G 基站的研究从未停止。在国际和国内，多个组织在共同推进 5G RAN 的开放工作。Facebook 于 2016 年发起成立 TIP (Telecom Infra Project 电信基础设施项目)，目前已有超过 500 家成员，包括运营商、设备上、芯片商、IT 商和系统集成商。关注基站软件和硬件的具体实施，采用 O-RAN 制定的标准通过开源软件和开放的通用硬件来模块化地建立基站，引入 AI/ML 相关技术，对 RAN 系统进行智能化地控制。2018 年 2 月发起成立由 C-RAN 联盟（以中

国企业为主)和 xRAN 论坛(以美日韩和欧洲企业为主)合并而成的 O-RAN 联盟。该组织推动 RAN 接口开放化、硬件白盒化、软件开源化、网络智能化,打破传统封闭的 RAN 架构,降低 RAN 部署成本,提升 RAN 敏捷性和加速创新。主要工作是开发标准,作为 3GPP 标准的补充,包括 9 大工作组,确保多个供应商设备相互操作。OS-RAN 联盟(开源无线电联盟),在科技部高技术研究发展中心指导下,由北京邮电大学联合 10 家创始单位发起成立,是国家重点研发计划“基于开源生态的无线协作环境”项目孵化的开源组织,致力于联合国内开源无线产业各方,推动中国开源无线技术研究、技术社区建设、开源产业发展。

截至 2021 年 4 月,全球 68 个国家 162 个运营商推出了 5G 服务。近期数据显示,国内已经建成 5G 基站 91.6 万个,5G 连接数已经超过 3.65 亿,5G 共建共享基站超过 40 万个,已建成全球最大的 5G SA 网络。5G 标准持续演进,R17 已经冻结,下一个五年的 5G-Advanced 已经启动,6G 架构和关键技术已经在布局。然而,在国内,5G 尚未实现全国覆盖,基站规模远没达到全覆盖的程度,5G 基站的发展仍存在很多问题。(1)接口规范尚未成熟。不同厂商的研发进度不同支持的特性不同,对标准规范的理解不同,跨厂商基站设备间的互通性测试工作、解耦工作需要长期进行下去。(2)运营商技术要求更高。5G NR 的开放、解耦要求最终由运营商将各个模块通过标准化协议组装起来,形成完整的功能体,对外提供服务。(3)网络设备软件模块升级面临挑战。对于 O-RAN 开放、解耦架构体系,如何顺利、平滑

的进行网络设备的升级、不同厂商的设备是否可以独立升级还是需要整体打包升级，都是亟须解决的问题。(4) 网络安全问题更加严峻。开放，解耦使得模块间的通信机会增多，技术细节更加透明，当产生规模成为更大的价值网络后，完全问题不容忽视。

5G 业务场景需求和新型 ICT 使能技术驱动 5G 核心网架构的创新，5G 核心网采用 SBA 微服务架构，从原来的“单个网元多个功能”转变成“多个网元单个功能”，同时借助 NFV 使网元功能与硬件资源隔离，从而达到微服务的效果。5G 时代的到来，推动 5G 核心网朝着虚拟化、软件化、服务化、智能化的方向发展，业界人士也为此做出努力。2014 年，由欧洲 EURECOM 公司创建的 OSA (OpenAirInterface 软件联盟) 推出的 OAI (Open Air Interface) 开源软件系统，旨在提供开源的 3GPP 标准核心网和无线接入网络协议的生态系统，其当下的使命是为 5G 无线网络的研究以及产品开发提供软件和工具。目前，开源 SDR LTE 平台有 OAI、OpenLTE 和 srsLTE 等等，其中 OAI 里面最为完善的一个。2019 年 1 月，国立交通大学陈志成教授研究团队开发出全世界第一套开放原始码 5G 核心网络 free5GC，该项目解放硬件限制的枷锁。早期只有 IBM 少数公司在生产电脑，随后软硬件分离，各公司都有生产电脑硬件的能力。早期的智能手机以 iPhone 为主，而后 Android 的来临，改变了智能手机的垄断地位。free5GC 解除电信网络与 Nokia、Ericsson 和华为的绑定关系，将核心网络软件，释放到任何硬件平台上，扩大通讯网络的市场。目前与中华电信、启碁科技、思锐科技等合作，未来会将 free5G 应用

在“5G 专网”，如智慧工厂、智慧医院、智慧车站、机场、港口等，打造专属的 5G 网络与更多元化的服务。2019 年 12 月，中国移动研究院联合大唐、Intel、香港应科院通过实验初步验证了异厂家解耦的可行性，后续分阶段逐步把 OpenUPF 的工作推向深入并落地。OpenUPF 从行业的健康发展考虑，统一定义 UPF 的基本功能最小集合，使接口及基本功能标准化。OpenUPF 给 5G 产业发展做出了贡献：

- (1) 给了从业者新的创业机会。UPF 作为与垂直产业应用结合的 5G 边缘接入设备，在部署比如 MEC 或者切片网络时，可以附加诸如数据计算、AI 应用等业务。
- (2) 运营商新的利润增长点。从国家开展提速降费后，运营商的利润一直在下降，从普通消费者上赚钱的盈利点越来越少，同行业的竞争和用户的争夺越发激烈，优惠套餐给普通消费者带来便利的同时也给运营商戴上了用户规模的枷锁，OpenUPF 的推广使运营商可以找到企业客户的盈利点，通过自身的深度 DPI 能力，结合 5G 网络独有的策略，使运营商摆脱从普通消费者客户获取利润的枷锁，转而向更优质的企业客户。
- (3) 拓展新基建的边界。新基建不仅是 5G 基站的建设，更是优化近年出现的基于数据的基础使用设施，包括政府、公共事务、安全等行业的数据采集、存储、处理、计算平台，其中包括数据的精准分析和预处理。Open UPF 满足了 AI 对数据分析的迫切需求，运营商专注于数据的 DPI、QoS 流能力、策略计费等，各行业更多的关注于垂直行业的业务应用。

5G 网络逐渐云化，在带来功能灵活性的同时，也为部署应用带了很多技术和工程难题。本章介绍的 5G 领域的开源项目都基于 5G

网络的“开放”思想，坚持开放式自主创新，融入全球技术体系，高度重视核心芯片和基础软件的自主研发，为国内 ICT 设备系统创新和业务应用创新提供底层技术支撑，未来发展中更要坚持产业开放，在更广泛的应用实践中不断完善，积极融入开源并主导开源。

六、云领域重点开源项目

从互联网的兴起到云概念的盛行，小作坊式、各自为战的业务部署方式逐渐被虚拟化、共享化、集中化的以数据中心为基础的云业务部署所取代。随着时代发展，人工智能、5G、物联网、元宇宙等新兴技术和业务需要层出不穷，各种云领域的成果百花齐放，为新兴业务提供架构支撑和技术保障。在云领域中，云计算概念先行作为骨干；边缘计算协同云计算，补充“最后一公里”的算力；云原生基于云计算，为业务构建提供灵活、敏捷、自动化的解决方案。

（一）云计算

作为一种新兴的资源使用和交付模式，云计算已经为学术界和产业界所认知，形成了比较成熟的服务模式，使得计算资源成为向大众提供服务的社会基础设施，由于开源软件的低成本和开放特性能帮助云计算服务商降低产品成本，提高兼容性，开源云计算平台被认为是 IT 的趋势。广受关注的开源云计算平台有 Openstack、CloudStack 和 Eucalyptus 等。

1. OpenStack

OpenStack 是一个开源的云操作系统，它是由 NASA（美国航空

航天局)和 **Rackspace**(一家全球领先的托管服务提供商,成立于 1998 年)主导的一个开源项目,旨在提供一个开放的、可大规模部署的云计算平台。**OpenStack** 通过各种互补的服务提供了基础设施即服务(IaaS)的解决方案,每个服务提供 API 以进行集成。

OpenStack 是一个旨在为公共及私有云的建设与管理提供软件的开源项目。它的社区拥有超过 130 家企业及 1350 位开发者,这些机构与个人都将 **OpenStack** 作为基础设施即服务(IaaS)资源的通用前端。

OpenStack 项目的首要任务是简化云的部署过程并为其带来良好的可扩展性。**OpenStack** 云计算平台,帮助服务商和企业内部实现类似于 AmazonEC2 和 S3 的云基础架构服务(Infrastructure as a Service, IaaS)。

2. **CloudStack**

CloudStack 是一个开源的具有高可用性及扩展性的云计算平台。支持管理大部分主流的 hypervisors,如 KVM, XenServer, VMware, Oracle VM, Xen 等。**CloudStack** 可以加速高伸缩性的公共和私有云(IaaS)的部署、管理、配置。使用 **CloudStack** 作为基础,数据中心操作者可以快速方便的通过现存基础架构创建云服务。作为一个 IaaS 平台,**CloudStack** 不再是一个简单的单机软件,而是为了管理超大规模的硬件设备而生的。它兼容各种虚拟化管理软件(Hypervisor),支持各种存储类型,通过软件及虚拟机实现了很多网络功能,尽可能将流程自动化并对用户提供服务。

CloudStack 这个开源项目设计的初衷，就是提供基础架构即服务（IaaS）的服务模型，建成一个硬件设备及虚拟化管理的统一平台，将计算资源、存储设备、网络资源进行整合，形成一个资源池，通过管理平台进行统一管理，弹性增减硬件设备。

根据云环境中的特点，**CloudStack** 进行了功能上的设计和优化，使其具有如下特点：

- 为了适应云的多租户模式，设计了用户的分级权限管理机制，通过各种技术手段保证用户数据的安全，保护用户的隐私。
- 用户可以直接通过浏览器访问，在一定权限下自由使用自己的资源，实现自服务模式。
- 在多租户环境下，用户使用资源的计量计费功能也是必不可少的，**CloudStack** 会通过多种手段尽可能地记录用户使用的所有资源的情况，并将其保存下来，供计费时使用。
- 对于云系统管理员来说，绝大部分管理工作通过浏览器就可完成。**CloudStack** 提供资源池化管理、高可靠性等功能，帮助云系统管理员尽可能地将管理工作简化和自动化，减少切换界面的次数。
- **CloudStack** 既可以直接对用户 provide 虚拟机租用服务，也开放 API 接口为 PaaS 层提供服务。

CloudStack 管理平台是将各种组件进行统一管理，相互协同工作，如图 6-1 所示：

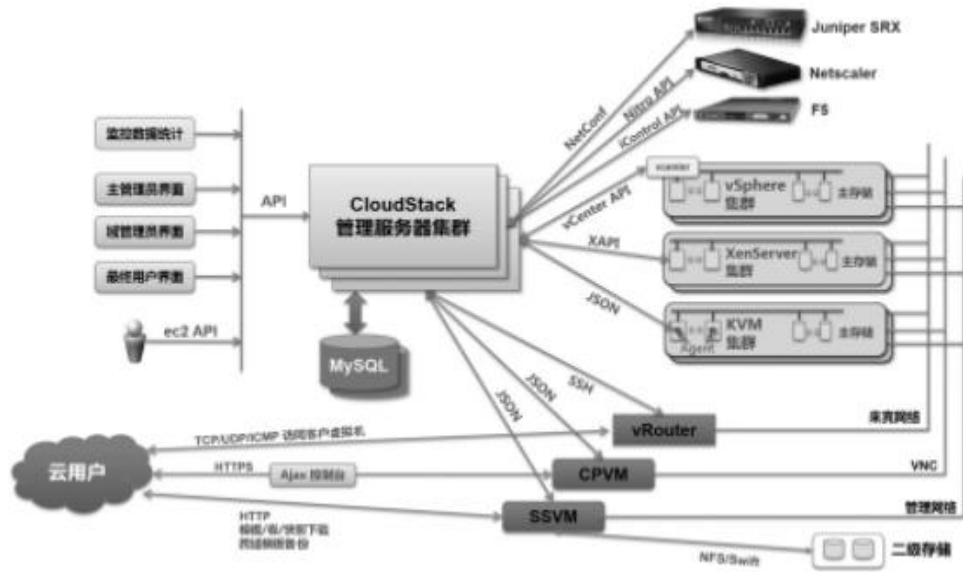


图 6-1 CloudStack 网络通信架构

用户通过界面登录，前端界面与后端管理程序的交互使用了目前最流行、最通用的做法：完全调用 RESTful 风格的 API 来实现。用户所使用的 Web 界面上的任意功能都由 Web 转义为 API 命令发送给 API 服务，API 服务接收请求后交由管理服务进行处理，然后根据不同的功能将命令发送给计算节点或系统虚拟机去执行，并在数据库中进行记录，完成后将结果返回前台页面。CloudStack 管理服务管理物理基础设施最简单、最直接的办法就是调用设备所开放的 API 命令，如 XenServer 的 XAPI、vCenter 的 API；而对不方便直接调用 API 的设备（如 KVM），会采取安装代理程序（Agent）的方式协助进行管理。在 CloudStack 架构中，存储有两种角色，它们分别提供不同的功能，具体如下：

- 主存储通过调用计算节点所使用的 Hypervisor 程序进行管理，如在存储上创建磁盘或执行快照功能等，其实都是通过调用 Hypervisor 程序。

- 二级存储是一个独立的存在，它不在某一个计算节点或集群的管理下，在 CloudStack 的架构中就有二级存储虚拟机挂载此存储进行管理的设计的 API 来进行的。
- 系统虚拟机是整个 CloudStack 架构中很有特色且非常重要的组成部分，会承担很多重要的功能。CloudStack 的系统虚拟机有 3 种，分别是二级存储虚拟机 (Secondary Storage VM)、控制台代理虚拟机 (Console Proxy VM)、虚拟路由器 (Virtual Router VM)。系统虚拟机对普通用户而言是透明的、不可直接管理的，只有系统管理员可以检查及访问系统虚拟机。
- 二级存储虚拟机 (Secondary Storage VM) 用于管理二级存储，每个区域 (Zone) 内有一个二级存储虚拟机。
- 控制台代理虚拟机 (Console Proxy VM) 支持用户使用浏览器在 CloudStack 的 Web 界面上打开虚拟机的图形界面
- 虚拟路由器 (Virtual Router) 可以为用户提供虚拟机所使用的多种功能，它在用户第一次创建虚拟机时自动创建。

相比 OpenStack，CloudStack 的优势在于更早地进入开源云平台领域，并且拥有许多商用成功案例。CloudStack 具有良好的易用性，功能更加丰富，可直接应用于生产环境。在基础功能相同的前提下，CloudStack 的部署和维护更加容易。因此如果企业希望通过有限的资源投入构建开源 IaaS 框架，CloudStack 是一个不错的选择。

3. Eucalyptus

Eucalyptus (Elastic Utility Computing Architecture for Linking Your

Programs To Useful Systems) 是一种开源的软件基础结构, 用来通过计算集群或工作站群来实现弹性的、实用的云计算。它最初是美国加利福尼亚大学 Santa Barbara 计算机科学学院的一个研究项目, 2009 年 1 月成立公司商业化运作, 发展成为了 Eucalyptus Systems Inc。目前在美国、英国、德国、印度和中国设有分支机构。

Eucalyptus 包含五个主要组件, 它们能相互协作共同提供所需的云服务。这些组件使用具有 WS-Security 的 SOAP 消息传递安全地相互通信。

- **Cloud Controller (CLC)**在 Eucalyptus 云内, 这是主要的控制器组件, 负责管理整个系统。它是所有用户和管理员进入 Eucalyptus 云的主要入口。所有客户机通过基于 SOAP 或 REST 的 API 只与 CLC 通信。由 CLC 负责将请求传递给正确的组件、收集它们并将来自这些组件的响应发送回至该客户机。这是 Eucalyptus 云的对外 “窗口”。
- **Cluster Controller (CC)**Eucalyptus 内的这个控制器组件负责管理整个虚拟实例网络。请求通过基于 SOAP 或 REST 的接口被送至 CC。CC 维护有关运行在系统内的 Node Controller 的全部信息, 并负责控制这些实例的生命周期。它将开启虚拟实例的请求路由到具有可用资源的 Node Controller。
- **Node Controller (NC)**它控制主机操作系统及相应的 hypervisor (Xen 或最近的 KVM, 很快就会支持 VMWare)。

必须在托管了实际的虚拟实例（根据来自 CC 的请求实例化）的每个机器上运行 NC 的一个实例。

- **Walrus (W)**这个控制器组件管理对 Eucalyptus 内的存储服务的访问。请求通过基于 SOAP 或 REST 的接口传递至 Walrus。
- **Storage Controller (SC)**Eucalyptus 内的这个存储服务实现 Amazon 的 S3 接口。SC 与 Walrus 联合工作，用于存储和访问虚拟机映像、内核映像、RAM 磁盘映像和用户数据。其中，VM 映像可以是公共的，也可以是私有的，并最初以压缩和加密的格式存储。这些映像只有在某个节点需要启动一个新的实例并请求访问此映像时才会被解密。

Eucalyptus 能够很好地用作开发测试环境，或者是用来支撑各种可扩展的 Web 服务。这两个应用场景的共同特点是大量地使用非持久性虚拟机实例（Ephemeral Instance），以及使用弹性块存储（EBS）来保存持久性数据。尽管 Eucalyptus 也支持从弹性块存储启动（Boot from EBS, BfEBS）的持久性虚拟机实例，但是由于架构设计方面的原因，在一个集群中存在大量 BfEBS 实例时整个集群的性能会有所下降。一个集群中 BfEBS 实例的数量越大，集群的性能恶化就越严重。因此，Eucalyptus 上不适合运行大量 BfEBS 实例。

（二）边缘计算

随着 5G、物联网时代的到来以及云计算应用的逐渐增加，传统的云计算技术已经无法满足终端侧“多连接，低时延，大带宽”的需求。

随着边缘计算技术的出现，云计算将必然发展到下一个技术阶段，将云计算的能力拓展至距离终端最近的边缘侧，并通过云边端的统一管控实现云计算服务的下沉，提供端到端的云服务。边缘计算领域的开源项目集中在边缘计算开源平台，主要分为面向边缘云、面向云边融合、面向物联网三类。

1. EdgeGallery

网络运营商的网络边缘，如蜂窝网络基站、中央端局和在网络边缘的小型数据中心等，是用户接入网络的地方，其计算、存储和网络资源也可用以部署边缘计算应用。面向边缘云服务的边缘计算平台着眼于优化或重建网络边缘的基础设施以实现在网络边缘构建数据中心，并提供类似云数据中心的服务。

EdgeGallery 由中国信息通信研究院、中国移动、中国联通、华为、腾讯、紫金山实验室、九州云和安恒信息等八家创始成员发起，其目的是打造一个以“联接+计算”为特点的 5G MEC 公共平台，实现网络能力（尤其是 5G 网络）开放的标准化和 MEC 应用开发、测试、迁移和运行等生命周期流程的通用化。

该平台聚焦 5G 边缘计算场景，通过开源协作构建起 MEC（Multi-access Edge Computing，多接入边缘计算）边缘的资源、应用、安全、管理的基础框架和网络开放服务的参考实现，实现同公有云的互联互通，在兼容差异化异构边缘基础设施的基础上，构建统一的 MEC 应用生态系统。

MEC 为典型的资源边缘化模式，在移动网络边缘提供 IT 服务

环境和云计算能力，实时完成移动网络边缘的业务处理。MEC 将随着 CT 和 IT 深度融合趋势，物联网的兴起、人工智能技术的发展，以及企业对生产数据的安全性、实时性的诉求，持续快速的发展。

在 MEC 场景下，海量的应用将运行在网络边缘进行业务处理，并且应用能够使用网络的开放能力，应用之间也能够互相进行能力提供和消费。

具体来讲，MEC 场景下的 EdgeGallery 致力于：

- 让开发者能更便捷地使用 5G 网络能力，让 5G 能力在边缘触手可及；
- 通过边缘原生的平台架构，让边缘业务可信可管；
- 通过无码化集成、在线 IDE 工具、统一应用入口等实现多元开放的边缘生态，让应用轻松上车，商业可复制，最终实现 5G ToB 生态的繁荣，为企业和社会带来经济价值。

EdgeGallery 还提供边缘侧本地开发验证服务 EG-LDVS（EdgeGallery-Local Development Verfication Service），这是 EdgeGallery 生态的一个重要部件，包含 MEP 和 MEP-Agent 两个组件；还具有服务管理功能、应用服务状态订阅/通知功能以及应用集成插件 mep-agent。

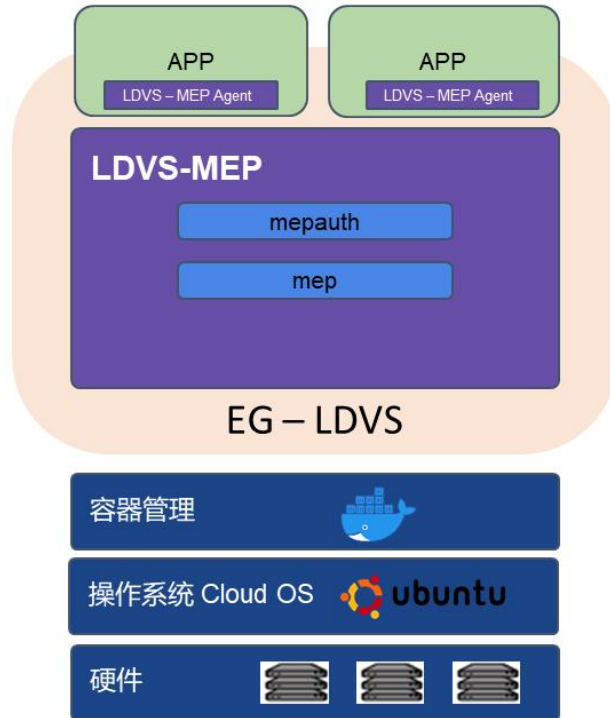


图 6-2 EG-LDVS 结构

该部件通过实现 MEP 相关接口以及行为，支撑应用开发者能够基于本地开发验证服务进行开发。LDVS 基于 MP1 接口（MEP 和应用程序之间的参考点）的实现，为应用开发者提供本地开发以及自验证的能力。作为提供给边缘应用开发者的开发测试套件，EG-LDVS 运行在应用开发者可靠的系统内。

EdgeGallery 平台采用 Apache License 2.0 作为开源代码协议，并已在 Gitee 发布第一批种子代码。目前，EdgeGallery 社区已在深圳和西安建立了两个自动化测试中心，并在北京、南京、上海、东莞等地建成 5 个场景化测试验证中心。

2. CORD

CORD（Central Office Re-Architected as a Data Center）是为网络运营商面向边缘云推出的开源项目，旨在利用软件定义网络（SDN）、

网络功能虚拟化(NFV)和云计算技术重构现有的网络边缘基础设施，并将其打造成可灵活地提供计算和网络服务的数据中心。现有网络边缘基础设施构建于由电信设备供应商提供的封闭式专有的软硬件系统，不具备可扩展性，无法动态调整基础设施的规模，导致资源的低效利用。**CORD** 计划利用商用硬件和开源软件打造可扩展的边缘网络基础设施，并实现灵活的服务提供平台，支持用户的自定义应用。

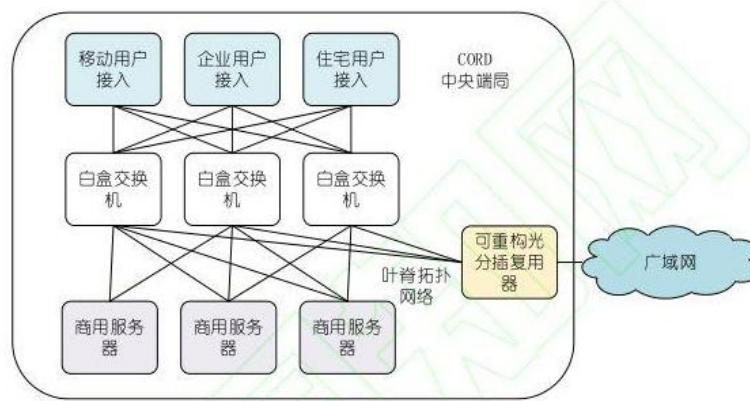


图 6-3 CORD 硬件架构图

图 6-3 为 CORD 的硬件架构图，CORD 利用商用服务器和白盒交换机提供计算、存储和网络资源，并将网络构建为叶脊拓扑架构以支持横向网络的通信带宽需求。此外，CORD 使用专用接入硬件将移动、企业和住宅用户接入网络中。

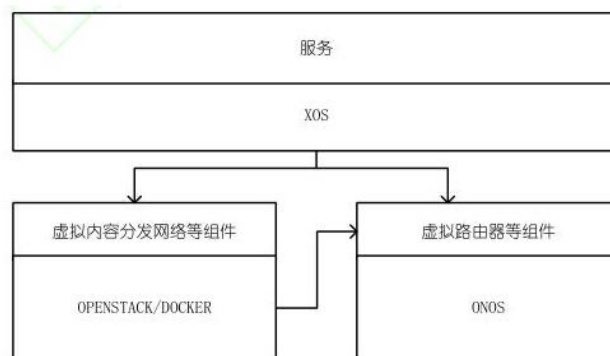


图 6-4 软件架构图

CORD 的软件架构如图 6-4 所示，云平台管理项目 **OpenStack** 用以管理计算和存储资源，创建和配置虚拟机以及提供基础设施即服务（**IaaS**）功能。开源网络操作系统（**ONOS**）为网络提供控制平面，用于管理网络组件如白盒交换网络结构等，并提供通信服务。容器引擎 **Docker** 使用容器技术来实例化提供给用户的服务。服务控制平台 **XOS** 用于整合上述软件，以组装、控制和组合服务。

根据用户类型和使用案例的不同，CORD 可被具体实现为 **M-CORD**、**R-CORD** 和 **E-CORD**。以 **M-CORD** 为例，**M-CORD** 面向无线网络（特别是 **5G** 网络），使用蜂窝网络将用户接入。**M-CORD** 基于 **NFV** 和云计算技术将蜂窝网络功能进行分解和虚拟化，实现网络功能的动态扩展同时增强资源利用率。在此基础上，**M-CORD** 支持多接入边缘服务，为用户提供定制服务和差异化体验质量（**QoE**）。此能力切合具备移动性的边缘计算应用的需求，能通过无线网络为手机、无人车和无人机等移动设备的边缘计算应用就近提供强大的计算能力。**R-CORD** 和 **E-CORD** 同样可以在网络边缘支持住宅用户或企业用户的边缘计算应用，如 **VR** 和 **AR** 应用等，以获得更快的响应时间和更好的服务体验。

对于用户而言，CORD 在运营商网络边缘提供的边缘云服务，具有与云计算相同的优点，即无需用户提供计算资源和搭建计算平台，降低了软硬件和管理成本。此外，有线和无线网络的广泛分布使用户提交边缘计算应用不受地理位置的影响。

3. Azure IoT Edge

云计算服务提供商是边缘计算的重要推动者之一，基于“云边融合”的理念，致力于将云服务能力拓展至网络边缘。目前，亚马逊公司推出了 AWS Greengrass，阿里云公司推出了物联网边缘计算平台 Link IoT Edge，微软公司推出了 Azure IoT Edge 并在 2018 年宣布开源。

Azure IoT Edge 是一种混合云和边缘的边缘计算框架，旨在将云功能拓展至如路由器和交换机等具备计算能力的边缘设备上，以获得更低的处理时延和实时反馈。Azure IoT Edge 运行于边缘设备上，但使用与云上的 Azure IoT 服务相同的编程模型；因此用户在开发应用的过程中除对计算能力的考量外，无需考虑边缘设备上部署环境的差异，还可以将在云上原有的应用迁移至边缘设备上运行。

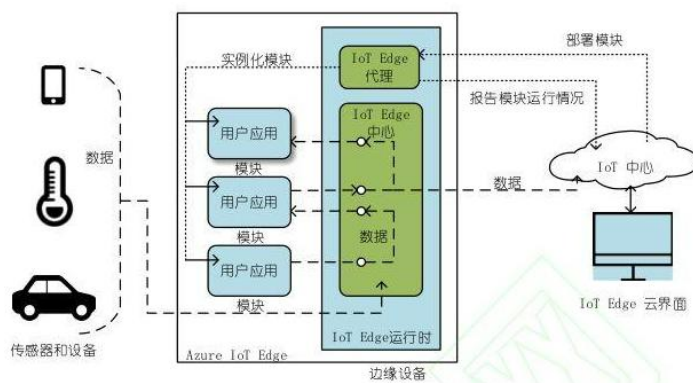


图 6-5 Azure IoT Edge 架构图

如图 6-5 所示，AzureIoTEdge 由 IoTEdge 模块、IoTEdge 运行时和 IoTEdge 云界面组成，前两者运行在边缘设备上，后者则是一个在 Azure 云上提供服务的管理界面：

- IoTEdge 模块。IoTEdge 模块对应于用户的边缘计算应用程序

序。一个模块镜像即一个 Docker 镜像，模块里包含用户的应用代码，而一个模块实例就是一个运行着对应的模块镜像的 Docker 容器。基于容器技术，IoTEdge 具备可扩展性，用户可动态添加或删除边缘计算应用。由于相同的编程模型，Azure 机器学习和 Azure 数据流分析等 Azure 云服务也可以部署到 IoTEdge 模块，此特性便于在网络边缘部署复杂的人工智能应用，加快了开发过程。

- **IoTEdge 运行时。**IoTEdge 运行时由 IoTEdge 中心和 IoTEdge 代理 2 个组件构成，前者负责通信功能，后者负责部署和管理 IoTEdge 模块，并监测控制模块的运行。IoT 中心是在 Azure 云上的消息管理中心，IoT Edge 中心与 IoT 中心连接并充当其代理。IoT Edge 中心通过 MQTT、高级消息队列协议（AMQP）和 HTTPS 协议获取来自传感器和设备的数据，实现设备接入的功能。此外，IoT Edge 中心作为消息中转站，连接 IoTEdge 模块之间的消息通信。IoTEdge 代理从 IoT Hub 接收 IoTEdge 模块的部署信息，实例化该模块，并保证该模块的正常运行，如对故障模块进行重启，并将各模块的运行状态报告至 IoT 中心。
- **IoT 云界面。**云界面提供了设备管理的功能。用户通过云界面进行添加设备，部署应用和监测控制设备等操作，为用户大规模部署边缘计算应用提供了方便。

Azure IoT Edge 的主要系统特点是强大的 Azure 云服务的支持，

尤其是人工智能和数据分析服务的支持。Azure IoT Edge 具有广阔的应用领域，除了物联网场景，原有在云上运行的应用也可以根据需求迁移至网络边缘上运行。目前 AzureIoTEdge 已有智能工厂、智能灌溉系统和无人机管理系统等使用案例。

4. EdgeXFoundry

面向物联网端的边缘计算开源平台，致力于解决在开发和部署物联网应用的过程中存在的问题，例如设备接入方式多样性问题等。这些平台部署于网关、路由器和交换机等边缘设备，为物联网边缘计算应用提供支持。

EdgeXFoundry 是一个面向工业物联网边缘计算开发的标准化互操作性框架，部署于路由器和交换机等边缘设备上，为各种传感器、设备或其他物联网器件提供即插即用功能并管理它们，进而收集和分析它们的数据，或者导出至边缘计算应用或云计算中心做进一步处理。EdgeXFoundry 针对的问题是物联网器件的互操作性问题。目前，具有大量设备的物联网产生大量数据，需要与边缘计算的应用进行结合，但物联网的软硬件和接入方式的多样性给数据接入功能带来困难，影响了边缘计算应用的部署。EdgeXFoundry 的主旨是简化和标准化工业物联网边缘计算的架构，创建一个围绕互操作性组件的生态系统。

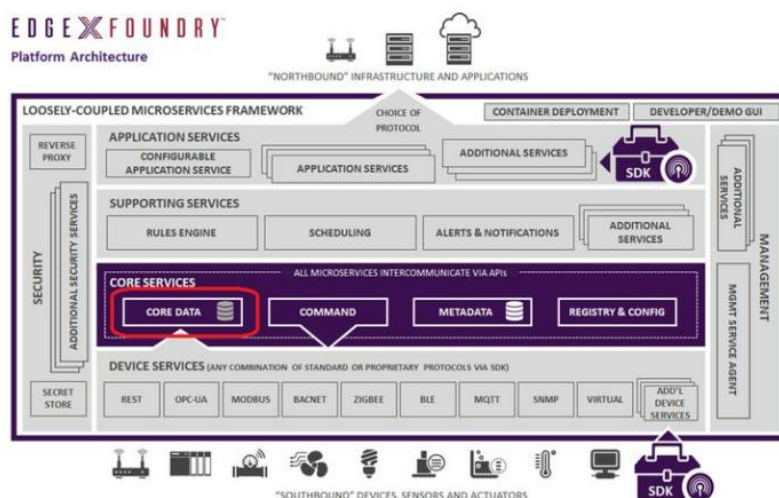


图 6-6 EdgeX Foundry 架构图

图 6-6 展示了 EdgeX Foundry 的架构。在图中的最下方是“南侧”，指的是所有物联网器件，以及与这些设备、传感器或其他物联网器件直接通信的边缘网络。在图的最上方是“北侧”，指的是云计算中心或企业系统，以及与云中心通信的网络部分。南侧是数据产生源，而北侧收集来自南侧的数据，并对数据进行存储、聚合和分析。如图 6-6 所示，EdgeX Foundry 位于南侧和北侧两者之间，由一系列微服务组成，微服务之间通过一套通用的 Restful 应用程序编程接口（API）进行通信。而这些微服务可以被分成 4 个服务层和 2 个底层增强系统服务：

- 设备服务层。设备服务层主要提供设备接入的功能，由多个设备服务组成。每个设备服务是用户根据设备服务软件开发工具包（SDK）编写生成的一个微服务。EdgeX Foundry 使用设备文件去定义一个南侧设备的相关信息，包括源数据格式，存储 EdgeX Foundry 中的数据格式以及对该设备的操作命令

等信息。设备服务将来自设备的数据进行格式转换，并发送至核心服务层。目前，EdgeX Foundry 提供了消息队列遥测传输协议（MQTT）、ModBus 串行通信协议和低功耗蓝牙协议（BLE）等多种接入方式。

- 核心服务层。核心服务层由核心数据、命令、元数据、注册表和配置 4 个微服务组件组成。核心数据微服务存储和管理来自南侧设备的数据、元数据微服务存储和管理设备的元数据。命令微服务将定义在设备文件的操作命令转换成通用的 API，提供给用户以监测控制该设备。注册表和配置微服务存储设备服务的相关信息。
- 支持服务层。支持服务层提供边缘分析和智能服务，以规则引擎微服务为例，允许用户设定一些规则，当检测到数据满足规则要求时，将触发一个特定的操作。例如规则引擎可监测控制温度传感器，当检测到温度低于 25 度时，触发对空调的关闭操作。
- 导出服务层。导出服务层用于将数据传输至云计算中心，由客户端注册和分发等微服务组件组成。前者记录已注册的后端系统的相关信息，后者将对应数据从核心服务层导出至指定客户端。
- 系统管理和安全服务：系统管理服务提供安装、升级、启动、停止和监测控制 EdgeX Foundry 微服务的功能。安全服务用以保障来自设备的数据和对设备的操作安全。

EdgeX Foundry 的设计满足硬件和操作系统无关性，并采用微服务架构。EdgeX Foundry 中的所有微服务能够以容器的形式运行于各种操作系统，且支持动态增加或减少功能，具有可扩展性。EdgeX Foundry 的主要系统特点是为每个接入的设备提供通用的 Restful API 以操控该设备，便于大规模地监测控制物联网设备，满足物联网应用的需求。EdgeX Foundry 的应用领域主要在工业物联网，如智能工厂、智能交通等场景，以及其他需要接入多种传感器和设备的场景。

（三）云原生

云原生是一种构建和运行应用程序的方法，是一套技术体系和方法论。云原生（CloudNative）是一个组合词，Cloud+Native。Cloud 表示应用程序位于云中，而不是传统的数据中心；Native 表示应用程序从设计之初即考虑到云的环境，原生为云而设计，在云上以最佳架构运行，充分利用和发挥云平台的弹性和分布式优势。

云原生的概念是不断发展的。Pivotal 公司的 Matt Stine 于 2013 年首次提出云原生（CloudNative）的概念；2015 年，云原生刚推广时，Matt Stine 在《迁移到云原生架构》一书中定义了符合云原生架构的几个特征：12 因素、微服务、自敏捷架构、基于 API 协作、扛脆弱性；到了 2017 年，Matt Stine 又将云原生架构归纳为模块化、可观察、可部署、可测试、可替换、可处理 6 特质；而 Pivotal 最新官网对云原生概括为 4 个要点：DevOps+持续交付+微服务+容器。

虽然 Heroku、Pivotal、CNCF 等众多厂商对云原生下了不同的定义，但本质上都是构建了一个容易观测、松耦合、容错性高的系统。接下来，对云原生领域的重要开源项目进行介绍。

1. Docker

Docker 是一种运行于 Linux 和 Windows 上的软件，用于创建、管理和编排容器。Docker 是在 GitHub 上开发的 Moby 开源项目的一部分。Docker 公司，位于旧金山，是整个 Moby 开源项目的维护者。Docker 公司还提供包含支持服务的商业版本的 Docker。

2013 年 3 月 Docker 创始人 Solomon Hykes 在 PyCon 大会上的演讲中首次公开介绍了 Docker 这一产品，之后 dotCloud 发布了 Docker 的首个版本，并将 Docker 源码进行开源。在 2013 年 PyCon 大会之后，Docker 的创新式镜像格式以及容器运行时迅速成为社区、客户和更广泛行业的实际标准和基石。Docker 的强大之处在于它通过可移植的形式和易于使用的工具在应用程序和基础设施之间创造了独立性。其结果是，Docker 将容器技术大众化，并解决了困扰数百万开发人员的“matrix from hell”问题，使容器技术成为主流。

Docker 开源项目包含一系列可以从 Docker 官网下载和安装的工具，比如 Docker 服务端和 Docker 客户端。该项目在 2017 年于 Austin 举办的 DockerCon 上正式命名为 Moby 项目。其三大组件为镜像、容器、仓库：

- 镜像：镜像可以用来创建 Docker 容器的。一个镜像可以包含

一个完整的操作系统环境和用户需要的其它应用程序，**docker** 的镜像是只可读的，一个镜像可以创建多个容器。

- 容器：容器是镜像创建的实例。它可以被启动、开始、停止、删除。每个容器都是相互隔离的、保证安全的平台。
- 仓库：仓库是集中存放镜像文件的场所。每个仓库中又包含了多个镜像，每个镜像有不同的标签（tag）。

容器化技术是云计算时代的基石，而 **docker** 作为管理和编排容器的重要工具，可以实现应用的快速构建和分发部署，推动 **DevOps** 的实现，是微服务架构的关键实现工具。

2. Kubernetes

Kubernetes (K8S) 是 2015 年 **Google** 开放的一个以容器为中心的基础架构，是一个在物理集群或虚拟机集群上调度和运行容器并提供容器自动部署、扩展和管理的开源平台。**K8S** 构建于 **Docker** 之上，提供应用部署、维护、扩展机制等功能。开发者利用 **K8S** 能方便地管理跨机器运行容器化的应用，实现更加高效、灵动的容器管理。本质上，**K8S** 可以看作是基于容器技术的 **mini-PaaS** 平台。

2019 年 9 月，ONS 会议上介绍了如何配置 **Kubernetes** 集群；2020 年 3 月，**Kubernetes 1.18** 版本发布，由 38 个增强组成：15 个增强改为稳定，11 个增强改为 **beta**，12 个增强改为 **alpha**。**Kubernetes 1.18** 是一个“适合和完成”的版本。为了确保用户有更好的体验，重点在于改进 **beta** 版和稳定的特性。在 **alpha**、**beta** 和稳定性方面有几乎同样多的增强是一个巨大的成就。这显示社会各界在改善 **Kubernetes**

的可靠性、扩展现有功能等方面所作出的巨大努力。

Kubernetes 主要有 **master** 和 **node** 两大组件。**Master** 组件提供集群的管理控制中心，可以在集群中任何节点上运行。但是为了简单起见，通常在一台 **VM/机器** 上启动所有 **Master** 组件，并且不会在此 **VM/机器** 上运行用户容器。节点组件运行在 **Node**，提供 **Kubernetes** 运行时环境，以及维护 **Pod**。**Kubernetes** 是 **Google** 开源的一个容器编排引擎，具有以下特点：

- 可移植：支持公有云，私有云，混合云，多重云（**multi-cloud**）
- 可扩展：模块化，插件化，可挂载，可组合
- 自动化：自动部署，自动重启，自动复制，自动伸缩/扩展

在云原生概念中，**docker** 只是解决服务下层的问题，服务上层建筑如容器编排、服务发现等问题已经超越了 **docker** 的管辖，所以 **kubernetes** 应运而生。**Kubernetes** 提供的编排和管理功能，轻松完成大规模容器部署，借助 **k8s** 的编排功能，用户可以构建跨多个容器的应用服务，实现跨集群调度，扩展容器，以及长期持续管理这些容器的健康状况等，并整合网络，存储，安全性，监控及其他服务，提供全面的容器基础架构，推动 **devops** 的实现。

3. Envoy

Envoy（或 **Envoy Proxy**）是一个为云原生应用程序设计的开源边缘和服务代理。它由 **Lyft** 创建，是一个专门为单一服务和应用程序设计的高性能 **C++** 分布式代理，还是一个专为大型微服务网格（**Service Mesh**）架构设计的通信总线和通用数据平面。**Envoy** 基于

对 Nginx、HAProxy、硬件负载均衡器和云负载均衡器等解决方案的学习，与每个应用程序一起运行，通过以一种与平台无关的方式提供通用功能来实现网络抽象。

这里不得不提到 **Service Mesh**，**Service Mesh** 又译作“服务网格”，作为服务间通信的基础设施层，用于促进微服务之间的服务对服务通信，可以将它比作是应用程序或者说微服务间的 **TCP/IP**，负责服务之间的网络调用、限流、熔断和监控。拥有这样一个专用的通信层可以提供许多好处，比如提供通信的可观察性、提供安全连接，或者自动化失败请求的重试和回退。对于编写应用程序来说一般无须关心 **TCP/IP** 这一层，同样使用 **Service Mesh** 也就无须关系服务之间的那些原来是通过应用程序或者其他框架实现的事情，比如 **Spring Cloud**、**OSS**，现在只要交给 **Service Mesh** 就可以了。

Envoy 既可作为独立代理层运行，也可作为 **Service Mesh** 架构中数据平面层，因此通常 **Envoy** 跟服务运行在一起，将应用的网络功能抽象化，**Envoy** 提供通用网络功能，实现平台及语言无关性。除此之外，还有以下功能：

- 优先支持 **HTTP/2** 和 **gRPC**，同时支持 **Websocket** 和 **TCP** 代理。
- **API** 驱动的配置管理方式，支持动态管理、更新配置以及无连接和请求丢失的热重启功能。
- **L3/L4** 层过滤器形成 **Envoy** 核心的连接管理功能。
- 通过与多种指标收集工具及分布式追踪系统集成，实现运行

时指标收集、分布式追踪，提供整个系统及服务的运行时可见性。

- 内存资源使用率低，sidecar 是 Envoy 最常用的部署模式。

当基础设施中所有的服务流量流经 Envoy 网格时，可以很容易地在一个地方通过一致的可观察性来图形化问题区域、调整总体性能以及添加底层功能。总之，Envoy Proxy 是一种服务网格工具，可以帮助组织为生产环境构建容错系统。

4. Prometheus

Prometheus 是一个开源系统监控和警报工具包，最初是在 SoundCloud 上构建的。自从它在 2012 年成立以来，许多公司和组织已经采用了 Prometheus，并且这个项目有一个非常活跃的开发人员和用户社区。它现在是一个独立的开源项目，并且独立于任何公司进行维护。Prometheus 在 2016 年加入了云本地计算基金会，成为继 Kubernetes 之后的第二个托管项目。

Prometheus 以时间序列数据的形式收集和存储度量数据，也就是说，度量信息与记录它的时间戳一起存储，与称为标签的可选键值对一起存储。它的主要特点是：

- 多维数据模型，通过公制名称和密钥/值对识别时间系列数据
- 使用一种灵活的查询语言 PromQL
- 不依赖分布式存储；每个服务器节点是自主的
- 通过 Http 的拉取模型进行时间序列的搜集
- 通过中间网关支持时间序列的上传

- 通过服务发现或静态配置发现目标
- 支持图形和仪表板等多种模式

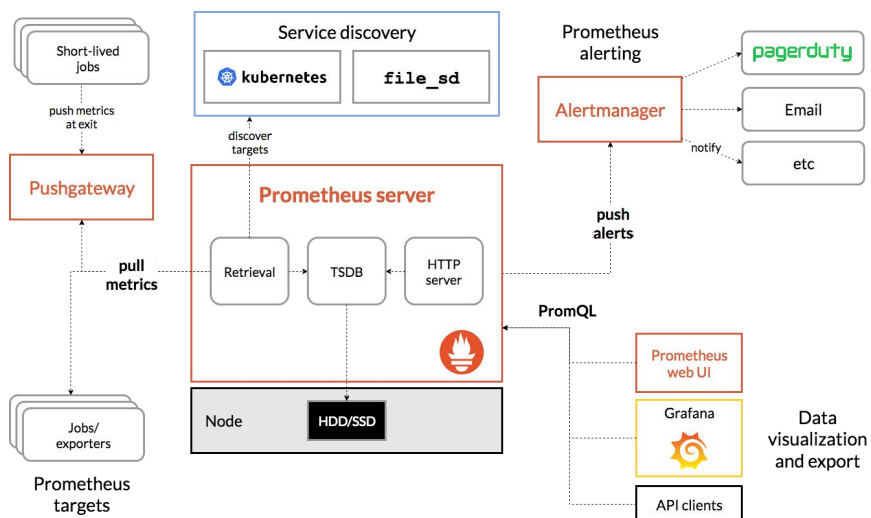


图 6-7 Prometheus 功能架构图

如图 6-7 所示 Prometheus 由许多组件构成，其中很多都是可选的：

- **Prometheus Server**: 抓取和存储时间序列
- **Client libraries**: 检测应用程序代码
- **Pushgateway**: 支持短时间的工作
- **Exporters**: 用于其他服务的接入，比如 HAProxy、StatsD、Graphite
- **Alertmanager**: 处理警报

Prometheus 适合记录任何单纯的数字时间序列。它既适合以机器为中心的监控，也适合高度动态的服务型架构的监控。在微服务领域，它在多维数据收集和查询的支持具有特殊的优势。Prometheus 专为可靠性而设计，即使在设备中断期间也能使用，能够快速地诊断故障。

每个 Prometheus 服务器都是独立的，不依赖于网络存储或其他远程服务。当基础设施的其他部分被破坏时仍能够使用，并且在使用时不需要提供其他的基础设施环境。

(四) 结语

相比于网络领域，云领域已经在开源道路上领先一大步，各种开源项目和技术趋于成熟，应用场景趋向明确。最为显著的成果就是大量企业上云、数字化转型的实践落地。基于中心化数据中心的混合云、私有云已经实现了云计算、云原生领域等各种开源成果的广泛应用。而随着 5G、物联网、AI 等新业务、新需求的出现，边缘计算、边缘云成为云领域技术进一步发展的爆发点。在未来，网络边缘云技术的补充能够填充云领域新的一块拼图，在“最后一公里”迸发云的新生命力。

七、开源技术产业发展情况

开源软件不仅影响了产业的发展方向，同时开源能力也渐渐成为技术实力的象征之一。无论是社区本身，还是参与其中的众多开发者，都能在良性的互动中，相互促进，获得快速且长足的发展。开源已成为各行各业技术战略的关键，开发者对开源的采用都在持续增长。在开发过程中使用开源可增加技术创新速度、降低成本并提高质量。越来越多电信运营商、企业、高校和研究所开始加入到开源社区当中，在从开源社区汲取强大生命力的同时，也在向开源社区作出贡献，极大推进了技术的发展。

（一）电信运营商

1. 中国联通

在开源项目方面，中国联通积极推进新一代数字化基础设施的开源项目。2019年，中国联通在 ONF 启动开源 SD-RAN，MEAC，白盒数据中心交换机三个项目，进一步全方位推进网络设备及边缘数据中心开放。2020年，中国联通积极推进无线接入网的开放与开源工作，通过参加 O-RAN 联盟，在各工作组中积极贡献，联通所提标准提案已经成功输出到 O-RAN 联盟正式发布的标准规范中，同时利用 O-RAN-SC 软件社区积极探索开源云基站平台的建设，2021年9月，中国联通联合合作厂家成功发布基于开源云平台的多功能一体化云基站 CUBOX1.0，它采用 OpenNESS 轻量级云原生平台、实现基站、数据转发和边缘业务在同一平台部署。2020年，中国联通还在 TIP 成功牵头立项业内首个开源组织 5G 室内云基站项目，发布多本技术规范，推进多款设备集成。

近年来，中国联通立足 5G，放眼 6G，以推进通信网络向新一代数字化基础设施转型为目标，提出了面向云边端的解耦集约智能服务型网络架构 CUBE-Net 3.0。项目以 CubeAI 算能服务平台为开源规划先导，在开发之初就确定了全栈开源的目标。2021年7月，CubeAI 经过申请和专家委员会评审成功在 OpenI 启智开源社区立项，开源项目包括 CubeAI 算能服务平台、CubeAI 模型样例、ServiceBoot 微服务基座、ibootAI 模型服务化引擎和 PyPI 本地代理五个项目，希望在 CubeAI 开源项目实践基础上，进一步推进中国联通 CUBE-Net3.0 重

大创新工程相关软件项目的开源工作，与业界共同完善开源生态建设。

在开源社区建设方面，中国联通多年来一直积极尝试和推动开源技术在电信行业领域内的研究与应用。联通在 2016 年发起成立“中国 CORD 产业联盟”（Center Office Re-architected as Datacenter，机房重构数据中心），依托 ONF（开放网络基金会）整合传统运营商、制造商、芯片厂商、软件服务商等各方优势资源的同时，将开源开放的理念引入到合作中。在云计算和云原生等开源基础设施领域，中国联通是国内较早基于 OpenStack 等开源项目开展云计算基础设施建设的电信运营商，中国联通自研云计算基础设施基于 OpenStack 进行开发和投入生产，并且积极参与 OpenStack 新版本的开发和升级。在通信云的建设过程中，同样联合设备厂商诸如华为、中兴等，积极推进通信云云化建设和适配等工作，并且将相关的需求和改进技术反馈至社区。在云原生方面，中国联通是较早拥抱云原生和采用云原生的国内电信运营商，其中联通自研开发的云原生服务编排平台“天官”早期是基于 CNCF 社区的开源项目（docker、mesos 和 kubernetes）等来实现电信运营商 B 域全流程生产系统的服务编排系统，并且基于云原生的生产理念，结合 CNCF 的多个开源项目，打造了“天官、天梯、天眼、天擎”的生态系统，支撑集团推进全面数字化转型。目前，“天官”已经获得 CNCF 社区的认证。

在其他开源社区推进方面，中国联通是积极推进 Ceph 社区的联合发起者，积极推进 Ceph 的生产落地和社区贡献。同时，在开源操作系统方面，联通沃云积极推进 OpenEula 和沃云的适配和对接工作，

并且在 OpenEula 开源社区作为维护者和组织者负责代码维护和技术委员会的召集人。在开源峰会上面，中国联通作为 OpenStack 社区的黄金会员以及 CNCF 社区会员，持续几年在峰会上分享中国联通在开源方面的实践经验，并且在 2021 年的 OpenInfra China Days 峰会上，牵头和组织了算网融合分论坛，积极探索 OpenInfra 下一个十年在国内通信领域的发展需求和新的技术应用场景。

2. 中国移动

在开源项目方面，中国移动牵头创建和参与了众多开源项目，涉及云计算、SDN/NFV、网络编排、下一代网络、5G、边缘计算、云原生等。早在 2015 年，中国移动就在 OPNFV 开源社区牵头电信高可用平台 High Availability 项目，之后的几年，在 OPNFV 社区又先后发起 DPACC、Container4NFV、C-RAN、Rocket、Edge Cloud 等多个具有重要意义的开源项目，并全面参与到 OPNFV 开源社区的所有开源项目中。2016 年 2 月中国移动在 Open-O 开源社区牵头 Portal、NFVO、VNFM 等 3 个开源项目，积极支持社区的其他开源项目。2017 年 3 月，中国移动和 AT&T 共同推动 Open-O 和 Open-ECOMP 两个开源项目合并成为 ONAP 项目，中国移动继续牵头 UUI、VFC 等子项目。2019 年 4 月，中国移动积极推动 O-RAN 与 Linux 基金会成立 O-RAN SC 开源社区，作为重要贡献者助力 O-RAN 发布第一版开源软件代码，并担任 O-CU 和 DOC 项目技术领导者（PTL）职位。2021 年 4 月，中国移动研究院联合多个合作伙伴发布全球首个 SRv6 系统开源项目，加快 SRv6 商用进程，推动云网融合发展。除了牵头主导

的开源项目，中国移动还积极参与到 OpenStack、CNCF、TIP、ONF、Akraio、Edgegallery 等多个开源社区的项目中。

在开源社区建设方面，2014 年，中国移动联合 AT&T、Orange 等主流运营商，及爱立信、华为等主流设备商，牵头成立运营商第一个开源组织 OPNFV，并于 2015 年建立了亚洲第一个 OPNFV 实验室。2016 年 2 月中国移动联合 Linux 基金会和华为发起成立 Open-O 倡议，成立全球首个 NFV/SDN 统一协同编排器开源社区。2016 年 10 月，中国移动以黄金会员身份加入 OpenStack 基金会，当年还获得超级用户大奖，体现了社区对中国移动基于 OpenStack 构建大规模云计算平台探索的认可。2017 年 4 月 6 日，在全球规模最大的开放网络峰会（ONS 2017）上，中国移动联合 AT&T 和 Linux 基金会进行主旨发言，共同宣布启动全球最大的 NFV/SDN 网络协同与编排器开源社区 ONAP——（Open Network Automation Platform），整合 Open-O 和 ECOMP 社区所有的开源项目，中国移动担任当选 ONAP 总裁职务。2018 年，全球最大的开源网络基金会 Linux 网络基金会成立，中国移动先后担任董事会副主席和主席职务，成为我国运营商代表首次在顶级国际开源社区担任的最高领导职务。为打造更加开放、软件化、智能化的无线接入网，中国移动联合国内外多家运营商和设备制造商，于 2018 年发起成立 O-RAN 联盟，并积极推动 O-RAN SC 开源社区成立，作为重要贡献者助力 O-RAN SC 发布第一版开源软件代码。2020 年 5 月，中国移动主导发起 XGVela 项目，探索并推动 5G 云原生 PaaS 平台原型，为未来网络发展奠定基础，加速运营商网络向云

原生转型。

借助开源社区的力量，中国移动快速构建了团队和能力，在云计算、大数据等领域，已经成为业界一支重要的力量，具备一定的话语权。中国移动将秉承“开放、创新、合作、共赢”的态度，积极引领 ICT 领域开源，推动产业加快创新。

3. 中国电信

在开源项目方面，中国电信云研发团队通过 OpenStack 轻量化改造、多边缘节点汇聚管理、VIM 增强对裸金属服务器管理承载容器平台、VIM 对异构资源管理、边缘节点 PIM 功能实现等面向 MEC 的云管平台机构优化设计与功能增强，完成了 MEC 系统及典型服务能力研发与验证，构建了中国电信特色 MEC 开放能力及面向垂直行业服务能力的“双能力”统一管理模式，结合 5G 试验网，开展 MEC 应用示范，深入打造中国电信 MEC 产业生态。中国电信智能云网团队遵从“国产化+自主可控”的技术发展战略方针，匹配电信行业的需求，按照 ETSI NFV 架构研发的一套面向 CT 资源池的三层解耦架构的基础设施虚拟化管理系统，应用于 5GC、MEC、5G 视频彩铃、来电名片，IMS 防欺诈等场景，通过对资源池内的物理设备和虚拟对象的高效监控和精细化管理，实现资源池能力最大化。

在开源社区建设方面，中国电信明确提出在网络重构过程中优选开源技术，已在主流开源社区建立了影响力。自 2012 年 OpenStack 基金会成立之日起，便关注研究 OpenStack，并从 2016 年起成为 OpenStack 基金会的黄金会员。作为全球重要的运营商，中国电信不

断深入应用 OpenStack 统一管理内部业务、IT 和网络云资源池。产品方案的成熟落地与生态完善使中国电信成为中国 OpenStack 发展的强力推动者和最佳实践者之一。2020 年，OpenStack 基金会改组升级为开源基础设施基金会，中国电信承接此次升级，基于开源技术的协作创新，参与贡献越来越多的开源基础设施项目，聚焦“三个统一管理”，助力开启全球社区服务最佳体验新纪元。中国电信云研发团队通过 OpenStack 轻量化改造、多边缘节点汇聚管理、VIM 增强对裸金属服务器管理承载容器平台、VIM 对异构资源管理、边缘节点 PIM 功能实现等面向 MEC 的云管平台机构优化设计与功能增强，完成了 MEC 系统及典型服务能力研发与验证，构建了中国电信特色 MEC 开放能力及面向垂直行业服务能力的“双能力”统一管理模式，结合 5G 试验网，开展 MEC 应用示范，深入打造中国电信 MEC 产业生态。未来，中国电信将继续秉持开源开放的态度，进行 5G SA 组网建设，依托开源基础设施社区在混合云、边缘计算、5GC、5G 视频彩铃、来电名片，IMS 防欺诈等领域全力推进开放合作，推动行业和企业持续健康发展。

4. AT&T

AT&T 为电信行业内的开源做出了巨大的努力，在整个开源生态体系中扮演着重要的角色。AT&T 在 2014 年提出网络软件化比例要在 2020 年达到 75%，整个公司将变成一个“软件公司”。在这之后，围绕着软件定义网络、数据驱动一切以及 5G 网络的演进，AT&T 开展了大量不同于传统电信运营商的工作，AT&T 也逐渐变得更加开放。

2018 年 AT&T 计划在美国市场部署 5G 网络服务，这一年 AT&T 给出的软件化比例是 65%。在软件化领域，AT&T 为节约成本，更快地重新配置和部署新服务，AT&T 使用内部开发的自动化软件控制器取代了实体设备。2020 年，AT&T 有望实现核心网络 100% 虚拟化。AT&T 计划采用 RedHat 开源平台来管理 5G、边缘计算和物联网(IoT)中的工作负载和多云功能。

在开源项目方面，AT&T 在 github 上管理着 98 个项目，AT&T 的开源项目主要面向如下几个领域展开布局：针对网络云服务的 ONAP 操作系统项目，全球超过 50 个网络和云运营商参与该项目；针对虚拟网络环境的白盒服务器操作系统项目 DANOS；针对边缘计算的 Akraino Edge Stack 全软件平台，以及 Tech Mahindra 给 Linux 基金会托管的 AI 和机器学习平台 Acumos。AT&T 于 2017 年初向 Linux 基金会贡献了 800 万行 ECOMP 代码，并且将其 ECOMP 项目开源，随后 ECOMP 项目与 Linux 旗下中国运营商主导的 Open-O 项目合并成为新的开放网络自动化平台（ONAP）项目。

在开源社区建设方面，AT&T 与开源社区有着悠久的历史，包括 OPNFV 项目、原生云计算基金会、开放容器计划、OpenStack、ON.Lab、ONF、OpenDaylight 最终用户咨询委员会等。2017 年，AT&T 加入 Linux 基金会成为白金会员。

5. Verizon

在开源项目方面，Verizon 在其产品和服务中使用开源操作系统和软件，同时在 github 上管理着 34 个项目，包括 YANG-transformer、

YANG-validator、safecache、redshell 等，包含 5G、网络边缘、边缘计算、虚拟化技术等领域。Verizon Terremark 的基于 Linux 和 Xen 管理程序的 Verizon Cloud 于 2014 年 10 月发布，它包括基础设施即服务(IaaS)平台、Verizon Cloud Compute 和基于对象的存储服务 Verizon Cloud Storage。

在开源社区建设方面，Verizon 致力于开放源码社区，并参加了几个开放源码联盟。在 2014 年 3 月 25 日加入开源发明网络（OIN），是第一家加入 OIN 社区的主要电信服务提供商。Verizon 还加入了 Linux 基金会赞助的 Xen 项目，作为 Xen 成员，这家电信巨头向 Xen 代码库添加了大量内容，例如帮助其支持 VMWare 工作负载。2018 年，Verizon 正式加入开放网络自动化平台（ONAP），成为该项目的第八位铂金电信运营商成员。Verizon Terremark 是 Verizon 的云业务部门，已加入 Linux 基金会

（二）互联网公司

1. 华为

在开源项目方面，2019 年，华为全面提出了软件开源的战略，而其中开源的重心则落在了基础软件层面。华为主动发起创立的 openEuler, MindSpore, EdgeGallery, OpenHarmony 等多个重量级项目，在国内外开源界引起巨大反响，围绕着计算，联接和移动终端等领域的多个开源项目的生态系统正在快速形成。2020 年 7 月，华为正式宣布开源数据库能力，开放 openGauss 数据库源代码，并成立 openGauss 开源社区。2021 年 4 月，云原生多云容器编排项目 Karmada

正式开源，未来还计划将该项目捐赠给云原生计算基金会 CNCF。

在开源社区建设方面，华为公司是国内最早建立开源战略管理的企业之一，早在 2008 年华为就成立了开源能力中心，对使用开源代码进行严格的合规管理，积极参与国际主流社区，建立规范的知识产权管理和开源社区协同创新机制，并在华为内部建立了《安全合规使用开源软件的规则与流程机制》，明确使用开源的过程中，积极回馈社区，在包括 Kernel 在内的许多社区的开源代码进行优化，积极贡献和回馈社区，社区贡献度和影响力快速提升。2014 年华为成立了由轮值 CEO 牵头的华为最高开源决策机构，构建了对应的开源战略决策机制及战略管理流程。2012 年开始，华为陆续在诸多国际开源社区、开源基金会成为顶级会员和核心贡献者。华为是国际主流开源基金会的顶级成员：Linux 基金会的白金会员、Apache 基金会的白金赞助方、OpenStack 基金会的白金会员、Eclipse 基金会的战略会员，同时，也是大量热点领域主流开源项目的初创成员和核心贡献者，影响力持续提升，华为目前在有重大国际影响力的开源社区中拥有十多个董事席位，及 200 多个 TSC、PTL、Core Committer 席位。华为坚持上游社区优先原则，持续加强在 Linux、Apache、Kubernetes、CNCF、OpenStack、OCI、ONAP、OPNFV、Akraino、Acumos、Hadoop、Linaro 等主流社区贡献，深度参与全球开源组织，为社区积极贡献力量。华为目前在主流开源社区中拥 200 多个 TSC、PMC、PTL、Maintainer、Committer 等席位，以及十多个董事席位服务于各开源项目。在全球第一大社区 Linux 内核社区中，华为综合贡献全球排名第

四；云原生社区 CNCF，华为综合贡献全球排名第五；Docker 全球排名第 5；云原生领域的核心项目 Kubernetes 中，华为综合贡献全球排名第五，亚太排名第一；Istio 项目中，华为贡献全球排名第三，亚太排名第一，还成为了该项目首届 SC 委员。

2. 阿里

在开源项目方面，阿里自 2010 年至今累计开源项目累计超过 2800 个，代表性的包括 Alibaba Cloud Linux2、Apache RocketMQ、Apache Dubbo、Spring Cloud Alibaba、OpenYurt、Graph-Learn、AliOS Things 等，覆盖中间件、操作系统、云原生、大数据、数据库、AI、AIoT、前端、硬件等众多技术领域。全球超过 3 万 1 千名开发者为阿里开源项目贡献代码，Github Star 超过 110 万个，并被众多企业使用。根据 x-lab 开放实验室发布的《Github 2020 数字洞察报告》，阿里开源项目的活跃度在国内企业中排名第一。在 2017 年，由阿里发起的分布式消息领域的国际标准 OpenMessaging 开源项目正式入驻 Linux 基金会，这是首个由中国在全球范围发起的分布式计算领域国际标准。2021 年 5 月，阿里云开发者大会上，阿里巴巴宣布开源云原生数据库能力，对外开放关系型数据库 PolarDB for PostgreSQL 源代码，服务百万开发者，与社区开发者一起共建云原生分布式数据库生态。10 多年来，阿里始终坚持先自行验证，再对外开源的策略，构建起一个良性的开源生态。

在开源社区建设方面，阿里积极参与开源社区建设，受邀成为十多个国内外开源基金会成员，积极贡献开源，是 Linux、MySQL、JVM、

K8s、etcd、Apache Flink 等国际知名开源项目的核心贡献者和维护者，是与社区合作最为紧密的中国公司之一。阿里也积极和开源基金会及开源组织合作，受邀成为十多个国内外开源基金会或开源组织的成员，是 Java 全球管理组织 JCP 最高执行委员会的唯一中国代表，也是中国开放原子开源基金会、Linux、Apache、CNCF、RISC-V、OCI 等基金会和开源组织的重要成员。阿里的开源战略正在从技术拥抱向创新引领演进。阿里一直保持与开源社区的密切沟通，未来，阿里也会建立自己的开源社区，以更快的响应速度来解决更多业务问题和需求。

3. 百度

在开源项目方面，百度公司很早就将开源战略聚焦在新一代信息技术的创新引领上，目前百度已发布的开源项目超过 1000 个，共吸引社区贡献者 2 万名以上，共获得 GitHub Star 总数超过 30 万个。百度这些开源项目围绕着安全、监控、知识图谱、网络与接入、视觉、量子计算、开发框架等 20 个技术领域展开。其中尤为值得关注的是其开源深度学习平台飞桨(PaddlePaddle)以及开放自动驾驶平台 Apollo，这两个项目在其各自领域处于领先的地位。2019 年 5 月，百度基于持续多年在区块链技术与应用领域的研究与探索，推出了完全自主知识产权的区块链底层技术——超级链(XuperChain)并正式开源，现已成为国内最具影响力的区块链开源技术之一。

在开源社区建设方面，百度已向国内外基金会捐赠了 9 个项目进行孵化，包括 Apache 软件基金会（4 个）、Linux 基金会（3 个）、云原生计算基金会（1 个）、开放原子开源基金会（1 个），目前 Apache

ECharts 已经毕业成为顶级项目。百度深度参与国内外顶级开源基金会和组织，既是 Apache 基金会、Linux 基金会以及云原生计算基金会的金牌会员，其旗下 Echarts、Doris、Brpc 等多个项目已经成为 Apache 基金会孵化项目，Baetyl、IME、EDL 等项目入选了 Linux，百度 BFE 更是成为云原生计算基金会中，第一个来自中国的网络方向沙箱项目。此外，2019 年，百度战略投资了开源中国，这是中国最大的开源技术社区，旗下运营的 Gitee 代码托管平台是全球仅次于 GitHub 的代码托管平台，百度大力支持中国自主代码托管平台建设，以应对复杂国际形势下带来的封闭风险。百度公司开源战略的特点在于内外结合，通过开源促进内部协同和建设外部生态。在内部大力推进内部开源规范和社区氛围建设，提升员工对开源价值认可以及参与热情，为对外开源和参与外部开源打下良好基础。从内源储备潜力项目到对外开源建设开发者社区生态，再到捐赠顶级基金会进行孵化，最终成为顶级基金会项目，形成开源项目的完整成长和支持路径。2020 年 6 月，百度宣布正式加入历史上最大的开源和 Linux 专利保护组织 The Open Invention Network (OIN)，旨在推动 Linux 技术发展以及保护开源公司的知识产权不受侵犯。

4. 腾讯

在开源项目方面，腾讯在 Github 上发布了超过 110 个精品开源项目，覆盖云原生、大数据、AI、移动开发、Web 开发五大技术领域，获得了超过 33 万的 GitHub Star，稳居全球开源企业贡献榜前十，腾讯已经成为全球开源贡献最大的科技公司之一。腾讯的开放是从内到

外的一个过程。2010 年的“3Q 大战”后，腾讯开始拥抱“开放”战略，技术研发也在这种环境下开始向共享、复用和开源迈进。从 2016 年底开始，腾讯对外开源开始进入了快节奏时代。过去一年，腾讯加快开源的业务和步伐，以发起者、贡献者两种不同方式积极参与开源。

在开源社区建设方面，腾讯深度参与了数十个国际知名开源项目的贡献，在 OpenJDK、KVM 等多个顶级开源社区贡献榜中，腾讯均在国内排行第一，并作为主要贡献者主导了 7 个国际知名开源项目的版本发布。腾讯还向多个国际顶级开源基金会捐赠了 6 个开源项目，很多业务团队参与贡献 Openstack、KVM、docker、NVDIMM、ceph、HBase、Hadoop、linux、Spark、kubernetes、torrent、dht、goprocinfo、flannel、netlink 等知名开源社区和项目，成为会员和 maintainer，受到国际肯定和认可。是 OpenStack 基金会白金会员，获得 2017 全球 OpenStack Superuser 奖项；Linux Deep Learning 基金会白金会员，并获得董事会席位，增强对公司业务至关重要的 AI 领域在未来国际范围内的领导力；Linux 基金会白金会员，加强腾讯与 Linux 基金会开展深度合作的基础，接触更多开源社区资源；CNCF 黄金会员，腾讯在容器服务、KVM 虚拟化等重大开源项目贡献力量；加入 MariaDB 释放腾讯云数据库 CDB 和腾讯游戏 DBA 的多年积累；加入 Linux Foundation Networking (LFN) 基金会，以银牌会员的身份参与 LFN 项目的维护，规划以及建设。腾讯公司开源战略的执行得益于公司内部完善的开源管理组织结构。腾讯公司设立了开源管理办公室，其下设项目管理委员会、腾讯开源联盟和开源合规组三个机构。开源管理

办公室负责公司自上而下地传递腾讯开源策略，自下而上地落地开源技术生态。同时，通过开放的开源评审平台，孵化和培育优秀的自主开源项目。

腾讯已经将拥抱开源作为公司的整体战略方向之一，制定了“三步走”的开源路线图，持续推动从封闭孤立向协同开放向社区开放治理的纵深方向发展。第一步是内部开源协同。首先拉通内部项目和组织，通过部门小团队作战或跨部门大团队作战的方式协同推进，以优化资源配置的方式集中优势寻求技术突破。随后，腾讯建立起筛选机制将代码开放出来。第二步是外部代码开放。优化设计与代码结构，不断拓展落地场景，有效利用外部贡献者资源实现资源整合，构建技术影响力。第三步是社区开放治理，在这一阶段，注重大规模技术推广与应用、开发者生态体系构建、社区领袖与领导力培养、全社会研发资源的优化配置四个方面。腾讯为自己量身制定了“内外双循环”的开源战略，即“代码开源协同作基础，产品社区商业促进步，打通内外开源双循环。”其中，“内部开源内循环”是通过内部代码开源、开源协同的方式，减少重复投入、提升研发效率、降低运营成本。通过“开源内循环”孵化出的新秀项目以及毕业优秀的开源项目，然后可以输送至外部开源社区。“外部开源外循环”则是以产品、社区、商业的形式进一步创造社会价值及商业价值、促进技术发展及科技创新、提高研发质量和降本增效。通过“开源外循环”引入外部优秀的开源项目，通过外部的新鲜血液促进内部技术持续创新。

5. 微软

微软曾经专注于私有化软件盈利模式，历史上长时期被看成开源世界最大的敌对势力，微软也曾经把开源旗帜项目 Linux 称呼为“毒瘤”。然而近年来微软已经开始向拥抱开源进行转型。2014 年 10 月，出任微软首席执行官的萨提亚·纳德拉，第一次公开宣布“微软爱 Linux”。曾经口中的“毒瘤”，如今成了爱的对象，更是成了核心产品 Windows10 的组成部分。可见微软对开源的态度发生了巨大的转变。

在开源项目方面，微软连续多年占据对开源贡献人数最多的组织榜首，开源了大量优秀项目，如 Visual Studio Code、TypeScript、CNTK、Donnet、PowerShell 等。2014 年，微软首次发布 .NET Core 并将其开源。在重写标准库之后，2016 年 6 月 .NET Core 1.0 实现跨平台（Windows、Linux 和 Mac），这意味着开发者可以使用 Windows 开发而 Linux 部署。2016 年 3 月，Windows 原生支持 Ubuntu Linux Bash，这意味着 Windows 操作系统级别的开放，Win10 可以当作一台 Ubuntu 开发机来使用。同年 3 月，在圣何塞的开放计算项目（OCP）峰会上，微软发布了一个完全开源的 Software for Open Networking in the Cloud (SONiC)。此外，微软称 Azure 全面支持所有开源技术栈，并且从 IaaS（VM），PaaS 和 SaaS（CRM、PowerBI、Office365）全面支持用户的灵活选择。

在开源社区建设方面，作为微软未来三大远见的核心，微软智能云 Azure 已经加入了对 Red Hat Enterprise Linux、Cloud Foundry、

FreeBSD、CentOS 等开源技术的官方支持。2014 年 10 月，微软开放技术作为核心初创成员，联合中国支持开源的企业、社区及个人开发者共同成立了开源社；2016 年 1 月开源社正式成为开放源代码促进会（OSI）联盟成员；微软亚太研发中心开源技术部高级开发经理梁莉，被推选为 FreeBSD 基金会董事。通过积极参与开源社区建设并贡献技术力量，微软已经在国内外开源社区中赢得了广泛的认可。2020 年 6 月，微软宣布以价值 75 亿美元的股票收购了全球领先的软件开发平台 GitHub。未来微软将会作出更多的开源努力。

6. 谷歌

在开源项目方面，谷歌长期以来一直是开源软件的重要推动力量，自己也靠着开源软件形成的生态维护着国外搜索引擎市场的王者地位。开源项目有 Android、TensorFlow、AngularJS、Fuchsia OS、Kubernetes、Chromium、Go 和 Dart 等，涉及云原生、编程语言、操作系统、机器学习、前端、浏览器、视频编码等多种领域。

在开源社区建设方面，谷歌参与并支持众多的开源组织，这些组织在开源世界中发挥着关键作用，如 Apache、Cloud Foundry、Eclipse、Linux Foundation、OCF 等多个组织和基金会。此外谷歌还赞助了许多会议和活动，主要集中在社区主导的活动和围绕核心互联网基础设施的活动。除了引导使用和发布开源软件外，谷歌还努力提高开源组织和社区的可持续性，组织 Google Summer of Code、Google Season of Docs 等活动，推广开源的模式。

7. Facebook

在开源项目方面，据 Facebook 2020 年的开源回顾，Facebook 累计已有 746 个活跃的开源仓库，其中超过 200 个仓库于去年正式公开。Facebook 典型的开源项目有 React、Docusaurus、PyTorch、GraphQL、Presto、RocksDB 等，涉及的领域有移动工具多样化、大数据、客户端 web 库、后台运行时和基础设施，还有通过开放计算项目涉及到的服务器和存储硬件等等，Facebook 的开源项目总共收获到了 128 万个 star，仅去年就新增了超过 12 万个 star。去年 Facebook 工程师与世界各地的开发者对开源代码库进行了超过 127000 次更改，其中约 13% 的改动是由 Facebook 之外的贡献者参与。

在开源社区建设方面，Facebook 致力于为所有希望参与开源社区的人营造包容性环境，创建或参与了大量开源基金会以及开源社区，

2011 年 4 月，Facebook 在其他计算领导者的帮助下启动了开放计算项目(OCP)，旨在以开放和高效的方式分享、促进和促进数据中心硬件社区的创新。2018 年，Facebook 创建开源组织 TODO，用以帮助公司参与开源。同年与 Linux 基金会合作，宣布打算成立一个支持 GraphQL 的基金会。2019 年，另一个 Facebook 开源项目 Presto 也成为了 Linux 基础上托管的基金会。Facebook 于 2020 年成为 Linux 基金会的白金会员。2021 年，Facebook 以最高级别(Platinum Member)的会员身份加入 Rust 基金会，与其他基金会成员一起负责 Rust 开源生态以及社区的运作和发展。此外 Facebook 还是 Apache 基金会的白金会员；

（三）高校与研究所

开源是高校对外进行技术输出的一种有效手段。开源可以让新一代软件人接触到来自现实应用中的真实需求，能培养他们在学校里难以学到的大数据软件开发技能。开源也是一种对世界、对人类的一种无私的回馈，也是对高校师生奉献精神的重要培养渠道。

1. 北京邮电大学

自 2015 年起，北京邮电大学研究团队就加入了 ONOS 开源网络控制器项目，是 ONOS 国内首个高校成员单位，并牵头贡献了故障检测模块，实现了路由环路、路由黑洞、App 冲突等的高效检测。2020 年 6 月，北京邮电大学主办五届开源 5G 论坛，论坛上正式成立开源 5G 联盟，加速推进 5G 开源平台的开发和产业化应用，培育完备的开源 5G 社区，助推 5G 产业落地。同年 12 月，北京邮电大学与法国 Eurecom、OAI 软件联盟联合主办 OpenAirInterface Workshop FALL 2020 Beijing 暨 OS-RAN 开源无线生态峰会，解锁了更多开源无线领域前瞻性的热点议题，深度剖析探讨了行业发展方向及新模式。2020 年，北京邮电大学研究团队联合华为、信通院、中国移动、中国联通、腾讯等单位发起了 EdgeGallery 社区，目的是打造一个符合 5G 边缘“联接+计算”特点的边缘计算公共平台，实现网络能力（尤其是 5G 网络）开放的标准化和 MEC 应用开发、测试、迁移和运行等生命周期流程的通用化。2021 年 4 月 14 日，以“云网智联，助力数智创新”为主题的 2021 中国云网智联大会在北京隆重召开，大会期间，紫金

山实验室联合中国移动、北京邮电大学、英特尔和锐捷网络，正式发布全球首个 SRv6 系统开源项目，加快 SRv6 商用进程，推动云网融合发展。研究团队于 2021 年 5 月 15 日在上海组织承办了首届中国网络开源技术生态峰会，围绕网络数据平面、网络操作系统、云网边端协同等热门议题展开多层次对话交流，推动领域内企业、组织间的紧密广泛合作，促进网络开源技术蓬勃发展。

此外北京邮电大学研究团队还积极参与 P4 开源社区，共开展了十届 P4 实战特训营，收获了学员良好的口碑，掀起了 P4 应用与探索的浪潮；此外，研究团队还基于 P4、ONOS 开发了 G-SRv6，基于未来网络试验设施完成了 G-SRv6 协议的大规模广域网络测试。团队同时积极参与 SONiC 开源社区，基于 SONiC 开发了骨干网级可编程设备操作系统，首次实现了骨干级 MPLS、SR 网络协议，有效推动了 SONiC 在骨干网场景的应用。

2. 清华大学

2018 年 12 月，举办清华开源软件发展峰会，是清华大学在新时代深度参与软件开源创新、落实国家创新发展战略与大数据行动计划的重大举措之一。2020 年 9 月，Apache 软件基金会（ASF）宣布由清华大学发起的 Apache IoTDB 毕业成为 Apache 顶级项目，旨在满足大规模物联网和工业物联网（IoT 和 IIoT）应用对数据、存储和分析的严苛要求，该项目是首个由中国高校发起并孵化成功的 Apache 顶级项目。近年来，清华大学和华为云 FusionInsight 团队以 Apache IoTDB 开源组件为基础，开始一种新型的、基于开源社区的产、学、

研合作模式。

工业互联网时序数据库 **Apache IoTDB** 开源项目实践

作为国家战略的工业互联网是工业 4.0 时代制造业转型升级的核心引擎，其中工业物联网机器设备感知形成了海量工业物联网时间序列数据，是工业大数据的规模与价值主体。其高通量、变模式、低质量等特征对现有数据库软件技术提出了挑战，亟需数据管理核心技术创新。清华大学软件学院自 2011 年持续研究工业大数据系统软件技术，研制了我国高校唯一一款被国际顶级软件开源基金会 **Apache** 接收的工业互联网时序数据库 **IoTDB**。

IoTDB 在数据库物理层、逻辑层和应用层取得了成体系技术突破。发明了工业物联网时序数据自适应存储技术，存储空间比国际主流时序数据库 **InfluxDB** 节约 85%；建立了工业物联网元数据自动识别技术，支持元数据“前端自由决定，后端智能识别”的新型应用范式；创新了工业物联网时序数据高鲁棒处理技术，乱序数据查询性能比美国 **GE** 公司 **Predix** 快 8 倍。形成支持物联网时序数据收集、存储、查询与分析一体化的数据管理引擎，支持“端-边-云”一体化部署，适用于高端装备管理、工厂设备、高速网联设备等多种数据管理场景，是工业互联网时序数据管理的核心基础支撑。

目前，**IoTDB** 已在钢铁冶炼、石油化工、飞机制造、核电、风电、智慧电厂、城市交通运输等多个领域得到应用，使用者超过千余用户/企业，覆盖中国、德国、澳大利亚、美国、印度等多个国家。在国内，**IoTDB** 有效支撑了中航成飞、中车四方、中国船舶、国家电

网、中国烟草、金风科技、大唐电力、联想、东方国信、北京汽车等龙头企业工业互联网落地升级。国际上，德国联邦经济和能源部资助成立的 Pragmatic Industries 使用 IoTDB 为德国宝马发动机缸体制造实时数据提供有力支持。

IoTDB 项目于 2017 年在 Github 开源，于 2018 年进入 Apache 软件基金会，经历了 2 年的孵化阶段，于 2020 年毕业成为 Apache 顶级项目。在建设开源社区过程中，通过国内外开源技术大会，如 Apache Con、中国开源年会等进行宣传报告，并与 Apache ShardingSphere、Apache Pulsar、Apache RocketMQ、CSDN、示说网等社区合作举办线下见面会。现有 Apache IoTDB 社区开发者 150 余人，来自中国高校、东方国信、阿里、云智慧、用友、联想、华为、四维图新、网易等头部公司。IoTDB 获 2019 年优秀大数据产品称号、第二届中国优秀开源项目一等奖、2019 年度最受欢迎中国开源项目称号。被国际著名数据库排名网站 DB-Engines、CMU 数据库名录等收录。2021 年 Apache 年报显示，IoTDB 年度代码贡献量位于 Apache 第 7 名。

开源文化教育探索实践

近年来，开源软件、开源文化已成为推动软件学科与产业发展的基础力量，国际一流大学如 MIT、UC Berkeley 等均深度参与开源。清华大学软件工程学科积极探索开源协同创新模式，秉承培养具备“全球胜任力”的拔尖创新人才宗旨，从开源实践和教育两方面探索了一条软件工程学科国际化人才培养的实施路径。

在开源实践上，2018 年清华大学软件学院将自研数据库系统软

件 **IoTDB** 贡献给国际顶级开源基金会 **Apache**，形成了以中国高校学生和开发者为主、国际贡献者和用户众多的全球性工业物联网数据管理开源社区。经过近两年发展和基金会董事会表决，**IoTDB** 正式晋升为 **Apache** 全球顶级项目，标志着该开源项目获全球广泛认可。

在开源教育上，在学校建立开源软件学生协会，在清华大学软件学院内培养 19 名学生成为具有修改 **Apache** 全球代码库权限的开发者，11 人入选项目管理委员会。此外，清华大学软件学院积极推动国内院校和社会的开源教育与开源文化建设。多次在北京航空航天大学、湖南科技大学、湖北大学、新疆大学等院校举行开源讲座，形成超过 500 人的学生线上开源交流社区。连续三年举办面向社会的开源知识讲座，**Apache** 基金会主席 **Crag Russell** 关注并多次出席。其中“开源之道大讲堂”活动作为典型开源社区建设实践被 **Apache 2020** 年全球大会主题报告介绍。梅宏院士评价 **IoTDB** 是“中国开源教育与文化建设的成功实践。”2021 年，团队参与协办了 **Apache Con Asia**、中国开源年会等大型国际、国内开源大会。

清华大学软件学院为中国本土开源社区贡献力量。积极参与 **Apache** 本土社区（北京地区）**ALC Beijing**，参与 **ALC** 播客推广开源理念。2021 年 **Apache IoTDB** 社区作为初创单位参与开放原子基金会 **OpenHarmony** 社区工业互联网兴趣组（**SIG**），成为 **OpenHarmony** 在工业互联网领域的开源生态伙伴，推动国内开源事业发展。

3. 北京大学

北京大学在语言处理、机器学习、音视频编解码等多个领域，维

护开源代码与项目：“盘古 α ”、xLearn、xAVS2、Angel 等。2017 年 11 月，北京大学主办第十届第五代移动通信头脑风暴研讨会，涵盖基于机器学习的无人机 3D AQI 实时监控系统、深度学习理论在无线通信消息传递解码器中的应用、5G 无线聚合网络实验系统、5G 大规模物联网协议和应用、同频同时全双工技术研究进展及未来规划、软件物理层 (Soft-PHY) 架构的三维分割设计及试验、B5G 时代的开放架构和无线开源生态系统等。2020 年，北京大学联合多家高校、研究院、科技企业编制的木兰宽松许可证，经过严格审批，正式通过开源促进会(OSI)认证，被正式批准为国际类别开源许可证(International licenses)，成为第一个中英双语国际开源许可证，鼓励广大中国社区积极参与开源，同时也是对已批准开源许可证列表的宝贵补充。此外北京大学开源软件协会还试点开源通识教育，积极推动开源交流与开源教育。2021 年 3 月，在 COPU 联盟及北京大学荆琦教授的多方沟通和努力推动下，“开源软件开发基础及实践”的课程获得了北京大学软件与微电子学院的大力支持，吸引了国内头部开源大厂积极加入，包括滴滴，阿里，华为，瀚高，偶数科技等开源企业。

4. 伯克利大学

伯克利大学是排名第一的大学开源贡献者，很多优秀的开源项目，如 BSD、Mesos、Spark、Alluxio、Ray 等，都是来自伯克利大学。同时管理着 BSD 开源许可证，BSD 开源协议是随着加州大学伯克利分校发布 BSD UNIX 发展起来的，修改版本被 Apple、Apache 所采用。。近年来伯克利大学也积极在各个领域作出开源贡献。2018 年 4 月，

伯克利 RISE 实验室推出了最新的键值存储数据库 **Anna**，提供了惊人的存取速度、超强的伸缩性和史无前例的一致性保证。过去这半年里，伯克利 RISE 实验室对 **Anna** 的设计进行了重大变更，新版本的 **Anna** 能够更好地在云端扩展。同 2018 年 12 月，伯克利大学开源了用于多个数据流的实时分布式分析的系统 **Confluo**，同时支持高吞吐量并发写入，毫秒时间尺度的在线查询，以及通过为多个数据流专用案例精心设计的数据结构组合的 CPU 高效即席查询，以及端到端优化系统设计。

5. 中国科学院软件研究所

中科院软件所与华为在软件领域保持着良好的合作关系。双方于 2019 年 10 月 28 日在深圳签署了关于鲲鹏计算产业生态的合作协议，双方将在开源操作系统研发、开源软件生态建设、人才培养等领域紧密合作。针对目前已正式开放的 **openEuler** 社区，软件所将在前期鲲鹏生态支撑工作的基础上，更加深入地参与到 **openEuler** 社区的建设中，打造基于 **openEuler** 的操作系统科研教学和实用技术培训体系，包含操作系统的理论、技术和实践等，推广 **openEuler** 操作系统的使用，扩大用户群；建立开源贡献激励机制，鼓励科研人员积极参与 **openEuler** 社区开源项目，为开源社区注入更多创新力量，支撑国产软硬件生态的可持续发展；联合国内优势力量，研发并推出基于 **openEuler** 的解决方案，在国民经济重要领域开展应用示范。中科院软件所作为中国系统软件领域的先驱者，将全力支持国内操作系统开源社区的生态建设，为打造技术先进、自主可控的国产基础软硬件生

态体系作出贡献。

此外中国科学院软件研究所和清华大学交叉信息学院发起共建开源技术联合实验室（Open Source Technology joint Lab，英文缩写为OSTL），以促进国内开源技术发展、开源技术培训、开源人才培养为宗旨的实体机构。开源技术联合实验室依托中科院软件所协同创新中心，以学术、技术、项目、人才等需求为导向，在云计算、大数据、开源硬件、系统软件等领域开展交叉研究、协同攻关、项目合作、产业孵化和专业人才培养等工作，共同取长补短、协同创新，努力成为开源技术领域的创新基地。开源技术联合实验室主要领域方向为开源软件与开源硬件。其中，开源软件主要包括开源云平台、开源大数据、开源操作系统、开源智能系统软件；开源硬件主要包括 OCP/ODCC 开源服务器、开源 PC/手机、开源 VR/AR、开源 SDN/SDR 设备、开源智能机器人等。依托中国科学院软件研究所和清华大学交叉信息研究院的科研教学实力，开源技术联合实验室积极与业内知名大学、研究机构、企事业单位合作，开展热点开源技术的培训，努力为社会输送高端开源技术人才，促进我国开源事业的发展。

为了防范和化解使用开源软件时可能存在的质量、知识产权、可靠供给等风险，中国科学院软件研究所于 2020 年启动“开源软件供应链点亮计划”（以下简称“点亮计划”），半年以来取得了一系列重要进展。“点亮计划”针对广泛使用但并不可靠的开源软件，通过技术创新、优化增强、社区合作等方式，解决其面临的许可、质量、维护和技术支持等基础问题。作为“点亮计划”的年度重要活动，“开

源软件供应链点亮计划——暑期 2020”（以下简称“暑期 2020”）于 2020 年 5 月启动。该活动由软件所与知名开源操作系统社区 openEuler 联合主办、中科院软件研究所南京软件技术研究院承办，以鼓励国内外高校学生加入优秀开源社区，积极参与开源软件的开发维护，促进国内开源生态的蓬勃发展。

6. 中国信息通信研究院

中国信息通信研究院自 2015 年跟踪开源，从开源技术研究至开源方法论研究，相继发布《开源生态白皮书》等 9 本开源领域白皮书。建立开源治理标准体系，累计编写 8 个标准，完成 47 项符合性测试。建立开源治理公共服务平台，运营金融、通信、科技制造、可信开源社区。

系统建立开源使用治理规范。开源使用治理工作主要目标是推动企业规避开源风险，我院通过标准、白皮书与公共服务平台量化开源使用过程中的风险，并细化开源风险指引规范，推动企业根据自身特性开展开源合规治理工作，建立开源治理体系，最终保证我国开源的持续稳定使用。一是建立国内首个开源治理标准体系并推动测试评估，我院制定《开源治理能力评价方法—第 1 部分 面向自发开源企业》，帮助企业规避内部代码到开源项目的风险、规范从项目发布到关闭的全周期流程；制定《开源治理能力评价方法—第 2 部分 面向开源使用企业》与《开源治理能力评价方法—第 3 部分 成熟度模型》，适用于企业规范对开源软件的管理，帮助企业构建和提升开源软件治理能力；制定《开源供应链风险评价体系》与《开源商业解决方案风险评

估模型》，帮助提供商和云服务商规范开源软件引入、开发和交付流程，帮助企业降低开源供应链风险；制定《开源软件审计平台能力要求》，为工具厂商规范和提升开源治理工具质量，为企业用户的软件选型提供参考。云大所依据标准完成工商银行、农业银行、中移信息、中兴等十余家企业开源治理能力测试。二是**连续三年发布开源治理白皮书**，树立开源领域影响力。我院编写《开源治理白皮书》与《金融行业开源治理白皮书》，重点梳理引入开源可能导致的风险，并对开源治理方面可以采取的措施给出了建议，同时撰写企业的开源治理实践案例；编写《开源许可证使用指南》与《开源许可证兼容性指南》，主要梳理开源知识产权风险，列明法律合规需要注意的相关事项。三是**建立开源治理公共服务平台**，推动企业落地风险治理。我院建设开源生态监测平台与开源风险检测平台。开源生态监测平台通过每日定期抓取 GitHub、码云等热门开源代码托管平台上热门开源项目中的活跃度、提交问题数、支持度等信息对开源项目进行打分和展示，为用户开源项目选型提供依据。开源风险检测平台根据中国信通院前期已经编制完成的《开源许可证使用指南》，结合已有工具厂商的内置规则，可实现对主流开源许可证进行分类和风险分析，对识别出的开源漏洞给出修复建议，帮助用户梳理并降低开源风险。

开源运营推动开源项目跨越断层。开源运营的工作目标是推动开源项目发展。开源运营是开源工作的核心环节，作为开源生态的重要一环，良好的开源社区有助于开源项目营造良好的开源生态并扩大影响力，吸引更多的外部参与者，扩大社区规模，通过“网络效应”营

造完整的开源生态。一是开展开源社区成熟度发展规律研究。我院编写《开源社区成熟度研究报告》，聚焦开源社区成熟度，阐述开源社区成熟度模型、探讨社区构建和度量体系。二是建立开源项目与社区度量标准并落地测试评估，帮助项目定位发展短板。我院牵头编写《可信开源社区评价体系》《开源项目选型参考框架》等标准，并落地评估测试，累计完成 shardingsphere 等 30 余个开源项目的测试工作。三是建立可信开源社区共同体，从单点运营发展至体系化运营。2017 年，我院和腾讯蓝鲸及 TARS 开源项目建立合作关系，围绕标准制定、培训等方面推动产业应用。自此，我院一直积极探索规模化开源项目的运营机制。我院于 2021 年 9 月成立可信开源社区共同体，引导建立健康可信且可持续发展的开源社区，加强各开源社区之间的交流，目前社区成员已超过 40 个。

助力产业开放发展，推动良性循环。开源产业开放工作主要目标是将开源的方法论应用于各产业，形成各产业公共技术底座及协作模式。通过行业社区深入挖掘具有业务价值的业务场景，主导建立行业特色开源社区，构建新型产业组织形态，加快形成数字时代科技与产业发展新优势，增强我国产业的全球竞争力。一是推进开源生态和开源产业开放深度研究，助力产业认识开源、参与开源。我院编写《开源生态白皮书》，分析总结过去开源生态发展特点，总结开源生态发展趋势，为推动开源生态建设提供参考；编写《服务器操作系统开源研究报告》，分析我国发展服务器操作系统面临的形势，以及开源对服务器操作系统发展的重要意义；编写《金融行业开源生态深度研究

报告》，系统梳理国内外金融行业开源生态发展现状，从开源使用治理以及开源生态建设两个方面给出实现路径。二是建立覆盖领域广泛的开源社区组织，打造全面的产业生态共赢体系。我院成立相继成立了金融行业开源技术应用社区（FINOC）、通信行业开源社区（ICTOSC）、科技制造开源社区（TMOSC），主要为行业搭建开源技术应用交流平台，探讨行业开源技术应用、开源治理与自发开源生态构建。金融行业开源技术应用社区（FINOC）成立于2018年11月，目前社区成员不断发展壮大，包括52家金融机构与8家科技公司，通过建立社区，帮助金融机构运营有开源需求的项目，同时进行会议宣传推广、产品标准制定、上下游一致性评估、人才培养认证等方面工作，推动国内金融开源健康发展。通信行业开源社区（ICTOSC）成立于2021年9月，目前包括以中国移动、联通、电信三大运营商为首的15家电信科技公司，目的是开展通信行业开源治理各方面研究工作，共同探讨通信行业开源治理落地实践，推动通信行业开源生态建设，形成自发开源生态。科技制造开源社区（TMOSC）成立于2021年9月，目前包括以华为、中兴、浪潮、京东为首的9家科技制造公司，目的是研究制定适用于科技制造行业的开源治理与开源硬件标准，为科技制造行业开源治理提供理论基础。

八、开源生态发展建议

企业侧建立稳定的开源模式。我国自发开源企业需要建立稳定的开源生态模式，一是针对国际基金会顶级开源项目，建立社区反馈和联动机制；二是建立自主开源生态，重点在网络、通信、操作系统、

数据库、中间件等基础软件领域探索开源；三是探索稳定商业模式，大企业通过开源控制流量入口获取收益，小企业通过差异化服务获取收益；四是做好自发开源合规治理，通过审查开源前、开源中和开源后的流程制度降低开源合规风险。

第三方快速完善开源运营机制。支撑网信办、工信部等上级领导部门做好开源生态建设的顶层设计，包括相关的政策、“十四五”规划等。一是国内开源联盟组织持续推进与企业的开源运营合作，借助联盟标准化与行业推广优势，推动我国自发开源项目应用；二是开源基金会形成稳定的决策机制，项目孵化流程，为国内开源项目运营提供有力知识产权托管以及法律、协作支撑。

健全开源治理体系，推动开源治理体系落地。在开源体系建设上支撑相关部门推动中国自己开源基金会的设立、发展，把中国代码托管平台进一步的壮大，鼓励更多的行业内大型项目开源开放，鼓励更多的开发者到开源体系中来。针对自发开源企业、开源产品企业和开源使用企业继续健全开源治理体系，第三方组织需制定开源软件治理的行业标准，通过制定开源软件管理规则，帮助企业规范开源软件的使用和输出，实现企业软件的全覆盖和全流程管理，同时配套建设开源风险检测、开源生态监测等平台，推动企业落地开源治理体系建设。鼓励开发者社区发展，推动中国开源开发者的成长、开源应用及创作水平、开源文化的提升，为中国开源发展提供基础动力；持续加强本土开源社区和开源代码托管平台的建设，为中国开源发展提供支撑性平台，鼓励开源开发者能够发现、交流、分享、创新应用及推广开源项目；通过开源高校及职业培训、就业引导和开源人才综合评定等途

径，增加国内开源开发者规模，完善开源人力资源库建设；促进投资机构关注和了解开源企业，提高对开源技术和开源商业模式的评估能力，鼓励在企业和项目发展的早期进入；推进开源标准化，建立完善的开源规则体系，加强开源标准、开源规则和知识产权的培训，提升国内开源产业的的风险防范意识，建立跨部门跨领域的开源风险综合防范体系。

面向全球，加大力度促进开源国际化合作。吸引国外知名开源项目在华成立中文社区或成立合资企业；吸引全球开源社区基金会在华设立分支机构；国内企事业单位和高校承接和主办更多的国际开源技术交流活动，鼓励聘请全球开源大师精英来华工作，奖励开发者参与开源社区贡献开源项目；支持和扶持中国开源项目走向海外，面向全球贡献智慧。

积极贯彻《国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》，为开源创造良好的发展环境，大力发展数字联合体。放开对开源基金会设立的限制，鼓励社会资本参与，并设定相应的地稅政策等；兴建开源孵化平台，开源风控平台，完善开源代码托管平台；优化政府采购政策，对开源技术产品倾斜；将开源技术和开源实训融入现有教育体系，建设开源创新科教平台，为产业输送开源技术人才；联合校企社开设开源实践课程；开源大赛优秀人才选拔；产学研联合起来交叉赋能，发挥各自优势，推动中国开源全面发展。要主动利用全球资源，拥抱开源，推动开源强国建设，为中国和世界的科技发展做出应有的贡献。

中国通信学会

地址：北京市海淀区万寿路 27 号院 8 号楼

邮政编码：100840

联系电话：010-68203021

传真：010-68203004

网址：<https://www.china-cic.cn/>

