



SDN 产业发展白皮书

(2014 年)

SDN 产业联盟

2015 年 4 月

版权声明

本白皮书版权属于 SDN 产业联盟，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本白皮书文字或者观点，应注明“来源：SDN 产业联盟”。违反上述声明，本联盟将追究其相关法律责任。

SDN 产业联盟

前言

当前，全球 SDN 技术演进和应用创新加速发展，产业日趋活跃。各国政府、企业和研究机构对 SDN 的接受度日趋提升，SDN 技术已经从理论探讨向产业化发展切实迈进，并带来巨大的发展机遇。如何抓住机遇，解决 SDN 产业发展中存在的问题，释放 SDN 产业商业价值，实现产业全面繁荣，是摆在产业界面前的紧迫课题。

本白皮书首先追溯 SDN 技术产生的背景和价值，并分析对现有网络带来的变革和机遇。然后从市场发展、技术发展和产业链发展等三个主要方面，对 SDN 技术和产业现状及发展趋势进行了分析。特别针对 SDN 技术应用的主要场景和关键技术进行了概要介绍，并对技术标准和开源组织的产业背景及最新动态作了全面的介绍，对产业链的构成和有代表性的企业战略进行了归纳。最后，从产业发展的视角提出 SDN 产业所面临的问题，并给出对策思考。

目 录

1	SDN 技术产生背景和价值	1
1.1	SDN 技术产生的背景	1
1.2	SDN 技术的意义和价值	1
1.3	SDN 技术对现有网络带来的变革和机遇	2
1.3.1	SDN 技术对网络架构的变革	3
1.3.2	SDN 技术带来网络发展的新机遇	3
1.4	SDN 出现对市场格局和产业生态的影响	4
2	SDN 市场发展现状和趋势	4
2.1	SDN 市场发展现状	4
2.1.1	服务提供商市场	5
2.1.2	企业用户市场	6
2.2	SDN 市场规模及商用成熟度趋势分析	7
2.2.1	SDN 市场规模预测	7
2.2.2	SDN 商用成熟度分析	7
2.3	SDN 市场成熟度趋势	7
2.4	SDN 网络部署情况	9
3	SDN 技术发展趋势	10
3.1	SDN 需求场景概述	10
3.2	SDN 关键技术分析	18
3.3	SDN 标准化组织及开源组织	23
3.3.1	SDN 标准化组织及其标准化工作	23
3.3.2	SDN 开源组织	28
4	SDN 产业链发展现状及主要趋势	30
4.1	SDN 产业链构成	30
4.2	产业链发展动态概述	32
4.2.1	电信运营商	33
4.2.2	互联网公司	34

4.2.3 设备制造商	35
4.2.4 软件厂商	38
4.2.5 硬件厂商	38
4.2.6 测试仪表厂商	39
5 SDN 发展的问题与展望	39
5.1 SDN 发展面临的主要问题	39
5.1.1 非技术方面的问题	39
5.1.2 技术方面的问题	41
5.2 推动 SDN 发展和成熟的对策思考	43
A 附录. SDN 产业联盟相关介绍	45
A.1 联盟的定位和目标	45
A.2 联盟的组织架构	45
A.3 联盟的工作路线图	46

SDN 产业发展白皮书

1 SDN 技术产生背景和价值

1.1 SDN 技术产生的背景

经过 30 多年高速发展，互联网已经从最初满足简单 Internet 服务的“尽力而为”网络，逐步发展成能够提供涵盖文本、语音、视频等多媒体业务的融合网络，其应用领域也逐步向社会生活的各个方面渗透，深刻改变着人们的生产和生活方式。然而，随着互联网业务的蓬勃发展，基于 IP 的简洁网络架构日益臃肿且越来越无法满足高效、灵活的业务承载需求，网络发展面临一系列问题。

(1) **管理运维复杂。** 由于 IP 技术缺乏管理运维方面的设计，网络在部署一个全局业务策略时，需要逐一配置每台设备。这种管理模式很难随着网络规模的扩大和新业务的引入，实现对业务的高效管理和对故障的快速排除。

(2) **网络创新困难。** 由于 IP 网络采用“垂直集成”的模式，控制平面和数据平面深度耦合，且在分布式网络控制机制下，导致任何一个新技术的引入都严重依赖现网设备，并且需要多个设备同步更新，使得新技术的部署周期较长(通常需要 3~5 年)，严重制约网络的演进发展。

(3) **设备日益臃肿。** 由于 IP 分组技术采用“打补丁”式的演进策略，随着设备支持的功能和业务越来越多（目前 IETF 发布的 RFC 标准超过 7000 个），其实现的复杂度显著增加。

为从根本上摆脱上述网络困境，业界一直在探索技术方案来提升网络的灵活性，其要义是打破网络的封闭架构，增强网络的灵活配置和可编程能力。经过多年的技术发展，SDN（软件定义网络）技术应运而生。

1.2 SDN 技术的意义和价值

SDN 采用与传统网络截然不同的控制架构，将网络控制平面和转发平面分离，采用集中控制替代原有分布式控制，并通过开放和可编程接口实现“软件定义”。SDN 整体架构如图 1 所示。

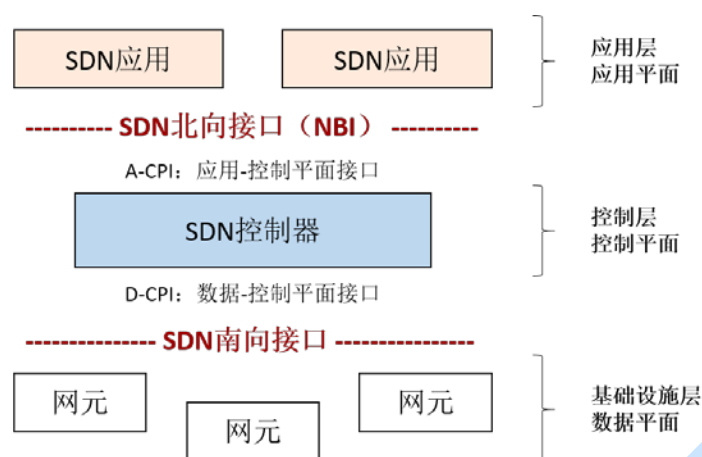


图1： SDN 分层架构

从网络架构层次上看，SDN 典型的网络架构包括转发层（基础设施层）、控制层和应用层，该新型架构会对网络产生以下方面的影响：

- **降低设备的复杂度。**转发和控制分离，使得网络设备转发平面的能力要求趋于简化和统一，硬件组件趋于通用化，而且便于不同厂商设备的互通，有利于降低设备的复杂度以及硬件成本。
- **提高网络利用率。**集中的控制平面，可以实现海量网络设备的集中管理，使得网络运维人员能够基于完整的网络全局视图实施网络规划，优化网络资源，提高网络利用率，降低运维成本。
- **加速网络创新。**一方面，SDN 通过控制平面可以方便地对网络设备实施各种策略，提升网络灵活性；另一方面，SDN 提供开放的北向接口，允许上层应用直接访问所需的网络资源和服务，使得网络可以差异化地满足上层应用需求，提供更灵活的网络服务，加速网络创新。

与传统的网络架构相比，采用 SDN 架构后，网络底层只负责数据转发，可以由廉价、通用的商用设备构成；上层负责集中的控制功能，由独立的软件系统构成，网络设备的种类与功能由上层软件决定，通过远程自动配置实现部署和运行，并提供所需的网络功能、参数以及业务。因此，SDN 技术的引入势必会对传统电信网络的架构演进带来颠覆性的影响。

1.3 SDN 技术对现有网络带来的变革和机遇

SDN 技术是一项全局性、颠覆性的网络变革技术，它采用 IT 技术的模式来

改造传统的“封闭”网络，使用软件定义的方法重新定义网络能力，使得网络从静态走向动态，解决了传统网络中无法避免的一些问题，包括对需求变化的响应速度慢、无法实现网络的虚拟化以及高昂的运维成本和设备成本等，为网络发展带来新的机遇。

1.3.1 SDN 技术对网络架构的变革

SDN 技术是继 MPLS 技术之后在网络技术领域的一次重大技术变革，从根本上对网络的架构产生革命性的冲击，具体体现在下面几个方面：

(1) SDN 将打破原有的网络层次。基于集中式的控制，SDN 将提供跨域、跨层的网络实时控制，打破原有的网络分层、分域的部署限制。网络层次的打破将会进一步影响到设备形态的融合和重新组合（例如 IP+光型的新设备，边缘节点的进一步简化等）。

(2) SDN 将改变现有网络的功能分布。随着诸多网络功能的虚拟化，在 SDN 控制器的调度下，网络业务功能点的部署将更加灵活。同时，在云计算等 IT 技术的支持下，复杂网络功能的集中部署也会进一步简化承载网络的功能分布。

(3) SDN 分层解耦为未来网络的开放可编程提供了更大的想象空间。随着 5G、物联网、虚拟网络运营商等新技术、新业务、新运营模式的兴起，对网络的可编程和可扩展能力提出了更高要求。SDN 技术发展需要从管理运营、控制选路、编址转发等多个层次上提供用户可定义和可编程的能力，实现完整意义的网络虚拟化。

1.3.2 SDN 技术带来网络发展的新机遇

SDN 技术倡导的转发与控制分离、控制集中、开放可编程的核心理念为网络发展带来了新的机遇。

(1) 提高网络资源利用率。SDN 技术独立出一个相对统一集中的网络控制平面，可以更有效的基于全局的网络视图进行网络规划，实施控制和管理，并通过软件编程实现策略部署的自动化，有效地降低网络的运维成本。

(2) 促进云计算业务发展。SDN 技术有助于实现网络虚拟化，从而满足云

计算业务对网络虚拟化的需求，对外提供“计算+存储+网络”的综合服务。

(3) 提升端到端业务体验。SDN 集中控制和统一的策略部署能力使得端到端的业务保障成为可能。结合 SDN 的网络开放能力，网络可与上层应用更好地协同，增强网络的业务承载能力。

(4) 降低网元设备的复杂度。SDN 技术降低了对转发平面网元设备的能力要求，设备硬件更趋于通用化和简单化。

1.4 SDN 出现对市场格局和产业生态的影响

SDN 作为一项重大的技术变革，不仅从技术上改变了网络的体系架构，同时也对通信市场格局和产业生态产生了积极的推动作用。

(1) SDN 的分层解耦以及接口的开放和标准化为新兴厂商进入相对封闭的通信设备市场提供了更多的机会，促进了网络设备的创新。

(2) SDN 促进了 IT 与 CT 技术的相互渗透与融合。

(3) SDN 开放的北向接口为上层业务应用更高效的使用网络资源奠定了基础，激发了业务创新活力，有助于建立更加丰富的产业生态。

(4) SDN 的分层解耦打破了原有的供需关系。一方面，部分网络运营者自行联合器件供应商研发网络设备，不再依赖原有的设备开发商和系统集成商。另一方面，网络运营者和设备供应商之间形成了更加紧密的战略合作关系，通过 DevOps¹模式进行更加深入的合作。

2 SDN 市场发展现状和趋势

2.1 SDN 市场发展现状

2012 年被业界视为 SDN 商用元年，Google 公司的 B4 网络成功部署 SDN 技术解决流量调度问题。此后，全球对 SDN 技术的应用探索不断推进，呈现加速发展的态势。目前，从全球来看，SDN 正处在商用部署的准备阶段，一些大

¹ DevOps: (英文 Development 和 Operations 的组合) 是一组过程、方法与系统的统称，用于促进开发（应用程序/软件工程）、技术运营和质量保障部门之间的沟通、协作与整合。

型云服务商（如亚马逊、微软等）已经或准备采用具有 SDN 特性的网络解决方案。与此同时，电信运营商也在积极尝试借助 SDN 解决网络运维、业务优化和新业务快速引入等问题。当前，从市场角度看，SDN 市场客户主要包括服务提供商（含 ISP，ICP 及运营商等）和企业用户两大类，其发展程度也各不相同。

2.1.1 服务提供商市场

利用 SDN 技术改造网络基础架构已形成共识。根据市场调研结果，全球大多数服务提供商都认为 SDN 将会对未来网络架构带来根本性的改变，同时会在新业务的引入、运维效率、投资成本等诸多方面带来收益。现阶段，SDN 技术部署的主要驱动力如图 2 所示，一方面可以利用 SDN 技术实现新业务的快速引入和部署，另一方面可以使用 SDN 技术从全局视角来实现全网的可视、可管和可控，提升网络的整体运维和管理能力。

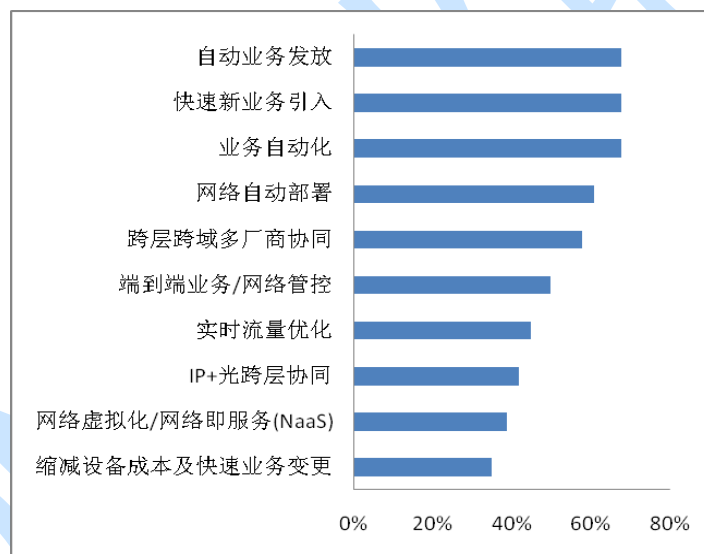


图2： SDN 部署的驱动力

SDN 商用部署正在稳步推进。相对于 2012-2013 年热炒概念，2014 年服务提供商部署 SDN 呈现加速态势。一方面，从全球主要服务商的调研数据来看，超过 25% 的受访服务商正在实现基于 SDN 技术的网络架构，另有约 50% 的受访服务商已完成 SDN 的技术评估，其余的服务商也都计划在未来几年内实现基于 SDN

技术的网络架构²。另一方面，从国内外主流运营商的进展来看，多数运营商已经从 SDN 技术的评估或概念验证阶段开始向商用化部署迁移，同步开展小规模试点，甚至有少数领先运营商已开始实际商用部署。

SDN 应用场景逐步向网络的其它部分延伸。现阶段，在 SDN 部署的目标网络选择上，约 85% 的受访运营商瞄准 MPLS 骨干网以及云业务网络，约 80% 的受访运营商选择跨层传送网络（如 IP+光），其余的主要目标网络还包括城域汇聚以及光网络³。根据业界的调研数据来看，近两年内用户优先选择 SDN 部署的主要目标场景按优先级排列如下：数据中心内、数据中心之间、IP+光协同、骨干网、移动承载等。服务提供商选择这些应用场景，旨在希望通过 SDN 达到增收和减支的目的。在增收方面，70% 以上运营商希望借助 SDN 向云服务提供商转型，通过 SDN 技术实现网络、计算、存储资源的整合并以云服务模式对外提供，创造新的业务增长点。在减支方面，主要是通过 SDN 技术实现跨数据中心及骨干网链路的流量优化，从而减少运维成本和扩容成本。

2.1.2 企业用户市场

企业用户对 SDN 技术的认可度还存在较大的差异，近半数企业并没有计划部署基于 SDN 技术的网络。伴随着企业信息化进程和企业云服务的建设，一些大型企业正在积极推进基于 SDN 技术的网络建设。根据对美国四大关键业务领域（政府、教育、金融和医疗）企业客户的调研数据来看，有超过半数的受访者正在积极制定相关计划来采用 SDN 技术建设网络，另外有 75% 以上的受访者认为未来的网络极有可能会采用 SDN 技术。而在计划采用 SDN 技术的企业中，有 74% 的企业计划在未来 12 个月内进行部署。但是，仍然有近半数的企业并没有制定任何计划来部署 SDN 技术⁴。

²数据来源：Infonetics 的调查报告: SDN and NFV Strategies: Global Service Provider Survey

³数据来源：Infonetics 的调查报告: SDN and NFV Strategies: Global Service Provider Survey

⁴数据来源：NetworkWorld 网站公开信息: Half of surveyed US businesses shun SDNs

2.2 SDN 市场规模及商用成熟度趋势分析

2.2.1 SDN 市场规模预测

随着 SDN 技术逐渐成熟，运营商、企业、互联网对 SDN/NFV 的支出会逐年增多。根据知名市场调研机构的报告，在全球范围内，未来运营商 SDN/NFV 的软硬件市场规模将从 2013 年不到 5 亿美元增长到 2018 年的 110 亿美元，增速迅猛。

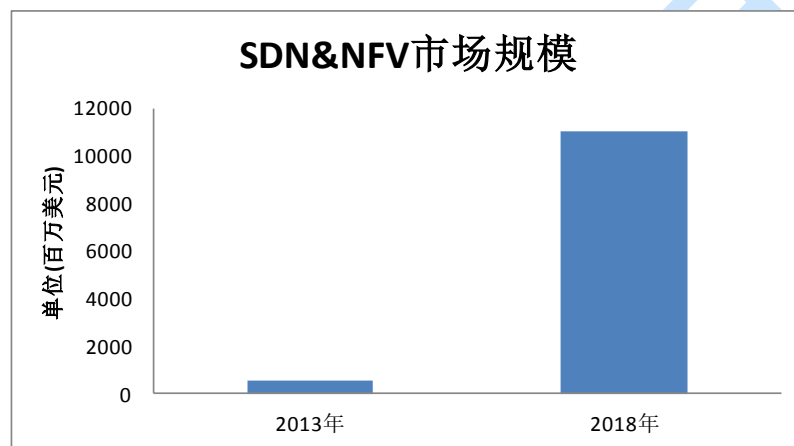


图3: 运营商 SDN/NFV 市场规模

2.2.2 SDN 商用成熟度分析

经过多年的概念推广和技术研发，产业界各方包括传统设备制造商、IT 服务提供商、芯片制造商以及初创企业都在产品实现中融入 SDN 技术理念，推出支持 SDN 的产品和解决方案，为 SDN 技术的商用化部署奠定了基础。但整体上 SDN 技术及商用解决方案还远未成熟，正处于从过度期望阶段和概念验证期进入幻灭到成熟阶段，估计 2-5 年后进入发展阶段。

2.3 SDN 市场成熟度趋势

经过多年发展，SDN 技术逐渐成熟，目前已在数据中心内部组网和跨数据中心互联等场景基本具备商用条件，SDN 也正在从实验室走向小规模试点商用。根据 SDN 产业整体发展趋势可以做出如下判断。

2015 年，SDN 将开始规模商用部署。一方面，2014 年已成功的 SDN 试点应用将会转为商用部署。另一方面，运营商将进一步扩展 SDN 的应用场景，并在试点应用成功后转成商用部署。

2016 至 2020 年，SDN 将逐步开始广泛商用部署。SDN 产业进入成熟期，运营商和互联网公司将会按照各自的 SDN 部署计划，在多个网络场景部署 SDN。

SDN 的应用场景从校园实验性网络，逐步深入到数据中心，并从数据中心延伸到数据中心周边场景，之后延伸到骨干、城域、接入等场景。相应地，SDN 在各个场景的市场成熟度和 SDN 应用场景的发展相对应，数据中心市场最先成熟，之后是数据中心周边的市场逐渐成熟。

根据调研机构的调研结果，运营商 SDN 部署计划如图 4 所示，从侧面反映了各个 SDN 应用场景的市场成熟度。

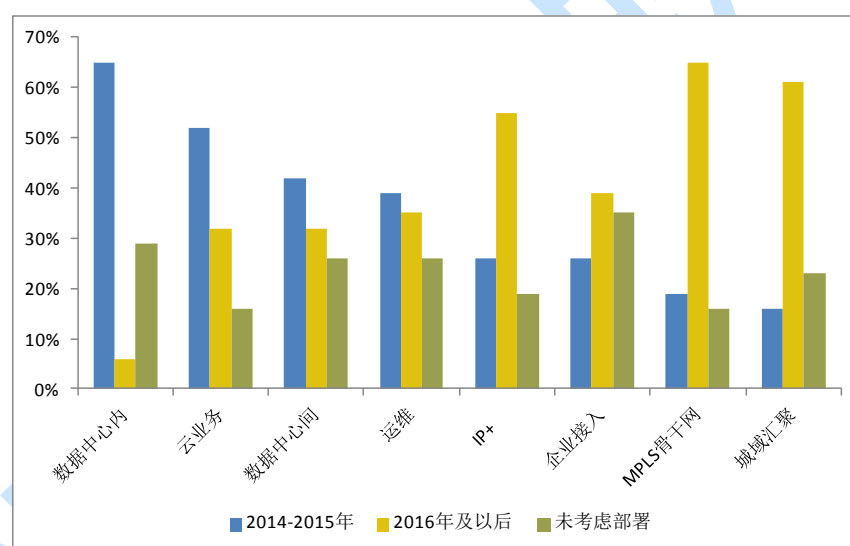


图4： 运营商 SDN 部署计划

互联网公司的 SDN 部署场景相比运营商市场简单，SDN 基本上只部署在数据中心内部以及数据中心之间。调研机构的对互联网公司的 SDN 部署计划进行了调查，调研结果如下图所示。调研结果显示接近 50%的受访者在 2015 年商用部署 SDN，超过 80%的受访者在 2016 年商用部署 SDN，从调查结果可以预计互联网公司的 SDN 市场在 2015 年基本成熟。

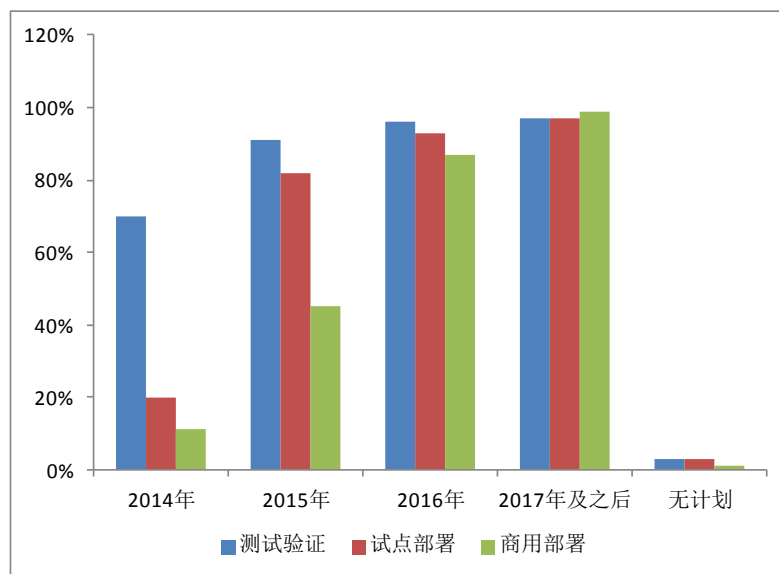


图5： 互联网公司 SDN 部署计划

2.4 SDN 网络部署情况

随着技术的逐步走向成熟，越来越多的运营商、互联网公司和企业正在 SDN/NFV 相关领域开展实验网络部署、测试和验证活动，在 SDN 的需求场景识别、产品验证和商业准备等关键环节均取得了明显进展。

一、运营商领域

随着网络的发展和 ICT 的融合冲击，电信运营商简化运维，降低 OPEX 的诉求越发强烈。AT&T、NTT 等运营商在 SDN 应用和部署上走的比较靠前，国内三大运营商也在 SDN 网络的实验和部署上取得了阶段性进展。

全球各大运营商开展了各自的 SDN 试验。AT&T 在 2013 年启动的 Domain2.0 计划，旨在通过 SDN/NFV 技术将网络基础设施从以硬件为中心向以软件为中心转变，实现基于云架构的开放网络。Domain2.0 在 2014 年已经开始小范围部分的测试和验证工作，2015 年将继续进行更大范围的网络试验，并期望在 2016~2017 年期间实现真正意义的商业部署。NTT 也在商业上积极尝试将 SDN 和云计算技术运用在新业务中。目前 NTT 已经成功的在其网络上部署了基于 SDN 网络的云服务，为企业客户提供跨地域的基于云计算的多种服务。

国内三大运营商也都在积极探索 SDN/NFV 在传送网、移动核心网、接入网、数据中心等领域的应用，并已经进行了一些现场试验和小规模部署，比如北京电

信 IDC、广东移动的 SPTN SDN 网络改造、中国联通沃云 SDN 网络、四川联通 IPRAN、上海电信混合云等都是国内运营商典型的 SDN 部署案例。

二、互联网公司

与传统电信运营商的 SDN 网络商业诉求不同，互联网公司采用 SDN 技术的主要初衷主要在于提升自身网络对业务的适应性和网络使用效率，具有代表性的案例如 Google 公司在 G-scale 网络中大规模部署 SDN 解决方案、Facebook 提出的基于 WEDGE 交换机和 FBOSS 操作系统架构等。

目前，数据中心场景下的 SDN 技术发展较快。互联网公司作为技术的先行者，在 SDN 商业化进展相对领先。如 Google 宣布通过部署 SDN 能够将数据中心之间的链路利用率提升至 90%以上，并于 2014 年 4 月宣布推出基于 SDN 和 NFV 技术的 Andromeda 虚拟化平台，目前已开始为 Google Compute Engine 的两个区域提供服务。

国内互联网代表公司腾讯在使用 SDN 构建数据中心网络方面也取得了显著进展。SDN 相关功能在 2014 年初完成开发，目前正在生产网络上试运行，在高可靠、高性能和可运维等方面发挥关键作用。百度已经在长距离骨干区域内多机房互联的 OTN 传输系统平台上成功实施了基于 SDN 方式的自动调度和配置。

三、企业网

除了互联网公司和传统电信运营商外，一些传统的大企业（如金融企业）也对 SDN 技术表现出浓厚兴趣，但由于网络技术积累等原因，企业客户部署 SDN 网络尚无突出案例。

3 SDN 技术发展趋势

3.1 SDN 需求场景概述

全球运营商和互联网公司都在积极探索 SDN 技术的应用需求场景。目前，已经出现的主流需求场景包括数据中心内的虚拟化、广域网流量调优、移动回传网络 IP RAN、IP 接入网/城域网、传送网、业务链与业务路由、IP+光协同组网、网络安全等。而随着 SDN 商用进程加速，未来 SDN 的应用场景会更加丰富，并将渗透到通信网络的各个部分。

一、数据中心网络虚拟化

为满足数据中心在云计算环境下的虚拟网络资源调度和共享需求，未来的数据中心资源池运营需要解决以下关键问题：

- 用户需求的快速响应。云资源池内部网络设备多，网络特征复杂，采用点对点手工配置，将会延迟用户需求的响应速度。
- 清晰的网络拓扑视图。云资源池本身的网络拓扑难以清晰呈现，特别是租户网络与云资源网络无法呈现对应关系，导致运维复杂。
- 灵活的资源共享与调度。资源池很难实现相互隔离的多租户环境，而且在跨数据中心组网时很难实现网络资源的灵活共享与调度。
- 动态感知租户的网络资源需求。不同租户的网络流量、安全策略、性能要求等不同，资源池网络无法动态感知租户的需求，造成资源浪费或过载。

SDN 引入可以实现对网络策略的统一配置以及对网络资源的灵活调度。网络运营者可实现整个云数据中心系统的虚拟化（含计算、存储、网络），并支持按需端到端业务部署。一方面通过 SDN 控制器收集、分析数据中心全网流量分布情况，通过统一计算，调配可用链路资源，并生成转发路径下发给转发设备，实现链路带宽资源的高效利用。另一方面当虚拟机迁移时，SDN 控制器可感知到虚拟机迁移前后的源、目的位置，并将源交换机上的相关策略转移到目的交换机上，从而实现网络策略的同步迁移。

Overlay（重叠网）技术是一种典型的数据中心网络虚拟化方案，通过在 IP 报文之上封装新的数据格式，如 VxLAN、NvGRE 等，实现传统路由网络中的多租户数据隔离与分发功能，而路由网络本身并无特殊限制，具备良好的大规模扩展能力。目前，相关的研究热点包括：MAC 地址和 IP 地址的映射、数据面故障发现、业务流量灵活调度等。

二、广域网流量优化

流量调度是基于网络资源视图和流量分布状况，按照业务需求或网络规划要求，针对网络中的部分或全局流量的流向进行路径调整的网络工程技术，其主要需求是避免拥塞、疏导业务流量、提升网络承载效率。

目前，在传统 IP 网络架构下，数据中心出口链路、运营商骨干链路均面临

流量调度缺乏灵活性的问题，这限制了组网结构的可扩展性和对应用需求的快速响应。在技术上，以 IGP 度量调整和 BGP 策略调整为基础的流量调度机制缺乏全局视图，造成策略管控复杂，管控精度不足，难以大范围使用。

随着 SDN 技术的兴起，近年来提倡基于集中式控制器及转发流表来进行流量调优，并率先在 IDC 流量管理中得到应用部署。谷歌 B4 网络就是一个典型的案例，通过采用该方法使得网络带宽利用率超过 90%。采用 SDN 技术基于集中路径计算，实现实时流量的动态路由调整，提升多路径带宽利用率，实现跨域和域内的流量调优。实践中，IETF 等标准组织在 PCEP、BGP 扩展、MPLS 扩展等领域推出了大量支持流量调度的改进提案。同时，以 OpenDaylight 为代表的开源项目公布了 PCEP、BGP-MP 等大量实用性技术方案。相关技术的后续发展需求主要包括：

- 需要提供从传统的路由控制平面向基于 SDN 的集中式流量调度控制平面的演进方案，包括：BGP-FS、BGP-LS、分段路由等。
- 如何满足业务流量的可视化，包括精细粒度流量流向采集、业务流属性采集、资源拓扑等。
- 设计流量调度的主要功能场景，包括链路级、业务级、路径级、管理域级的拥塞控制、利用率优化、流量疏导等业务要求。
- 集中控制器技术与网络资源模型，包括调度算法、资源管理等。
- 资源控制接口与调度业务开放。

三、移动回传网络 IP RAN

移动回传网络 IP RAN 是指以 IP/MPLS 协议（MPLS-TP 为其子集）及其关键技术为基础的电信级承载网络，现阶段主要面向承载移动回传业务。

当前，IP RAN 网络拓扑复杂、节点数量多、多种协议共存，在业务部署时需要对每个业务接入节点逐一配置，导致配置工作量非常大，而且日常的运维成本也比较高。通过引入 SDN 技术将重点解决以下问题。

- 多业务综合承载。IP RAN 网络除承载 3G/4G 无线回传业务，也将逐步承载集团客户专线业务、少量公众互联网业务，通过引入 SDN 虚拟化功能，可以实现网络资源在逻辑上分离，多种业务安全隔离和独立调度。

- 用户业务快速部署。由于运营商集团客户专线业务地理跨度大，业务开通需要进行大量的配置协调工作，无法满足业务的快速上线需求。通过引入 SDN 架构，可以实现跨地域、跨网络的端到端快速业务部署。
- 简化运维复杂度。由于 IP/MPLS 协议的复杂性以及 IP RAN 网络节点数量多，造成 IP RAN 网络开通复杂、容易出错等问题。采用 SDN 集中控制架构，能够将海量的物理网元虚拟化为少量的逻辑网元，极大地简化网络开通和业务配置的复杂度。
- 促进互联互通。IP RAN 网络由于协议复杂，跨厂家互通配置复杂，难度较大。SDN 通过集中控制方式屏蔽了 IP RAN 多厂商之间的协调工作，能够促进网络的互联互通。

在 IP RAN 场景引入 SDN，对设备进行集中管理和控制，实现设备自动配置和业务的快速部署，提升运维效率。

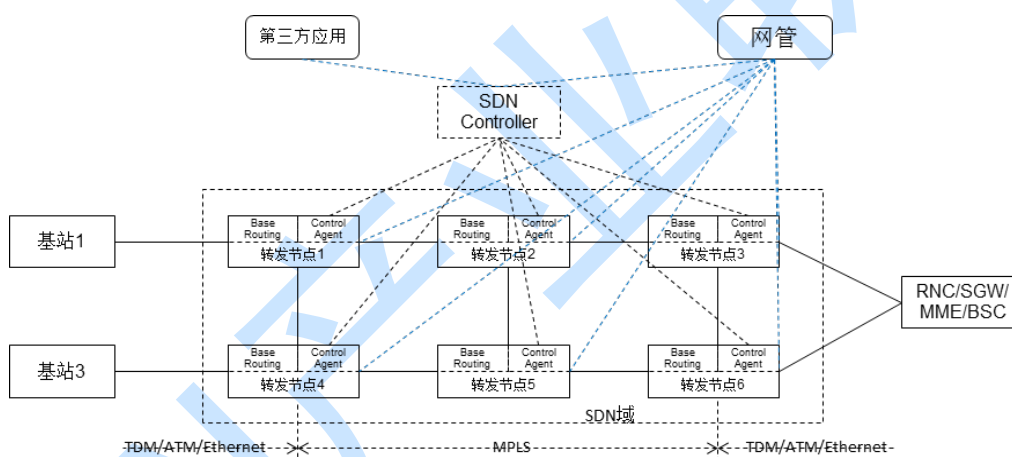


图6： 基于 SDN 的 IP RAN 模型

四、IP 接入网/城域网

国内宽带接入网/城域网的结构层次如图 7 所示，大部分已具备 QoS、组播、MPLS、IPv6 等功能，基本满足当前宽带用户业务与自营业务的承载需求。但是现阶段，城域网也面临以下突出问题：

- 运维工作量大。接入节点多，业务部署时需要对海量节点逐一配置，并且在日常运维中工作量巨大。
- 新业务部署周期长。业务能力与网络设备功能密切相关，在部署新业务时，往往需要对海量节点逐一升级，造成新业务部署周期较长。

- 较难引入新的商业模式。网络相对封闭，难以通过与 OTT 业务深度合作，提升客户业务体验，导致新的商业模式实现困难。

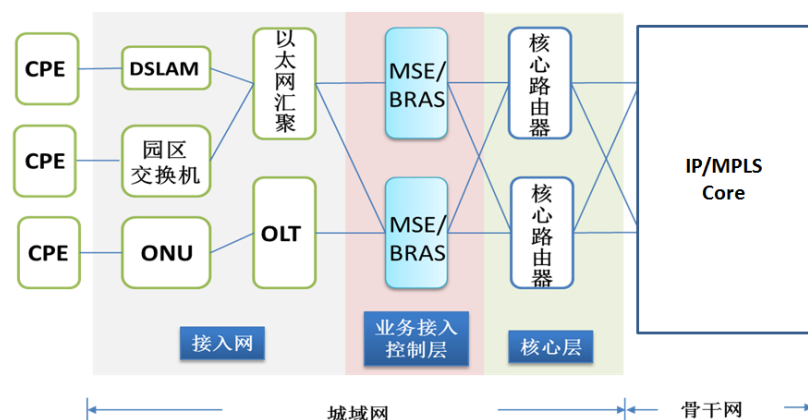


图7： 宽带接入网架构

在宽带接入网/城域网中引入 SDN 技术将会降低网络复杂度，提升网络业务的快速部署能力。就运营商而言，其需求主要体现在以下三个方面：

- 在 IP 智能边缘实现管理平面与设备功能的解耦，要求开放设备的用户/业务控制管理接口，设备功能轻量化。
- 网络边缘虚拟化，物理设备采用标准化服务器，降低对硬件的要求。业务功能采用模块化软件实现，如：vBRAS、vCPE、vCGN 等，新业务功能不再依赖物理硬件，升级及部署简单。
- 结合业务链技术，提升边缘网络智能化管理和业务自动化部署能力。

五、传送网

云计算出现后，信息消费的访问点越来越集中在少数大型 ICP 的云平台上，通信连接高度集中在大量终端与少量数据中心之间。网络从传统意义上的大量分布式通信连接模型向这种不断集中化的信息消费分布模型转变，现有传统的网络架构面临如下挑战：

- 复杂的网络难以适应服务多变的诉求：当前的网络技术是由一系列网络协议组成，在过去数十年间，为应对业务和技术的需要，业界定义了许多网络协议，复杂的网络协议往往牵一发而动全身，这使得整个网络非常复杂。由于这个复杂性，当今的网络保持着相对的静态性，而这与云服务的动态特征形成了鲜明的对比，现有的网络很难满足业务多变的要求。

- 连接集中在少量大型 ICP 节点，造成流量不均衡：在云时代，网络流量越来越集中在关键大型 ICP 节点，导致流量非常不均衡。而现有的传统网络架构，是按照均衡流量模型来设计的。不均衡的实际流量会导致网络少量链路产生拥塞，而大量链路空闲，网络资源利用率很低，而且用户的体验也难以保障。
- OTT 主导的业务模式导致流量难以预测：在云时代，大部分的通信连接是终结在 OTT 的云平台上。而 OTT 用很多技术手段来控制用户对云平台的连接分布，包括建设新的数据中心、CDN 的网络，通过应用层的流量均衡手段来引导用户的访问流量。运营商作为网络建设者，不再掌握骨干网络的流量指挥棒，难以预测流量的变化，只能适应变化。
- 当前封闭网络，难以满足业务创新诉求：在云时代，各种创新应用层出不穷，每天都有新的应用出现。这要求网络也具备快速部署新服务的能力，以满足新应用的要求。然而现有的网络缺乏标准、开放的接口，严重依赖设备商的产品周期，难以快速地推出新的服务，极大阻碍了业务的创新。

在传送网引入 SDN，可以让用户更好地使用和部署网络，以适应快速变化的云计算业务。

六、业务链与业务路由

随着云计算技术的出现以及新兴互联网应用的发展，网络需要提供复杂业务的伸缩能力和业务功能的弹性部署能力。在业务交付方面，要求家庭网络、IP 承载网、移动核心网满足网络业务的灵活定义和按需组合，包括：

- 家庭网络应用：安全/绿色服务、按需带宽分配、数据压缩服务、云化存储服务等；
- 数据中心应用：通过虚拟化技术为数据中心内的不同租户部署一系列虚拟化网络功能；
- 移动/固网网络中的业务链应用：为各类移动/宽带接入用户和企业用户，提供虚拟专用网、网络安全防御、IPv4/IPv6 地址转换、深度包检测、内容缓存、视频/语音编码转换与优化等网络功能。

网络功能虚拟化技术通过将网络设备的硬件和软件解耦，并把传统网络设

备内的业务功能分解成一个个虚拟化网络功能，进行统一编排和管理，然后根据应用需求定义不同的业务链，实现不同业务流经过不同虚拟化网络功能组件，实现各种复杂的网络业务逻辑。

一个数据流顺次由一系列的网络业务节点进行处理，这一系列有序的网络业务节点称为业务链（service chain）。目前业务链的研究中，存在着大量待研究和优化的问题，包括：业务链描述与头封装技术、资源分配与流量调度、业务功能点的弹性部署、业务与流量可视化、多厂商业务链混合部署、业务编排、安全性等。

七、IP+光协同组网

骨干网络主要由 IP/MPLS 路由器和光层波分设备共同组成，通常为两层架构，路由器主要负责业务承载，波分主要完成光纤资源复用和光波长复用，提供远距数据传输。

当前骨干网 IP 与传送是分离运维的，由于骨干网拓扑复杂，流量承载和变化快。运营商需要不断的调整、规划和扩容骨干网络，每次调整都需要 IP 和光的互相配合才能完成。目前 IP 和传送分离运维的模式需要大量的人工协同，反应慢，成本高。

云业务、OTT 业务的兴起导致流量流向预测变得越来越困难，规划网络利用率和实际网络利用率差距巨大，存在大量低利用率的空闲链路，而网络缺乏灵活调度能力，调整困难，造成投资效率低下。

由于分离的运维，需要跨层的业务部署时流程复杂，需要大量的人工协调，因此跨层业务存在部署困难、开通时间长、调整困难等问题，难以满足市场需求。

利用 SDN 技术，在 IP+光协同组网情况下，实现：

- 多层网络统一规划：统一规划和智能集中控制，构建具有灵活调度能力的网络。
- 网络自动部署：简化业务部署简化，通过统一的业务发放平台把多层业务发放简化成单层业务发放，实现业务部署自动化，缩短跨层业务部署时间。
- 多层网络在线实时优化：通过在线流量监测和预测，集中式的流量工程和拓扑优化，实现自动分配网络资源、流量光层自动旁路等，提升资源

优化效率。

- 多层网络协同保护：通过对 IP 和光层告警及性能进行关联，对故障进行快速定界定位，协调 IP 和光层的保护机制。

八、网络安全

SDN 带来的网络可编程能力和开放性，将会为网络安全提供新的技术推动力。受限于传统网络的能力，网络安全与应用安全相互分离。网络安全包括防火墙、IDPS、流量清洗等设备，应用安全包括身份认证、鉴权、审计等。应用系统只能把网络当成管道使用，难以调用网络的能力。网络也无法感知应用的情况，做出有针对性的防护。SDN 技术将会打破这种界限，应用安全系统能够从网络中获取到更加丰富的数据，甚至直接操作网络进行流量的镜像、阻断和过滤等，例如：

- 在 DDOS 攻击防护中，SDN 网络可以实时监测和上报流信息，并根据应用系统的要求，将异常流量重定向到过滤系统进行处理。
- 在网络的访问控制中，身份认证和授权系统可以根据用户的认证情况及权限，动态下发相应的配置给 SDN 网络，使特定的用户只能在特定的位置，访问特定的服务，并实时监控用户的访问情况。

目前网络安全的一个难题是复杂的网络安全设备导致信息分散，大大增加了安全问题发现和处理的时间。SDN 开放的北向接口能力使集中的网络安全控制成为可能。集中的数据分析和控制能够更快发现网络中的安全问题，并快速做出响应，甚至实现自动化的集中安全控制。

另外，SDN 能够为网络安全设备的部署方式带来新的变化。受限于设备本身的能力，目前的防火墙、流量清洗和 DPI 等设备大部分只能在网络中心部署。边缘网络虚拟化后，可以在网络的边缘部署相应的虚拟化网络功能，使安全问题能够在网络的边缘解决。例如，宽带接入网络虚拟化后，可以根据需要直接在接入网络部署 DPI 和流量清洗等虚拟化网络功能，满足流量分析和过滤的需要。

九、其它需求

IP VPN 智能专线场景：传统网络中，部署 VPN 需要人工确认网络资源，人工配置各个网络节点，开通业务需要一个月以上。利用 SDN 对网络资源全局管理，自动确认资源、自动计算最优路由的能力，运营商可以在几分钟内实现网络资源

确认及网络配置，提升企业 VPN 的发放效率，并与 vDC 和业务链技术相结合，向企业提供专线+虚拟增值业务的一站式服务。

企业园区场景：通过统一的 SDN 策略控制器，可以自动感知用户多种维度的属性，在用户接入网络后自动下发精细化控制策略，策略控制点可以与边缘接入交换机进行联动控制，本来需要直接下发到边缘设备上的策略可以统一下发，策略控制点数量大幅缩减，极大简化了运维工作量。

3.2 SDN 关键技术分析

一、网络建模和开放 API

随着网络规模不断扩大，网络复杂性不断增加，采用传统网络配置管理协议 SNMP 进行逐点业务配置繁琐且易出错，难以满足网络业务自动化部署的需求。采用 SDN 技术实现自动化主要依赖于 SDN 控制器及协同层软件系统。通过逐层向上抽象网络建模以屏蔽下层技术实现细节，基于网络模型的多层开放 API 接口来分解 SDN 软件系统复杂性和简化可编程的相关问题，从而构建开放可演进的支持多技术、多厂商、多域的 SDN 软件系统平台。网络建模是对网络抽象的过程，网络模型因其抽象层次、抽象目标的不同而形成不同的网络抽象模型。

业务模型：是描述用户网络业务需求和目标的高层次统一抽象模型，其特点是面向用户业务需求的抽象，屏蔽技术实现细节，提供平台无关和方案无关的端到端业务描述。

网络模型：是描述网络功能方案的抽象模型，其特点是面向各种网络功能方案和实现技术，提供一个方案相关的网络功能描述。

设备模型：是描述物理或虚拟设备配置、接口协议等的抽象模型，其特点是提供面向物理设备的特定配置和控制接口的具体描述。

其中，网络模型和设备模型是传统网络研究的重点，已经形成了比较全面的模型定义及使用接口，业务模型是 SDN 开放网络能力的核心要素。面向用户需求的网络业务模型提供了统一的开放框架与网络抽象，使开发者在一致的业务抽象模型基础上根据需求开发应用与服务，能够描述网络维护配置需求和业务发放的需求，适应多厂商、跨平台的要求，消除因厂商差异化实现带来的困惑和障碍。

二、网络虚拟化

下一代网络虚拟化平台的核心理念是将云计算的虚拟化思想应用到网络领域，为用户提供一个充分自控的虚拟网络环境，彻底解决基础网络能力的开放问题，允许用户自定义拓扑、自定义路由以及自定义转发。

从架构上讲，基于 Network Hypervisor 的 SDN 网络是一种二级控制器的架构。Network Hypervisor 本身是一种专门做虚拟化的基础控制器，负责管理基础物理网络资源，并完成虚拟化资源到物理资源的映射。它在设计上通过虚实映射算法完成全局虚拟网络需求与物理网络资源的最优化分配，用户虚拟网络中的节点和链路实际上映射到物理网络的节点和链路上，算法按照一定约束原则保证网络资源得到充分利用。在物理网络发生故障时，通过重映射技术，让用户的网络节点和链路看似“永久在线，永无故障”。

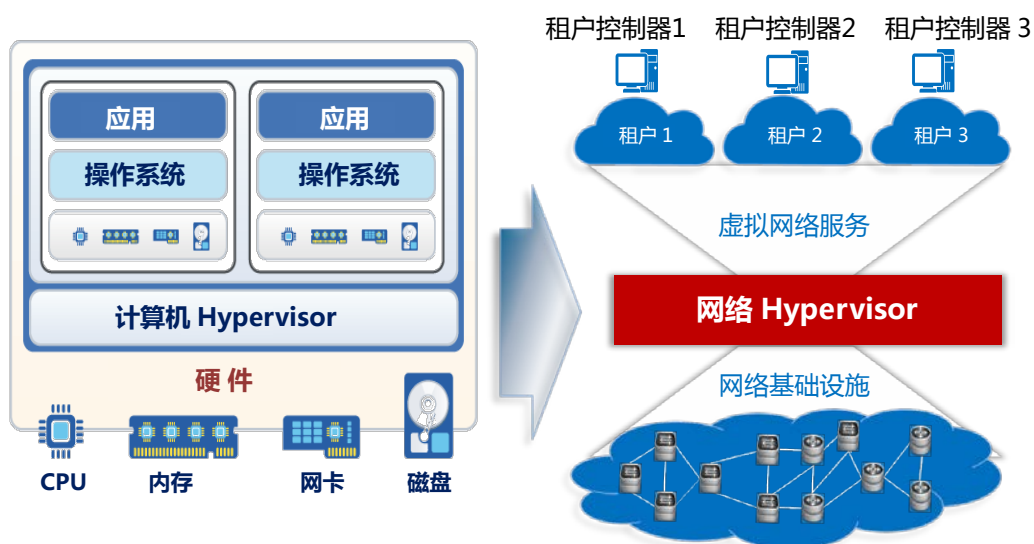


图8： Network Hypervisor 应用于网络

三、多维路由算法

传统 IP 网络中，每个路由器节点会根据 IGP 路由协议获得的网络拓扑和链路度量等信息，采用最短路径算法计算到目的 IP 地址的最短路径，数据报文就沿着该最短路径进行逐跳转发。但是，IGP 计算最短路径时并不考虑链路拥塞状态，即使最短路径上的链路非常拥塞，报文仍会从这些链路上进行转发，所以会造成网络中有的链路拥塞，有的链路空闲。如 9 图所示，网络中绿色链路利用率只有 20%，但是语音业务、VPN 业务、Internet 业务仍走在红色链路上，因为红色链路在源宿节点间的最短路径上。

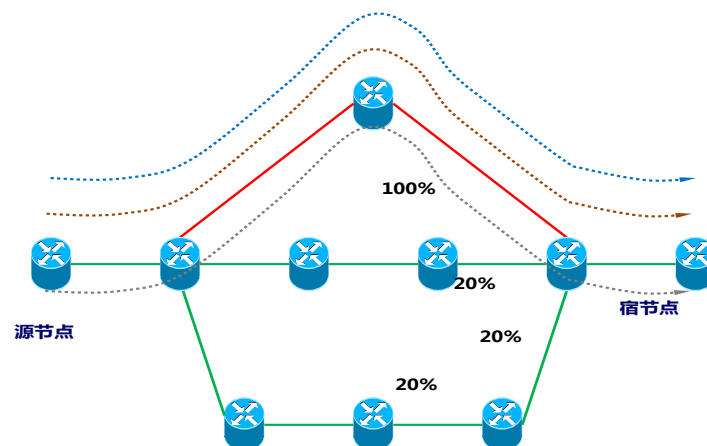


图9： 传统路由算法效果示意图

为了改变这种状态，业界提出了 MPLS-TE 流量工程技术，它在计算最短路径时会考虑剩余带宽情况。但 MPLS-TE 有两个缺点：1) 网络的带宽利用率和业务到达的前后顺序有关，会造成网络利用率的下降；2) 分布式协议造成切换时，各头节点独立计算恢复路径，会在关键链路上发生抢占从而导致恢复时间过长。

SDN 集中式控制的出现使得上述问题迎刃而解，其关键技术是多维度路由算法 MCRA (Multi-Criteria Routing Algorithm)。MCRA 算法基于 SDN 控制器获得的全网拓扑信息和链路使用信息，为每条业务计算满足业务 SLA 需求的合理路径，同时尽可能满足一定的整网工程目标。如图 10 所示，语音业务要求延时短，MCRA 算法就会尽可能将其调度到最短路径上，VPN 业务要求低延时、低丢包率，MCRA 算法就会尽可能将其调度到带宽有保证的次短路径上，互联网业务属于“尽力而为”业务，对延时容忍度比较高，MCRA 算法就有可能将其调度到比较长的路径上。

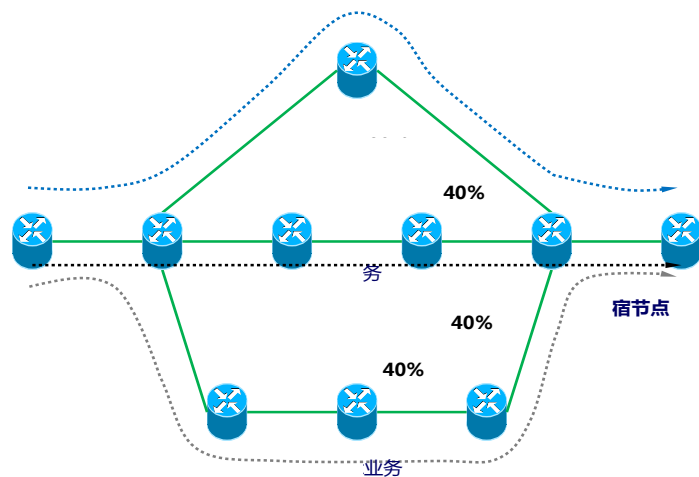


图10： 多维路由算法效果示意图

MCRA 克服了分布式路由“单个业务最优，但全网不优”的固有缺陷。MCRA 分为三种场景：1) 业务下发场景，此时需要较快的计算出满足业务需求的路由，如果某些关键链路被占用，需要进行一些局部调整，以使得尽可能容纳更多的业务；2) 故障恢复场景，此时需要尽可能快且尽可能多的为所有受故障影响的业务全部找到合适的路由；3) 全局优化场景，隔一段时间或者事件触发对全网进行一次全局优化，此时要考虑优化目标的达成，以及如何从当前网络状态无损地调整到优化后的网络状态。

四、可编程转发平面

控制与转发分离后，与传统 IP 网络转发平面相比，SDN 转发平面具有更简单的硬件结构和更精细的流控能力，以及更开放的配置接口等特点。目前主流的 SDN 转发平面主要由支持 OpenFlow 协议的交换机，或者 OpenFlow 专用交换机组成。前者保留传统通用交换机控制和管理功能，同时支持 OpenFlow 协议及其流表定义，因此又称为混合交换机；后者专用于独立的 OpenFlow 网络环境。这里的交换机是一种逻辑概念，可以由硬件实现，也可以由软件实现。此外，交换机内部采用流表机制，可同时支持 L2 至 L4 层转发。

由于 OpenFlow 采用多级流表结构来匹配任意协议封装，对硬件可编程能力和处理速度要求过高，业界尚无成熟的 OpenFlow 硬件交换机解决方案，实现方法仍然在不断探索中，流表处理和查表能力有待进一步提升。目前主流的解决方案包括基于 NP、TCAM、FPGA、SRAM 或者上述组合形成的各类方案，转发性能、

流表级数、系统容量以及设备成本控制几个方面均不成熟。

OpenFlow 软件交换机主要应用于虚拟化网络中虚拟机之间的通信，以及虚拟机与外部网络间通信，既可以支持传统交换机模式，也可以支持 OpenFlow 模式。与硬件交换机的技术局限性不同，软件交换机技术由于实现机制和用户流量封装具有极大灵活性，受到业界重点关注，在 dpdk、netmap 等开源技术推动下不断得到完善和优化，目前很多已经达到万兆及万兆以上网卡的线速转发性能。

OpenFlow 接口开始简单的将转发抽象成单表多报文域的操作，但是在过去的 5 年里，OpenFlow 因为需要支持更多的报文字段和多表的操作而变得越来越复杂。因此，未来 OpenFlow2.0 将会基于可编程的转发思想，重新定义一种新的 OpenFlow 协议标准，即用户可自行通过控制器下发转发的业务定义，通过将抽象转发模型映射为 Match+Action Tables (MAT) 模型，使控制平面能够灵活的定义数据转发，对于新协议的支持也会更灵活。

五、控制器相关技术

SDN 采用逻辑集中的控制平面获取网络全局信息，对网络资源动态调配和优化，因此，SDN 控制器的性能对网络的整体性能具有重要影响。随着网络规模的不断增长，单个控制器的处理能力和 I/O 能力有限，将无法满足 SDN 控制平面的扩展性和可靠性需求，所以产生了多控制器和层次化控制器架构。

在多控制器架构下，网络被划分为不同的区域，每个区域部署一个或者多个控制器，控制器通过保证网络状态的一致性实现对网络的协调统一管理。在控制平面的实现上，可以表现为单台转发设备由多个控制器控制，或者单个控制器控制多个转发设备。层次化控制器架构下，多个控制器按功能进行垂直划分，对网络进行分布式管理和控制。不论哪种架构，控制器的核心是保证网络状态一致性，只有提供一致的全局网络视图，才能保证应用和控制解耦合。

在 SDN 网络的实际部署中，为了满足扩展性、隐私性、网络故障隔离等需求，通常将大的网络划分成为多个自治域。每个域由一个或者多个控制器控制。每个 SDN 控制器只能直接掌握本地的网络视图（如网络拓扑，可达性、交换机处理能力，流表项以及网络状态等），为了向网络用户提供端到端的服务，不同域中的控制器之间需要进行一定的交互，从而构建全局的网络视图。东西向接口即 SDN 控制器之间接口，用于交换相关的控制信息。

3.3 SDN 标准化组织及开源组织

3.3.1 SDN 标准化组织及其标准化工作

（一）ONF

ONF 是 SDN 技术重要的标准化组织之一。截至 2014 年 12 月，ONF 的会员数量已发展到 150 多个，包括电信运营商、服务提供商、网络设备供应商，IT 设备提供商、软件提供商、服务器虚拟化厂商、网络虚拟化厂商、芯片商、测试仪表厂商等。

在 2014 年 10 月，ONF 对组织架构进行了梳理，将工作整理划分成四个技术领域，规范领域负责协议和转发模型的定义，业务领域负责架构、北向接口和 SDN 业务的定义，运营商领域负责运营商的 SDN 需求的输入，市场领域负责认证、测试和营销活动的组织等，在各领域的设置相应的工作组。

ONF 推动的 SDN 技术标准涵盖 SDN 技术的各个方面，主要包括 SDN 架构、南向接口、北向接口、SDN 安全、转发模型、光网络及无线网络的特定协议扩展、信息模型、运营商/企业/数据中心的 SDN 需求、向 SDN 网络迁移的案例及工具等。

ONF 初始工作的核心是开发和推动南向接口协议 OpenFlow，目前 OpenFlow 的南向接口标准已趋于成熟，已发布 OpenFlow-Switch, OpenFlow-Config, OpenFlow-NDM 三个南向接口标准协议。随着标准化工作的逐步展开，ONF 又启动了 OF-Config 协议、SDN 架构、网络迁移、北向接口、SDN 安全等方面的标准化工作。目前，已发布的标准有 OpenFlow 1.4、OF-Config 1.2、SDN 架构 1.0，其余的标准化工作正在进行。

开源工作在 ONF 逐渐受到重视，ONF 将在各个领域成立开源项目组，支撑各领域的技术研究、标准化和产业推广。

表1：ONF 各项目组 and 标准化进展

领域	项目组名称	职责	发布的标准
规范领域	OpenFlow & PI	OpenFlow 1.x 和下一代 OpenFlow 协议 (OF-PI)	OpenFlow 1.5、OF-PI 技术报告
	配置协议	南向管理通道协议开发	OF-Config 1.2 发布

领域	项目组名称	职责	发布的标准
	转发抽象	转发模型	表模型匹配规程 1.0 发布
	光传送和无线/ 移动	光传送网络和无线网络的特定协议扩展	光传送网用例、光传送网的 OpenFlow 需求分析
	测试	互操作测试和设备认证	顺从测试规程 1.0
业务领域	架构	SDN 架构和术语	SDN 架构 1.0 技术报告
	NBI	北向接口	
	安全	SDN 和 OpenFlow 安全	
	Layer 4-7	应用 OpenFlow 开发 L4-L7 层业务	
	OAM	网络 OAM	
运营商领域	迁移	传统网络向 SDN 网络的迁移案例和工具	迁移工具和度量技术报告、SDN 迁移考虑和用例技术报告
	企业	企业 SDN 需求输入	
	电信运营商	运营商 SDN 需求输入	
	数据中心	数据中心运营需求输入	
市场领域	市场推广	白皮书编写、市场营销活动参与和组织	
	专家认证	SDN 专家认证	

（二）ETSI NFV ISG

2012 年 10 月，由 AT&T、英国电信、德国电信、中国移动等 13 个主流运营商牵头，联合多家网络运营商、电信设备供应商和 IT 设备供应商共同推动在 ETSI 成立网络功能虚拟化工作组（ISG），旨在推动 NFV 技术框架研究和产业化发展。

NFV ISG 工作组的主要工作是整合现有虚拟化技术和标准，制定需求及架构规范，而协议层面的需求及协议开发工作需要在其他标准组织开展。2014 年 10 月，NFV 发布了第三个版本的白皮书，主要总结 NFV ISG 一年来各个工作组的进展、对场景、需求、架构等内容进行了更新，明确提出 NFV ISG 对于标准化和开

源社区的态度。NFV ISG 的架构和需求研究基本完成，后续的重点是概念验证（PoC）测试和支持 NFV 技术相关开源项目的开展，如 OPNFV。

NFV ISG 已完成第一阶段的工作，并进入第二阶段。第二阶段的工作重点是：发展可互操作的 NFV 生态系统、进一步澄清第一阶段定义参考点和需求、扩大行业的参与、澄清 NFV 与 SDN 以及相关标准组织、产业、开源社区的关系。

表2： ETSI NFV ISG 主要工作组

工作组名称	工作组职责简述
IFA	保持互操作的一致性，提供一套信息/数据模型、信息流以及协议；改进体系结构及维护规范。
TST	基于 NFV ISG 互操作性规范，维护 PoC 框架，扩展测试活动；推进 NFV 测试规范和测试方法，协调 NFV 解决方案的实验和展示；发布 PoC 案例的研究结果，向开源项目及社区反馈相关需求及实现经验。
EVE	研究新的 NFV 用例及相关的技术特性、NFV 与其他技术（如 SDN）的关系；对 ISG NFV 标准与产业标准（包括事实标准）的 Gap analysis。
REL	研究可靠性、可用性及保障性对 NFV 环境中的增强技术和相关业务需求；在可靠性、可用性 & SLAs 的实现机制方面提供指导。
SEC	评估新 NFV 小组项目可能存在的安全方面的影响；明确安全领域的最佳 NFV 实践环境；研究 NFV 安全增强技术，为 NFV poc 的安全提供支持。

（三）IETF

IETF(Internet Engineering Task Force) 是全球互联网最具权威的技术标准化组织，主要任务是负责互联网相关技术规范的研发和制定，重点是定义设备间的协议及技术规范。随着 SDN 技术理念被业界广泛接受，IETF 也成立相应的工作组全面开展标准化工作，其研究更注重重用现有的协议及架构，立足于以演进的方式实现集中控制和网络的可编程。

表3： IETF 主要工作组

工作组	主要研究方向
I2RS(Interface to the Routing System)	核心思想是在目前传统网络设备的路由及转发系统基础上开放新的接口来与外部控制层通信，外部控制层通过设备反馈的事件、拓扑变化、流量统计等信息来动态地下发路由状态、策略等到各个设备上去。选择使用 IETF 现有的管理协议 NetConf 和 YANG 来实现路由系统的开放。目前已完成了用例和架构标准

	的开发，正在定义信息模型、数据模型。
SFC (Service Function Chain)	主要职责是定义如何将多个业务功能通过业务功能链串联起来形成不同的业务功能组合，满足不同的需求和部署场景。目前各项工作还处在初期，只有需求和架构相对稳定。
ALTO (Application-layer Traffic Optimization)	主要通过为应用层提供更多的网络信息，完成应用层的流量优化，用于判断的参数包括最大带宽、最少跨域、最低成本。已发布 4 篇 RFC，包括需求、协议、服务器发现等内容，正在定义 ALTO 部署、信息模型、数据模型等。
ForCES (Forwarding and Control Element Separation)	主要定义设备内部转发控制分离的需求、框架、协议、转发单元模型、MIB 等。已经发布了 15 个 RFC（其中 4 个已被废除），协议定义基本完善。
PCE (Path Computation Element)	PCE 工作组中涉及 SDN 主要是有状态的 PCE 技术，该技术是一种基于 MPLS 的路径集中计算技术，在传统 MPLS-TE 的输入外增加标签交换路径信息，使得网络整体流量模型最优。目前该技术在 PCE 工作组基本稳定。
SPRING (Source Packet Routing in Networking)	MPLS 和 IPv6 的源路由相关标准定义，在网络中实现分段路由能力。各项工作处于初期，用例、技术方案目前相对稳定。

在网络控制器和网络设备之间的配置模型方面，IETF 推出 BGP 配置模型，后续将会推出 MPLS、L3VPN、VRF 等配置模型。另外，Cisco 也提出了 OpFlex 协议用于网络控制器和网络设备之间传递策略指令。

（四）CCSA

CCSA⁵开展的 SDN 相关标准工作主要体现 TC1、TC3 和 TC6 这几个技术工作组委员会内，包括：

- IP 与多媒体技术工作委员会(TC1)设立了 FDN（未来数据网络）特别工作组（SWG3），研究借鉴 SDN 及 NFV 等新技术思想的 FDN 的应用场景/需求和问题分析、术语及定义、系统架构和功能模型、协议框架、设备技术规范、互通规范和测试规范等。目前已经完成 FDN 的应用场景和需求、基于 FDN 的 IPv6 技术要求、基于 SDN 的 IP RAN 网络技术要求、基于 FDN 的宽带客户网络应用场景及需求等标准的报批。
- 网络与交换技术工作组委员会（TC3）的网络总体工作组启动 SVN（软件化智能型通信网）项目，研究在智能管道基础上进一步引入 SDN 和网络虚拟化概念，同时无线核心网的控制虚拟化也在该工作组进行研究。目前主要研究基于 SDN 的智能型通信网络、基于 SDN 的虚拟私有云、控制器虚拟化以及无线核心网控制虚拟化等方面的技术标准。

⁵ CCSA（中国通信标准化协会，China Communications Standards Association），是中国通信标准领域的领导者，负责国内通信技术领域的标准制定。

- 传送和接入网技术工作委员会（TC6）启动软件定义分组传送网 S-PTN 项目，致力于将 PTN 网络 SDN 化，进一步提高运营管理效率。目前已经完成软件定义光网络技术的前期研究项目，正在进行软件定义光传送网（SDTN）总体技术要求标准的开发工作。

五、其他标准组织内的 SDN 相关工作

（1）BBF

BBF 作为全球电信网络运营商的重要需求和架构性行业组织，其主要业务领域是 IP 承载网和接入网。

BBF 的 SDN 工作目前处于场景、需求和框架定义阶段，在业务创新和市场需求工作组(SIMR)内成立了“电信宽带网络的 SDN 高层需求和框架”项目(SD-313)，该项目对接入网、城域网和骨干网络，包括 IP+光网络的 SDN 高层需求进行了定义。之后成立的“第一阶段 NFV ”研究报告(SD-340)识别了宽带多业网络中引入 NFV 及可编程性相关的 11 个用例，分析了涉及对现有网络的影响。这些项目将于 2015 年发布正式研究报告，同时计划把 ETSI NFV ISG, IETF 和 ONF 的 SDN/NFV 标准成果引入 BBF，以推动标准和产业尽快成熟。

（2）MEF

MEF (Metro Ethernet Forum, 城域以太网论坛)是一个专注于解决城域以太网技术问题的非盈利性组织。MEF 主要从四个方面开展技术工作：城域以太网的架构；城域以太网提供的业务；城域以太网的保护和 QoS；城域以太网的管理。

2014 年 9 月,MEF 发布了“第三张网 (The Third Network)”的愿景，提出了 LS0(Lifecycle Service Orchestration, 生命周期服务编排)的理念，指出未来网络应该包含服务编排功能、API、协议无关的 NaaS 信息模式以及在物理和虚拟服务端点之间的服务定义等。

LS0 是一个平台，其能够处理从客户订单到服务交付的控制、从数据采集到性能等级的保障、从故障修复到提供业务报告、以及为客户提供各种分析报告等一系列服务。LS0 的六大功能包括实施、控制、性能、保障、使用和分析，从而敏捷地部署动态服务，提高新型企业网络服务的交付速度，让客户自己就能简单地通过一个 Web 门户来配置和管理这些产品及服务。以 MEF 的 LS0 理念，SDN 控制器通过对北向 API 的抽象，引入了虚拟网络，屏蔽了应用匹配不同网络技术的

复杂度，从而在端到端的虚拟网络抽象层上实现端到端业务，将相关的网络实施交给控制器去做。

(3) ITU-T

ITU-T 的 SG11、SG13 和 SG15 也在各自的研究领域内开展了相应的 SDN 标准研究工作。

3.3.2 SDN 开源组织

(一) ONOS

ONOS (Open Network Operating System) 是由 SDN 技术最早创造发明的斯坦福、伯克利等知名大学联合运营商、设备制造商发起的非盈利性开源社区组织，对 SDN 的发展有重要的影响力，其目标是创建一个开源的 SDN 网络操作系统，定位满足运营商对网络性能的电信级要求，满足运营商网络迁移到 SDN 网络的需求。

ONOS 架构从设计之初就充分考虑了运营商的网络需求，即高可靠、高扩展能力和高性能，同时也充分考虑了南、北向 API 接口的抽象，以期在 SDN 应用领域有更广泛的适应性。ONOS 架构的基本特性包括：

- 分部式内核架构：ONOS SDN 控制器平台可以通过分布式集群的方式来满足运营商对网络扩展性、可靠性和高性能要求，实现 SDN 控制平面对电信级的要求
- 北向接口抽象 API：提供网络全局视图，可以方便地实现对网络的控制、管理和业务配置。北向接口的抽象可以实现网络的敏捷管理和控制，提供对网络的灵活可编程能力，满足运营商快速响应市场业务的变化需求。
- 南向接口抽象 API：可以通过 Pluggable 南向接口协议，实现传统网络和未来 SDN 网络的混合组网及平滑迁移的能力，给运营商选择设备带来灵活性。
- 软件模块化：使网络控制软件更加容易开发、调试、维护和升级，可以通过软件社区化的运作方式给运营商带来灵活的选择与组合。

现阶段，ONOS 提供的应用场景主要有以下 4 个：

(1) SDN 多层的协同控制：主要基于 IP+光应用场景，通过 SDN 控制器实现 IP 层和光层的协同控制，提升网络的效率与性能。

(2) SDN 与 IP 网络的融合：通过 SDN 技术实现 SDN 网络与现有 IP 网络的混合组网与迁移。

(3) 分段路由应用：基于 SDN 网络架构和分段路由技术，简化网络的业务配置。

(4) 网络功能作为一种服务：基于 SDN 技术，释放网络的潜能，通过把网络功能开放出来，提升运营商网络的价值。

(二) Opendaylight

2013 年 4 月，由 Cisco、IBM、微软、NEC、Juniper 等多家通信、IT 巨头合作启动了 OpenDayLight 开源项目，该项目作为 Linux 基金会的合作项目，目标是建立一个开源开放的平台，推动 SDN/NFV 技术的创新。Opendaylight 成立以来受到业界的广泛关注，截止到 2014 年 12 月已拥有 44 个成员。

Opendaylight 提供了一个开放的开源 SDN 框架，其中控制器平台是 Opendaylight 的核心，包含一系列动态可拔插的网络功能组件。南向接口以插件的方式支持多种协议，通过业务抽象层对控制器平台代码提供统一的接口，屏蔽底层设备协议的差别，使网络服务与底层设备协议完全解耦，尽力保证模块价值最大化。北向支持 OSGI (Open Service Gateway Initiative, 开放服务网关初始化) 框架和双向的 REST 接口，同时提供网络模型、网元、拓扑等多种 API 接口供应用层调用。

OpenDaylight 已发布 Hydrogen、Helium 两个版本，第三个版本 Lithium 已启动，计划在 2015 年 6 月 25 号发布。Lithium 将进入到物联网/无线领域，运营商领域爱立信也提出 VPN 方案。

OpenDaylight 影响广泛，其在稳定性、性能上的问题也在随着新版本的推出不断完善。

(三) OPNFV

OPNFV (Open Platform for NFV) 是一个聚焦于发展 NFV 的开源平台项目，成立于 2014 年 9 月，该开源项目旨在提供运营级的综合开源平台以加速新产品和服务的引入，建立 NFV 生态链，构建事实标准，加速多厂商互通和 NFV 部署。

OpenNFV 由运营商主导方向，主流的通信厂商、IT 厂商、云系统商和器件商是技术主要贡献者。2015 年 1 月，OPNFV 已发展 50 多个会员，成为业界最重要的 NFV 开源组织。

OPNFV 的初期研究范围主要包括：

- NFV 基础设施（NFVI）
- 虚拟化基础设施管理（VIM）
- 应用程序编程接口（API）
- 其他 NFV 相关接口/部件

这些内容形成 VNF 的基础设施（NFVI）及管理编排（MANO）。

4 SDN 产业链发展现状及主要趋势

4.1 SDN 产业链构成

现有信息和通信产业链上的各方在 SDN 产业的发展中承担了重要作用，亦将是 SDN 产业生态中的主要元素，如图 11 所示，包括用户（如电信运营商、互联网公司、企业网、校园网等）、解决方案提供商（SDN 应用提供商、设备制造商、软件厂商、测试仪表厂商、硬件芯片厂商等）、标准与开源组织、高校与研究机构等。



图11： SDN 产业生态要素

就需求方而言，电信运营商和互联网公司对 SDN 的具有差异化的诉求。电信运营商希望能够借助 SDN 技术来优化现有网络架构，降低建网成本和运维成本，

简化网络部署，提升网络弹性，提高业务开通效率和资源利用率，促进网络能力开放，提升管道的智能化运营能力。互联网公司则希望通过 SDN 技术增强网络虚拟化能力，满足数据中心云化带来的大量虚拟机和数据横向迁移的需求，适应云平台的扩展性和多租户需求，并通过实施流量工程，提高数据中心互联链路的利用率。

就应用提供方而言，SDN 应用提供商期望利用虚拟化及管理平台北向开放的 API，面向不同应用领域提供不同的应用服务，包括网络类应用（如广域网流量调优、网络安全、负载均衡、性能监控与网络性能管理等）和增值应用（如视频监控、企业 QOS 保障、统一通信等）。从网络类应用看，电信运营商与互联网公司用户可通过调用接口，直接将应用能力集成到自身解决方案中。从增值应用来看，增值服务提供商和系统集成商可以在各自应用中集成网络感知和虚拟化配置管理能力，从而打通“云+管+端”，通过“内容+应用+平台”组合提供更优的产品解决方案。

就设备提供方而言，SDN 技术的发展对传统设备制造商的市场地位形成一定的冲击，同时也给各厂商特别是新兴设备商带来新的机遇。目前，传统设备制造商的 SDN 战略，一方面是跟踪并发布支持 OpenFlow 的 SDN 产品和解决方案；另一方面积极探索基于现有架构实现网络集中控制和北向接口开放应用 API 的便捷化与增值化的技术，通过管道能力开放帮助运营商简化运维，提升用户体验，从而维护传统设备商在 SDN 变革中的竞争优势。新兴初创企业在 SDN 产业变革中寻找和发现机会，在 SDN 设备、网络虚拟化等多方面产生了很多先进的解决方案，一方面在某种程度上打破传统设备厂商的垄断，另一方面也被传统设备厂商大量投资并购从而巩固传统厂商的市场地位。

就软件厂商而言，希望发挥其在软件和虚拟化领域的技术优势，在 SDN 控制器及应用上提供产品和解决方案。通过虚拟化技术，将物理资源池化，通过网络操作系统以云服务的方式提供，以此降低网络部署对专用设备的需求，转而使用通用服务器，并实现资源的灵活配置。

就硬件厂商而言，主要是提供 SDN 芯片等产品和解决方案。随着 SDN 网络发展的提速，特别是 OpenFlow 标准和白牌转发设备的发展，商用芯片在 SDN 生态环境中的作用也越来越重要。一方面，部分厂商自研定制芯片，另一方面则由专

用芯片厂商提供交换芯片。为在新兴的 SDN 市场占有先机，目前已经有多家公司在开发针对 SDN 的芯片，其中包括 Nick Mckeown 团队与 Texas Instruments 合作试图设计出一款协议无关的流式转发芯片，并与 Barefoot、Intel 合作初步开发了一种描述协议独立的转发流程的语言—P4。此外，Broadcom、Marvell 等传统交换芯片厂商，通过 SDK 和开放编程接口等方式来支持 SDN。

就测试仪表厂商而言，主要是对已有的解决方案提供测试工具及测试方案，目前主要覆盖南向协议的仿真和测试，编排层（orchestration）仿真和测试，以及虚拟化软件等解决方案的测试。

就标准化而言，全球多个标准组织都在积极争夺 SDN 技术标准的话语权，包括 ONF、IETF 等都试图引领 SDN 技术标准的发展方向。从当前产业界推动标准化的方式来看，通过开源形成事实标准已经成为产业界推动标准化的一个大趋势，像 OpenStack、OpenDayLight、ONOS、OCP 等开源项目都已成各自领域的事实标准，推动和引领技术发展。

此外，高校与研究机构是产业技术创新的一个重要来源，而且学术界对新兴网络架构的研究以及试验基础设施的部署都对 SDN/NFV 形成广泛的需求，另外在产业人才培养方面发挥巨大作用。国外，美国几十所高校和研究机构在 GENI 项目的推动下，在其校园网部署了 SDN 并接入 GENI 试验床，开展新型网络架构研究和实验。国内，科技部 863、973 重大专项以及工信部专项三都将 SDN 作为重要的技术研究方向，包括清华大学、中科院计算所、北京邮电大学、北京大学等国内高校和科研机构都在 SDN 领域积极开展相关研究。

4.2 产业链发展动态概述

当前，全球 SDN 产业生态正在积极的构建中，针对一些特定的应用场景及需求(如数据中心内部组网、跨数据中心链路调优以及移动回传网络等), 已经可以提供相对成熟的解决方案，但整体上 SDN 技术及商用解决方案还远未成熟，正处于过度期望阶段和概念验证期，即将进入幻灭到成熟阶段，估计 3-5 年后进入发展阶段。

4.2.1 电信运营商

作为 SDN 技术发展的重要推动者，电信运营商结合业务和网络发展需要，积极推动 SDN 技术标准和商用解决方案的成熟。根据 Info netics 的调研，全球 97% 的运营商计划部署 SDN，主要驱动力包括自动业务提供、业务快速引入、业务自动化等。

国际上，包括 AT&T、NTT、西班牙电信等行业的引领者，已经在 SDN 部署方面取得了显著的进展。其中，2013 年 9 月，AT&T 推出的 Domain2.0 计划，已经成为行业发展的一个重要风向标。Domain2.0 旨在通过 SDN/NFV 技术将网络基础设施从以硬件为中心向以软件为中心转变，实现基于云架构的开放网络。在此基础上，AT&T 又推出了基于 Domain 2.0 计划的用户定义网络云（User-Defined Network Cloud）愿景，其目标是在 2020 年将 75% 的网元纳入新的架构。2014 年，Domain 2.0 已经开始了小范围的测试和验证工作，并推出按需网络（Network on Demand）等新型业务，引入了一批新兴运营商。AT&T 将在 2015 年进行更大规模的网络实验，并期望在 2016~2017 年实现真正的商业部署。

国内，三大运营商也积极开展 SDN 技术研究，并且在数据中心网络、移动回传网、传送网、移动核心网等应用场景开展一些现场试验和小规模部署。

表4：运营商 SDN 发展的战略规划

运营商	SDN 产业发展战略观点	未来 3-5 年的计划	典型应用
电信	SDN/NFV 是网络架构上的一场全局性深刻变革，对网络的规划、建设、维护和运营产生深刻影响，还需要流程和人才的支撑，因此在运营商的引入将是一个长期的过程。	将主要考虑 SDN/NFV 在 IP 骨干网、城域网、数据中心网络、传送网、移动核心网和 IMS 等场景中的应用，重点关注架构及接口标准化、与传统网络共存、控制器、业务链、MANO 以及网络性能、可靠性、安全性等，将开展试验室测试、现场试验推动相关设备及软件的成熟和产业链的发展。	IP 骨干网：网络资源可视化及流量优化调度； IP 城域网：基于 NFV 和业务链的智能管理和配置；虚拟网络功能 vApp； 数据中心网络：基于 SDN 的大二层互连； 移动核心网：控制单元虚拟化和业务链； IMS：基于 NFV 技术设置统一的硬件资源池； 传送网：基于控制器实现多厂家互通。
移动	SDN 给中国移动带来的价值分为开源和节流两部分。开源方面，SDN 提供了新的网络业务模式。节流方面，通过 SDN 的智能流量均衡调度能够全面提	在 3~5 年内，最优先的应用场景包括：数据中心场景，重点实现网络服务虚拟化，租户可自助开通虚拟网络、业务链服务；SPTN，面向集客专线提供灵活动态的业务开通；广域网：实现集中的流量均衡调度。	数据中心：主要为公有云、私有云提供虚拟私有云业务，下一步业务产品将支持业务链功能。 广域网：主要应用在 IP 骨干网、省网核心出口、城域网核心出口、IDC 出口等场景，近期重点考虑基于传统协议作为南向接口，包括 BGP、PCEP、Netconf 等；后

	升网络带宽利用率，同时保证关键业务服务质量。		续推动北向接口的标准化。 SPTN：在现有的 PTN 网络基础上采用 SDN 的先进理念进行演进及升级，形成具有软件控制能力的新一代分组传送网络 SPTN。
联通	联通将 SDN 定位于局部网络优化而非全网革命性技术。SDN 的控制转发分离、业务可编程、控制集中等特点对于联通网络优化、引入灵活性、降低网络建设和运维成本及催生新型网络业务具有重要价值。联通将深度参与 SDN Controller 功能和应用的定制开发。	未来 3-5 年内，SDN 将最先应用于 IDC（内部和互联）、vCPE、SBNG、Service Chains、OTN、IP RAN 等边缘和局部网络场景。联通将召集合作伙伴进行关键功能开发、验证测试及外场技术落地。	数据中心：分为 IDC 之间的互联和 IDC 内应用两个方面。以联通集团级 IDC 基地互连为基础，逐步推进至全国数据中心。 核心网：以 VoLTE 为切入点，引入 IMS 网络功能虚拟化架构，实现 Service Chain 试点，推进核心网及业务系统的全面云化。 传输网：实现租户大带宽业务的快速建立与开通，进一步实现光层与 IP 层的资源协同。 移动回传网：通过在汇聚层引入 SDN 控制器，降低 OPEX 和 CAPEX，同时提升网络智能化水平。 数据网：通过智能弹性边缘实现 BRAS 设备的虚拟化，后续期望基于统一的 SDN 控制器实现 BRAS 的云化组网。

4.2.2 互联网公司

互联网公司是 SDN 技术的引领者和重要推动者之一。SDN 技术最先在互联网公司数据中心内部组网、云平台虚拟化和多租户隔离以及跨数据中心广域网链路调优等场景下应用部署。

国际上，2010 年，Google 公司在其数据中心广域网链路上部署基于 OpenFlow 协议的 SDN 技术显著提升链路利用率，在业界起到了示范效应。2012 年，Google 公司实现对全部数据中心骨干连接的覆盖。2014 年 4 月，Google 宣布推出基于 SDN 和 NFV 技术的 Andromeda 虚拟化平台，用于提供、配置和管理虚拟网络和网络中数据包处理的业务流程点，为开发者提供 DDoS 防护、透明的服务负载均衡、访问控制列表和防火墙、带宽配置以及虚拟机迁移等多项功能。此外，Facebook 在 2011 年发起成立开放计算项目（OCP），其目标是降低硬件采购价格，同时通过软硬件分离降低对硬件的依赖，通过软件化实现快速升级。2014 年 6 月，Facebook 公布了新的开源网络交换技术：包括典型的交换机 Wedge 及基于 Linux 的网络操作系统 FBOSS。其理念是把硬件和软件分解成部件或模块，系统的任意组成部分将更容易的进行改动，从而提高灵活性。

国内互联网公司，包括百度、腾讯也积极开展 SDN 技术的研发，并尝试在数据中心网络中应用部署。

表5： 互联网公司的 SDN 发展战略规划

互联网公司	SDN 产业发展战略观点	未来 3-5 年的计划	典型产品/应用
百度	期望利用 SDN 技术解决线上运行的上万台网络设备批量自动化的进行配置、监控、故障预警及处理、流量分析及调度以及给予历史数据的从流量模型到数据模型的建模预测。	从需求出发，通过解决实际问题加速技术创新和业务快速迭代的方式来推动 SDN 技术的应用和研究。利用 SDN 技术，提升网络流量调度以及网络拓扑的自动化变更能力。	自研万兆交换机拥有自主设计的软硬件系统，支持自动上线配置、集中化的远程变更管理和集中监控。 多租户虚拟化场景：百度开放云作为一个多租户的开放云系统，采用了领先的 VxLAN 技术保证租户隔离，并开发基于硬件加速技术的方案，大幅提高网络性能。 T-SDN 场景：通过 SDN 的方式，传输网由统一平台根据实时流量走向，带宽使用情况，进行自动化的光波链路调度以及拓扑变更配置。
腾讯	以腾讯的视角注意到网络虚拟化以及广域网的流量调度已经成为最主流的应用和使用 SDN 的场景。	未来腾讯会逐步深化现有的应用尝试，应用范围也将逐步覆盖数据中心内、数据中心间、以及广域网通信领域。	腾讯目前也在积极研究开发 SDN 相关的解决方案，应用的领域包括广域网流量调度、数据中心网络虚拟化、数据中心物理 Fabric 集中控制等方面。目前广域网流量调度已经在进行设备调测阶段，数据中心网络虚拟化已经在小规模试点。

4.2.3 设备制造商

当前，电信产业正在面临前所未有的战略转型，体现在从封闭的网络基础设施走向开放；从复杂的网络运营管理走向简单；从纯数字连接，扩展到商业赋能和智能应用交付的新商业模式。全球设备制造商都在积极迎接 SDN/NFV 新技术带来的产业变革，推动 SDN/NFV 技术逐步成熟并实现商用部署。

国际上，包括思科、Juniper、博通、爱立信等传统设备制造商都制定 SDN 发展战略，期望在新一轮的技术竞争中延续其在技术和市场中的优势地位。特别是，思科在 OnePK 基础上又推出应用为中心基础设施战略（ACI），并积极打造由行业领先厂商组成的生态系统（包括 IBM、微软、EMC 等），同时主导成立开源控制器项目 Opendaylight 打造产业生态，并试图继续引领技术和产业发展方向。

国内企业均积极参与国际合作，加快 SDN 相关产品及解决方案的研发，但是最核心的网络操作系统尚没有取得实质性突破。目前，国内 SDN 产品的解决方

案基本是采用以硬件为基础、软硬件相结合的方式，大部分厂商主要研发基于 OpenFlow 协议的交换路由设备和解决方案，只有部分厂商自主研发网络操作系统。而从长远来看，围绕网络操作系统打造产业生态，研发解决方案才更具市场竞争力，才是企业核心竞争力的基础。

表6：国内主要设备制造商的 SDN 发展战略规划

设备制造商	SDN 产业发展战略观点	未来 3-5 年的计划	典型产品/应用
华为	提出 SoftCOM 整体战略和解决方案。	在未来的 3 到 5 年, Huawei 一方面将持续在 vDC, DCI, T-SDN, IP RAN, IP+光等典型的 SDN 场景上进行商业化的方案完善, 提供端到端的从 DC 到运营商承载网络的 SDN 解决方案, 另一方面, 在 NFV 与 SDN 网络架构融合, 基于 Cloud, SDN, NFV 等技术的 ICT 技术融合方面, Huawei 也将投入更多的研究, 帮助运营商客户构建一个以 DC 为中心的 ICT 融合网络, 满足企业及个人客户实时, 按需定制, 永远在线的通信及社交需求。	①以 SoftCOM 整体架构为基础, 于 2014 年发布了多个基于 SDN/NFV 理念的关键产品和技术成果, 面向 DC、IP Core、IP RAN、Cloud Edge 等关键场景构建了全面解决方案。 ② 协同层的产品是 Netmatrix, 控制器的产品是 SNC。 ③ 方案当前的主要场景包括: — DC 及专线: 包括 SDN DCI、vDC、SDN VPN、DC 租户流量调优等场景; — WAN 网络: 包括 RR+、PCE+、TSDN、vIPRAN、SPTN 等场景。 — SDN 和 NFV 结合: 面向企业和家庭的 NGPOP。 ④ 2014 年, 华为与全球领先的运营商合作进行了大量的 SDN 创新和商用测试, 在云 DC、SDN IPRAN、SPTN 等场景下率先实现商用部署。
中兴	提出“ElasticNet”弹性网络战略, 以期给客户带来高度灵活的、开放的弹性网络。	推进 ElasticNet 解决方案从数据中心向企业网络和运营商网络扩展, 从局域网络向广域网、从小规模网络向大规模网络扩展。同时针对 SDN/NFV 面临的诸如超大规模组网、系统级网络安全、网络后向兼容等挑战和问题积极探索, 持续提供应对方案。	① Elastic DC 弹性数据中心方案; ② Elastic Bearing NW 弹性承载方案包含了移动 Backhaul、软件定义光网络和多层多域网络协同等场景; ③ Elastic Cloud Mobile NW 弹性移动云网络方案; ④ Elastic Access NW 弹性接入网方案; ⑤ Elastic Enterprise NW 弹性政企网方案。
烽火	通过对全系列网络产品引入 SDN 技术, 提升产品竞争力, 聚焦于转发平面和控制平面, 应用平面以合作开发为主。	2015 年形成覆盖各类应用场景和客户的商用案例, 2016 年具备全面的产品化能力。 对于已经支持 SDN 的 PTN/IPRAN 产品和 POTN 产品, 实现两类产品混合组网并纳入 SDN 架构统一控制和管理, 实现 IP 和光的协同。	①3/4G 无线回传场景, 可以提供基于 SDN 的 PTN/IPRAN 产品; ②大客户专线场景, 可以提供基于 SDN 的 PTN/IPRAN 产品或 POTN 产品; ③IDC 互联场景, 可以提供基于 SDN 的 POTN 产品, 实现动态带宽分配和调整等功能。
上海贝尔	SDN 以 ALL IP 为前提, 以云	将全面参与 SDN 产业链打造, 借	①CloudBand: 面向 NFV 的云平台产品;

设备制造商	SDN 产业发展战略观点	未来 3-5 年的计划	典型产品/应用
	计算为基础，是未来网络的关键使能技术，是运营商转型的重要抓手。	助公司 SDN 解决方案在数据中心的实践经验，推动 SDN 在电信网络的逐步应用，以运营商灵活的业务提供和低成本网络建设为契机，在 SDN 控制器、编排器、虚拟化网络功能、电信云应用平台等领域积极创新，为运营商向公众和企业提供云服务打下坚实基础。	Nuage 网络虚拟业务平台 (VSP): 完整的多用户云数据中心网络服务解决方案; ②广域 SDN 控制器 (WAN SDN Controller — WSC): 基于 SDN 的解决方案，使传输网络提供动态的、应用驱动的网络服务; ③1830 PSS: 基于 SDN 的传输 (T-SDN) 产品; ④7x50 设备: SDN 就绪的 IP 优化设备; 基于 SDN 构架的接入网解决方案, 包括 vCPE、WiFi 热点的部署方案 SDN/NFV 化以及 ONU/OLT 的演进。
华三	SDN 作为一种技术手段，其目的还是要解决用户现网的问题；解决传统技术解决不了的，或是传统技术实现起来很麻烦的。	——	目前 H3C 全系列数据中心交换机和大部分路由器产品都已支持 openflow 规范；2013 年推出了自有知识产权的控制器平台。 在运营商各个应用场景中，H3C 相应推出了“资源池”方案、大 PoP 方案、基于 SDN 的 IP RAN 方案、vCPE 方案等。在解决方案方面，H3C 推出了 VCF（虚拟融合架构）、ADDC（应用驱动数据中心）、Service-Chain 以及园区多出口选路方案等。 在三大运营商部分省、市试点部署；在大型互联网公司也已正式运行超过 6 个月；在教育、金融、制造业、政府等行业也在积极试点。
大唐	就移动网络方向，SDN 对网络架构，组网，数据传输等都将产生深刻的影响。未来移动通信网络将会逐步引入 SDN 技术。	将考虑 SDN 在移动通信网络中得到更大范围的应用，例如回传网络 and 核心网络统一控制，网络拓扑灵活变化，网络应用动态加载等。	——
迈普	在大数据、云计算的浪潮下对基础网络提出了新的要求传统网络架构应对乏力，尤其是网络的智能流量调度和网络重构的敏捷性；而 SDN 技术的出现使得难题迎刃而解，同时打破了传统网络设备的封闭系统和利益链条。	将在金融、政府、电力等行业推广 SDN 技术落地，将着力于解决 SDN 网络域与传统 IP 网过渡的工程问题，同时也将利用 SDN 技术以低成本方式实现防攻击设备和负载均衡器等产品	——
绿网	SDN 并非提供传统的网络产品所不能提供的功能，而是在时间和经济成本上，有着明显的优势。	数据中心内部和数据中心之间的软件 SDN 解决方案。	包括 SDN 控制 GN-Flush 与扩展 DPI 能力的 SDN 交换机。下一步的方向是 SDN 交换机 VxLAN 网关与 DPI 的融合。
Pica8	SDN 产业发展的关键是开放，只有开放的系统才能真正促	针对新型 SDN 芯片设计研发针对通信网络的 SDN 解决方案，利用	主要产品是 PicOS 开放式网络操作系统和相关 SDN 解决方案。在 OS 方面，

设备制造商	SDN 产业发展战略观点	未来 3-5 年的计划	典型产品/应用
	进应用（APP）的发展，最终形成软件定义网络的生态系统。白牌交换机结合开放的网络操作系统是实现 SDN 的基础。	SDN 技术实现资源池化和虚拟化。	Pica8 和国际主要 ODM/OEM 合作推动白牌交换机和开放硬件平台；在解决方案方面，Pica8 基于专利技术提供虚拟网络和物理网络的一体化管理方案，包括自主开发的 SDN 控制器和管理系统。

4.2.4 软件厂商

国际上，软件厂商主要关注虚拟化与云管理平台解决方案的研发。国内 SDN 软件厂商整体发展不够成熟，目前主要是开发网络安全防护等方面的应用。

在虚拟化方面，国际上主流的软件厂商，包括 VMware、Microsoft、Oracle、Red Hat 等都推出了基于 x86 服务器的虚拟化商用解决方案。在云管理平台方面，主要包括 SIS (Software Infrastructure Stack, 软件基础栈) 和 OSS (Open Source Software, 开源软件)；其中比较流行的 SIS 产品包括 Microsoft System Center、Red Hat CloudForms、VMware vCloud；OSS 产品包括 CloudPlatform、OpenNebula 和 OpenStack 等。

国内 SDN 软件厂商整体发展不够成熟，产品方向比较分散，目前主要是网络安全防护方面。亚信聚焦在 SDN 北向接口，整合 SP，希望推出 AiNOS (亚信网络操作系统)，亚信的产品主要集中在 IP 承载控制层面，在完善虚拟化的过程中，另外和苏州盛科合作推出基于 SDN 的网络安全防护解决方案。启明星辰正在开展的方向是数据中心自定义安全服务链产品，其主要为云数据中心环境提供可以支持多种安全功能按需灵活组合定义、高性能、高可用的网络安全产品，计划在数据中心内部以及广域网互联应用场景中，进一步研发相应的安全保障产品及服务。中盈优创除了系统集成以外，还开发了 SDN 控制器，包括测量系统，决策计算系统，控制执行系统，业务和资源模型系统，业务和能力开放接口等。

4.2.5 硬件厂商

国外硬件巨头企业如 Intel、Broadcom 等以 SDN 交换芯片为抓手，积极布局产业链解决方案，占有国际市场主要份额。其中，Intel 以存储、网络、计算

三大解决方案为基础，通过发布 ONP (Open Network Platform) 平台，构建数据中心的基础硬件平台。在软件平台上，Intel 针对网络交换机，推出 DPDK 软件包并免费开源，借此加速产业链成熟。Broadcom 硬件上以 OCP (Open Computing Project, 开放计算项目) 为主，推出了 OCP Open Switch 系列，软件上推出 OF-DPA (OpenFlow Data Plane Abstraction, OpenFlow 数据平面抽象)，方便开发者快速推出基于 Broadcom 交换芯片的 Open Flow 交换机。2014 年 9 月，Broadcom 发布了 StrataXGS Tomahawk 芯片组，支持 OpenFlow 1.3+、VXLAN、NVGRE、MPLS 和最短路径桥接覆盖和隧道支持等。

国内硬件芯片厂商起步较晚，目前只有盛科推出了商用 SDN 交换芯片。

4.2.6 测试仪表厂商

测试仪表厂商主要提供基于 SDN 技术的测试解决方案，现阶段主要包括 OpenFlow 协议仿真及协议一致性测试，编排层 (orchestration) 仿真和测试、PCEP 仿真和验证等。

表7：测试仪表厂商测试解决方案

测试仪表厂家	测试解决方案
Ixia	Ixia 现阶段提供的 OpenFlow 协议一致性测试产品为 IxANVL，并在其另一产品 IxNetwork 上增加了 OpenFlow 协议仿真用于性能测试。未来计划在 3~5 年内支持更全面的 SDN 测试，如传输领域、无线领域的 SDN、各 SDN controller 之间 orchestration、北向接口的技术。
Spirent	Spirent 提供了 OpenFlow 协议一致性测试方案；计划在其产品 TestCenter 上提供 OpenFlow 1.0/1.3 的控制器和交换机仿真能力，并提供基于 SP-SDN 的 PCEP 的控制器和路由器的仿真能力；在其产品 Velocity 提供编排层 (orchestration) 的测试能力。

5 SDN 发展的问题与展望

5.1 SDN 发展面临的主要问题

5.1.1 非技术方面的问题

(一) 投资回报率的衡量和计算问题

SDN 作为一种对网络具有重大影响的高新技术，其价值已经被业界普遍认可。但是，目前如何准确进行投资回报率的评估还具有挑战。一方面，SDN 技术的引入对网络整体价值格局会产生影响。传统的网络都是由具有特定功能的专用硬件和软件系统组成，其中硬件的价格在网络成本中占有很大的比重，而 SDN 采用标准化硬件，通过加载不同的软件来实现网元的各种功能，因此硬件的成本将大大降低，而软件的价值将显著提升。如何评估两种建网模式对网络成本的影响现阶段还缺少权威的评价标准。另一方面，由于缺少大规模成功商用部署的案例，在评价引入 SDN 技术对帮助运营商节省投资成本和运维复杂度问题上，还缺乏足够的数据支撑。

（二）业务应用的创新还处在起步阶段

一项新技术的引入且被市场广泛接受，需要实现增加收入或节省投资的目标。从行业调查来看，SDN 技术的三大核心商业价值是通过激发创新活力带来新的收入，简化运维降低运维成本，简化网络节省建网投资。这些在 SDN 分层架构模型中都有充分的体现，特别是网络能力向上层应用开放，通过业务感知网络资源的使用状况，实现灵活的资源调度来满足业务对资源的动态需求，改善用户体验创新业务模式，从而带来新的业务收入。但是，目前网络能力的开放还处于初级阶段，基于 SDN 架构的应用创新刚刚起步，大多数网络运营者更多的还只是关注如何通过 SDN 技术来降低建网成本和运维成本，一定程度上制约了 SDN 技术可能带来的新增收入的商业价值。

（三）产业链有效整合面临挑战

正如 4.1 节描述的，SDN 产业链涉及多个环节，而每个环节出于自身利益的考虑对 SDN 的理解都不尽相同，采用什么样的技术路线在业界没有达成共识。目前，业界通过开源模式来整合各方优势资源引领技术发展。在 SDN/NFV 领域，先后成立了 OpenDaylight、ONOS 和 OPNFV 等具有影响力的开源项目，并陆续发布了一些商用部署的版本。但是对于用户而言，除像谷歌、Facebook 等具有研发实力的企业能够基于开源成果按照自己的需求定制开发 SDN 解决方案之外，大多数用户通常还是会依赖设备提供商的解决方案来建设网络，这就存在一个问题，因为厂商在基于开源项目成果研发解决方案时往往会增加一些私有内容，那么如何在保持平台开放性的前提下允许不同厂商定制自有竞争性的方案对用户部署

SDN 方案将是一个挑战。

（四）SDN 对企业内部体制、运维体系、流程和人才等提出新的挑战

SDN 对电信运营商带来的巨大挑战体现在运维和组织管理上。在传统运营商内部，各部门往往是按照专业技术来设立的，如传输部门负责传送网络，IP 部门负责数据网络，无线部门负责无线网络等。但在 SDN 技术架构下，因为存在业务上的重叠和交叉，各部门之间没有明显的界限，如在 IP+光的场景下，同时需要 IP 网络和光传输网络进行统一的路径计算和保护协同等，这就要求在运营商内部打破现有的部门界限，需要各个独立部门之间紧密配合。因此，如何使企业的内部市场、规划建设、运维和 IT 等部门协同一致，而非各行其事，这对企业内部体制、运维体系和人才都提出了更高的要求。如何克服这些挑战，对于推动 SDN 规模商用部署，促进业务创新，为产业链带来真正的商业价值具有重要的意义。

5.1.2 技术方面的问题

（一）开放接口标准化和互操作问题

北向接口标准化工作刚刚起步，尚未形成业界公认的标准。在 SDN 技术架构下，北向接口是控制器和应用程序、管理系统和业务编排系统之间的编程接口，其目标是使业务应用能够灵活地调用底层网络资源 and 能力。由于北向接口是直接为业务应用服务的，因此其设计与业务应用的需求密切相关，具有多样化的特征。目前市场上已经出现了 20 余种不同的控制器，每种控制器对外提供的北向接口都不完全相同，充分说明北向接口的标准尚未统一，这将很难发挥 SDN 技术在业务部署方面快速灵活的优势。

南向接口协议还在不断演进发展。在 SDN 技术架构下，南向接口控制协议同样呈现多样化的发展态势，业界同时提出包括 OpenFlow、PCEP、NETCONF、BGP 等多个控制协议。但是，与北向接口不同，南向接口控制协议的标准化程度较高，特别是 OpenFlow 协议得到了业界的广泛支持并在数据中心已有成功的商用部署。但是，OpenFlow 协议自身还在不断的演进发展中，从 v1.0 到 v1.5 版本，协议的内容一直在扩充，至今也没有完全覆盖所有已知的协议类型，如不支持 VxLAN 协议。

一些接口和功能尚未给出明确定义。在 SDN 技术架构下，要实现“组大网”就需要解决控制平面的扩展性问题，即多个控制器之间如何协同，涉及到东西向接口的定义问题。目前，关于 SDN 东西向的研究刚刚起步（IETF 和 ITU 均未开展相关研究），业界还存在较大的争议。此外，对于 SDN 架构中协同器的具体功能、不同层管理功能的分配以及业务数据模型等细节也还尚未给出明确定义。

（二）性能和可靠性问题

控制器软件的架构和性能尚需不断完善和优化。业界早期发布的 SDN 控制器，如 NOX、POX、Floodlight 等，架构简单且无法满足在商用环境下多厂商之间的互操作，因此业界的影响力较小。目前，OpenDaylight 和 ONOS 开源项目发布的控制器软件，架构相对复杂，而且支持的功能越来越多，但同时也带来了一系列问题，包括代码缺乏优化、文档不够完善、不支持 OpenFlow 多版本同时运行、OpenFlow 多表转发模型的支持不完善等，这意味着后续还需要进行大量的开发工作来满足商用部署的需求，特别是与云服务平台（如 OpenStack）的网络组件进行有效协同，实现网络虚拟化的功能。此外，对于组大网来说，SDN 控制器中需要为进来的每一条数据流选择一条数据通道，这对于软件算法提出了更高的要求。

支持 OpenFlow 协议规范的芯片成为制约 SDN 发展的一个制约因素。目前，业界尚未发布完全符合 OpenFlow 协议规范的芯片，硬件交换芯片中 TCAM 表项的容量成为制约 SDN 控制器控制物理交换机数量的主要瓶颈。此外，为了适应不同的场景需求，OpenFlow 协议增加了对不同报文格式及操作指令的支持，使得 ASIC 芯片全面支持 OpenFlow 协议越来越困难。另外，网络对芯片性能的要求高于对计算能力的要求，使得数据中心主流的解决方案仍然是以 Overlay 方案为主，而且，现阶段不同厂商的硬件交换机和控制器还很难实现互通。

（三）扩展性、稳定性和安全问题

SDN 集中控制架构在扩展性、稳定性及安全方面面临风险。与现有网络分布式的控制机制不同，SDN 架构采用集中式的控制机制，由控制器集中完成路由计算。该机制对于小规模的网络可以适用，但是对于大型网络，需要采用多个控制器协同控制的方式才能实现拓扑的快速收敛，这对控制平面而言具有较大的挑战。此外，控制器在兼顾网络健壮性、稳定性、可扩展性的同时，还可能给会引

入一些新的安全挑战，特别是控制器开源和开放的特性，使其自身具有潜在的安全风险，需要建立一套隔离、防护备份机制来确保其安全稳定地运行，这既包含控制器自身的安全问题，也包含控制器和应用层之间以及控制器和转发设备之间的安全问题。

（四）与现有运维系统的兼容性问题

如何处理与传统网络中 OSS/BSS 等管理、运维系统的关系还有待进一步研究⁶。SDN 转发和控制分离、逻辑上的集中控制等特点，对现有网络体系架构下的系统和设备运维都产生了影响，重点需要考虑在 SDN 架构下，原有 OSS/BSS 及网管系统如何与 SDN 网络中协同层互通配合，控制器与原有网管系统之间的关系，以及控制器与原有非 SDN 设备对接等问题。解决上述问题将会是一个长期复杂的过程，需要在 SDN 实际应用部署中不断探索和完善。

5.2 推动 SDN 发展和成熟的对策思考

围绕当前 SDN 技术和产业发展面临的主要问题，依托 SDN 产业联盟，秉承联盟“开放、创新、协同、落地”的宗旨，重点在关键技术、标准化、互联互通以及测试等方面，发挥联盟的平台作用，促进 SDN 技术应用与业务创新，推进 SDN 标准化进程，实现开放的 SDN 解决方案，并通过互通性测试推动商用场景下多厂商解决方案的互通。在产业推进方面，可以考虑从以下几个方面来着手。

第一，加快标准化工作，为 SDN 应用部署提供技术依据。针对当前 SDN 北向接口缺少统一标准，南向接口控制协议多以及部分协议和接口尚未定义的特点，建议加强统筹协调，发挥 SDN 产业联盟的平台作用，与相关标准组织合作推进 SDN 标准化工作，为 SDN 产业健康发展和规模应用部署提供必要的技术支撑。同时，应加快 SDN 安全相关技术研究，探索基于 SDN 架构的安全解决方案，制定 SDN 安全相关标准。

第二，强化应用与业务创新，积极打造自主开放的产业生态。以开放为核心，积极引导和鼓励联盟成员加强技术和产业合作，紧密围绕国内网络发展的实

⁶ 注：在 NFV 场景下，虽然 NFV 的架构初步定义了 MANO 与 NMS/EMS 的接口，但 OSS/BSS 如何支持 NFV 以及如何把 NFV 集成到现有网络，仍是部署 NFV 的最大障碍。

际需求，整合资源，形成合力，共同推动 SDN 技术研发与产业化进程，推动 SDN 产业生态的繁荣，打造自主开放的产业生态。

第三，建设互通测试平台，推动解决方案的成熟落地。依托 SDN 产业联盟，聚焦 SDN 商用场景，制定 SDN 解决方案的基准测试规范，加快建设 SDN 互通测试平台，推动商用场景下多厂商解决方案的互联互通，为 SDN 大规模的商用部署奠定基础。

第四，构建 SDN 开源生态圈，提供 SDN 技术人员的培育环境。鼓励和支持 SDN 开源生态建设，吸引全球智慧参与，形成以技术为纽带的创新模式，培育开放共享的开源社区，为 SDN 技术人才的培养提供良好环境。

A 附录. SDN 产业联盟相关介绍

A.1 联盟的定位和目标

SDN 产业联盟旨在汇聚产业链力量，共建 SDN 产业生态，推动 SDN 商用化进程，解决现有网络如何向 SDN 演进、网络如何支撑新型业务创新和灵活部署、超大规模网络如何运维等关键问题。

SDN 联盟宗旨：“开放、创新、协同、落地”。

SDN 产业联盟的愿景是：

- (1) 立足中国，面向全球，聚焦产业资源，共同推动 SDN 技术和产业发展；
- (2) 推动联盟成员广泛协作交流，力促 SDN 技术、标准、产品/解决方案及应用的成熟；
- (3) 围绕 SDN 技术开展不同应用场景的解决方案探索，组织和推动联盟成员共同协作，促进 SDN 产业生态健康发展，推动 SDN 产业生态繁荣。

A.2 联盟的组织架构

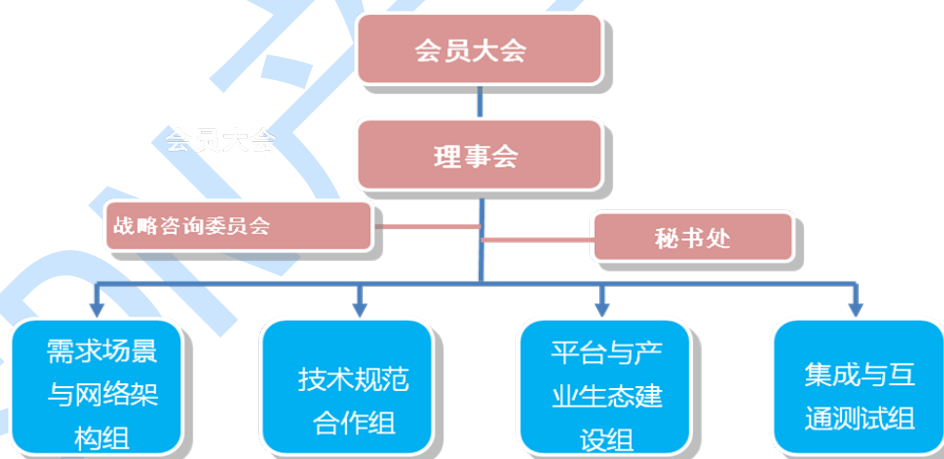


图 A.1 SDN 产业联盟组织架构

目前，SDN 产业联盟的组织架构如图 A.1 所示，其中：

(1) 会员大会是联盟的最高权力机构，主要审议联盟章程、联盟发展规划和工作方针、理事会的工作报告等。

(2) 理事会是会员大会的执行机构，领导本联盟开展日常工作，负责 SDN

联盟整体战略制定，及联盟运作重大事项决策。审议理事会年度工作报告、议案、年度财务预算和秘书处提交报告。

(3) 战略咨询委员会作为顾问组织，由业界专家组成，向理事会提供发展战略咨询建议。

(4) 秘书处主要是支撑联盟日常事务、运营及重大活动，负责联盟相关论坛会议活动的组织与品牌宣传造势。

(5) 需求场景与网络架构组：负责汇总行业信息，开展所有 SDN 场景下的需求沟通事宜，把握方向梳理出行业关键需求；输出 SDN 技术架构，面向行业发布 SDN 解决方案。

(6) 技术规范合作组：研究制定 SDN 技术规范，并负责同行业 SDN 标准组织之间的联系沟通工作，促进产业链各领域资源在技术标准制定中统一意见。

(7) 平台与产业生态建设组：负责协调联盟应用开发资源积极开展业务应用创新开发工作，打造开发平台，挖掘新机会和应用点，促成行业不断创新和发展。

(8) 集成与互通测试组：负责联盟各厂商间产品互通测试规范和标准制定，组织协调产业链资源积极参与对接测试活动。

A.3 联盟的工作路线图

2015 年，联盟将以“需求驱动、重点突破”为原则，紧跟 SDN 发展趋势，前瞻性地梳理重点需求场景，布局关键技术的协同研发；发挥各类核心成员优势、集聚资源，以需求架构为核心，建立联合创新项目，为未来催生国内领先的核心技术、争创国际领先的应用示范创造条件。



图 A.2 SDN 产业联盟整体工作计划

重点开展以下五方面的内容：

（1）依托产业联盟平台，发挥各成员优势、聚集资源，以需求架构为核心，规范接口和标准化协议，建立联合创新项目，搭建集成测试平台，为未来催生国内领先的核心技术、争创国际领先的应用示范创造条件。

（2）布局 SDN/NFV 关键技术和创新架构研究，在联盟四个工作组同步启动相关研究项目。

（3）通过联盟平台，促进国内企业的协作，构建 SDN 开源社区，加快 SDN 产业生态建设。

（4）推进与国际标准组织和开源社区的合作，扩大联盟的影响力，提升中国企业在国际标准中的话语权。

（5）加强联盟成果的宣传，推广优秀解决方案和应用案例。