

高等学校计算机类专业学术前沿系列

软件定义网络： 结构、原理与方法

胡 亮
付 韬 编著
车喜龙

Software Defined
Network:
Architecture, Theory
and Method

高等教育出版社

高等学校
计算机类专业学术前沿系列

Software Defined Network:
Architecture, Theory and
Method

软件定义网络: 结构、原理与方法

胡 亮 付 韬 车喜龙 编著



高等教育出版社·北京

内容提要

软件定义网络 (software defined network, SDN) 将传统网络中的控制功能集中到全局决策的控制器, 广泛应用于数据中心网络、广域网络和无线网络, 极大提高了网络性能和管理效率。本书在综合分析并总结当前国内外较为权威的 SDN 专业论著、学术论文、技术指南等基础上, 全面剖析软件定义网络的系统结构、基础原理与关键方法, 并融入作者在该领域的研究内容和心得体会, 汇总了数据中心网络、网络虚拟化等场景下的应用实践经验。

本书内容广泛, 在凝练技术思想过程中突出结构、原理与方法的阐述, 对相关专业高校本科生与研究生、计算机网络领域的软硬件研发人员、运营管理人员以及对 SDN 技术感兴趣的读者都具有较高的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

软件定义网络: 结构、原理与方法 / 胡亮, 付韬,
车喜龙编著. --北京: 高等教育出版社, 2018.12
ISBN 978-7-04-050684-6

I. ①软… II. ①胡… ②付… ③车… III. ①计算机
网络—研究 IV. ①TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 226086 号

策划编辑 刘茜
插图绘制 于博

责任编辑 刘茜
责任校对 刘丽娴

封面设计 王鹏
责任印制 田甜

版式设计 徐艳妮

出版发行 高等教育出版社

社址 北京市西城区德外大街 4 号

邮政编码 100120

印刷 北京宏伟双华印刷有限公司

开本 850mm × 1168mm 1/16

印张 14.75

字数 310 千字

购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>

<http://www.hepmall.com>

<http://www.hepmall.cn>

版 次 2018 年 12 月第 1 版

印 次 2018 年 12 月第 1 次印刷

定 价 34.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 50684-00

计算机网络是计算机科学的核心领域，构成了云计算、大数据等新的科技热点的物理基础设施。因特网的出现使得信息和数据真正变成了社会可以随时取用的资源，极大地推进了信息化时代的社会发展，网络的研究与发展永远处在进行时。

在传统网络体系架构获得巨大成功之后，可以看到网络服务如雨后春笋般出现，极大地丰富了人们的生活，然而，成功的商业化使得传统网络的创新相对滞后。学术界早就针对互联网络的改革进行了大量的研究。

然而受制于多种因素，早期的网络改进方案并没有对网络产业界产生实质的影响。进入 21 世纪以来，综合技术水平的提高使得芯片计算能力提高、出现 TCAM 存储、传输介质稳定性更好，种种条件的改善使得应用更加智能的网络设备设计方案成为可能。在这些客观条件下，软件定义网络的出现恰逢其时，突出的特性使其很快获得了产业界的采纳。软件定义网络的焦点在于构建开放的网络环境、集中的网络操作系统和标准化的资源交换，这依托于数控分离、可编程性等特征，使得网络的管控模型发生了本质的重构，最终下一代网络将具备良好的开放性和透明性。如今，软件定义网络已经从一个学术研究领域，变成了下一代网络的必备技术。这意味着未来的云数据中心网络、高速骨干网络，甚至是物联网都可使用软件定义网络技术实现智能化的管理。

数据中心的软件定义网络已经创造了瞩目的成果，促进了网络资源的优化。高速骨干网和无线网络的软件定义化尚在进行中，也出现了众多极具创意的典型案例。最终，网络的改善将变成优化的应用服务和更好的用户体验。

目前，国内阐述软件定义网络及相关技术的文献十分丰富，但有些没有在全面性和纵深度上取得很好的平衡，过于关注某些解决方案或大量列举技术都会使读者难以把握软件定义网络这一新兴领域。《软件定义网络：结构、原理与方法》是胡亮教授及其所领导的团队在研究众多国内外软件定义网络学术文献、企业产品的基础上编写的专门著作，融入了该团队近些年在此领域的最新研究成果。该书对软件定义网络的概念、体系结构、软件定义网络操作系统、软件定义网络的性能模型、控制器优化、采用软件定义网络实现的网络虚拟化、无线

软件定义网络等方面进行了专门的论述，兼顾了纵深性和全面性，是目前国内针对软件定义网络的专门著作中颇具特色的一部。该书的工作坚持追踪国际最新动态，包含了大量原创性的成果，具有很强的参考价值，对中国相关领域的教学和研究具有一定的促进作用。

郑斯清

美国得克萨斯大学达拉斯分校
计算机科学系、计算机工程系、电信工程系教授
2018年6月8日 于美国

软件定义网络是近几年出现的新型网络，在学术界和产业界都产生了广泛的影响，软件定义网络方向的代表性文章 *OpenFlow: enabling innovation in campus networks* 最高被引量达 5 971 次（谷歌学术 2017 年 6 月），而 CISCO、华为、爱立信、IBM、HP 等厂商的广泛参与也让软件定义网络市场价值日益增大。随着软件定义网络技术在数据中心网络、广域网、骨干网、物联网、无线网等场景中的大量研究及应用，该技术已经成为未来网络的关键技术之一。其数控分离、提供可编程性、全局视野、面向数据流的管理、实现网络透明性等特征为网络管理带来了极大的方便，促进了计算机网络的开放与标准化进程，为网络管理技术带来了一次新的变革。

作为计算机网络领域的新热点，目前软件定义网络具有不断提升的新特性、广泛的应用领域、门类众多的企业级产品和开源产品，为了解软件定义网络的读者带来了一定的入门难度。自笔者关注该技术的学术、产业进展以来，注意到存在着各具特色的相关著作，有些侧重于探索软件定义网络的定义与特征，有些侧重于介绍前沿产品，有些侧重于给出该技术在具体场景中的应用等。软件定义网络至今仍在不断改进，本书在总结国内外工作的基础上对软件定义网络进行了解读。面向学习软件定义网络的相关知识的读者，本书涵盖了软件定义网络的全面内容，针对国内外的多个权威定义进行了讨论，读者可以通过这一讨论理解软件定义网络的演化过程，通过典型案例增进读者的理解，对相关定义和架构进行了总结和讨论，帮助读者更好地理解这一网络新兴领域。

作为计算机网络的一项新技术，软件定义网络的学习过程中需要具备一定的计算机网络基础，从而更好地理解数据平面设备的工作原理、控制平面的基本功能和应用平面的各项要素。在具备网络基础的条件下，读者能够从本书全面地学习软件定义网络的理念、典型系统、软件及丰富的应用场景。

本书的知识体系较为全面，在具体的章节中挑选典型案例以便读者理解，涉及的各种项目的详细信息可以从相应官网上获得，这些项目依然在不停地更新和发展。本书第 1 章详细分析了软件定义网络这一概念的形成过程，对比、讨论了多份国内外著作的相关论述，在讨论中阐明该领域的核心特征；第 2 章对软件定义网络的整体架构进行分层介绍，按层次列举了有重要影响力的代表性项目；第 3 章归纳了网络架构中控制器的典型架构，帮助读者更好地理解整个软件定义网络的控制中心；在了解控制器架构的基础上，本书第 4 章围绕网络性能这一关键问题阐述了网络性能模型与控制器性能模型；第 5 章以分布式控制器为基础，探讨了一些控制器优化研究问题；网络虚拟化是与软件定义网络深度耦合的下一代网络技术，软件定义网络的可编程性对实现网络虚拟化有着重要的作用，因此第 6 章系统地讨论了网络

虚拟化问题；近些年物联网及无线网络的发展也十分迅猛，大量无线通信环境中引入软件定义网络实现面向数据流的调度优化，第7章总结了无线软件定义网络的几类典型应用场景；最后，本书给出了软件定义网络实现网络管理功能的实例。

软件定义网络是一个朝气蓬勃的领域，相关各种标准化协议、科研进展和代表产品仍在不断推陈出新，整个领域尚处在完善的时期。本书将在后续的版本中不断剔除糟粕、吸取精华，不当之处欢迎读者提出宝贵意见。

本专著（《软件定义网络：结构、原理与方法》）相关研究获得多个科技项目资助，包含国家重点研发专项（2017YFA0604500），国家科技支撑项目（2014BAH02F00），国家自然科学基金项目（61701190），吉林省青年科学基金项目（20160520011JH & 20180520021JH），吉林省中青年科技创新领军人才及团队项目（20170519017JH），吉林省省校共建示范项目（SXGJSF2017-4），吉林省重点科技研发项目（20180201103GX）。

胡 亮

2018年6月1日

于长春 吉林大学

第 1 章 软件定义网络概论	1
1.1 SDN 背景	1
1.2 SDN 形成过程	6
1.3 SDN 概念	8
1.3.1 多平面分离	9
1.3.2 逻辑上集中控制	11
1.3.3 可编程性	12
1.4 SDN 术语	13
第 2 章 SDN 系统结构	16
2.1 南向接口	20
2.1.1 南向接口实例: OpenFlow	21
2.1.2 OpenFlow 表类模式	29
2.2 SDN 网络转发设备	33
2.2.1 Open vSwitch	34
2.2.2 Mininet	37
2.2.3 NS3	37
2.2.4 EstiNet	38
2.2.5 OFTest	38
2.3 网络操作系统	39
2.3.1 OpenFlow 单节点控制器	42
2.3.2 OpenFlow 分布式控制器	47
2.4 北向接口	54
2.5 网络编程语言	56
2.6 应用平面	59
2.7 SDN 网络视图	61
2.7.1 网络拓扑信息获取	61
2.7.2 SDN 网络监控	63
2.7.3 网络信息存储	66
2.8 东西向接口	66

第3章 SDN 控制系统	68
3.1 控制系统模型	68
3.1.1 单节点控制模型	68
3.1.2 多节点控制模型	69
3.1.3 控制器模型对比	71
3.2 控制策略	71
3.2.1 策略表达	76
3.2.2 策略转化	87
3.2.3 策略下发	93
第4章 SDN 性能建模	96
4.1 SDN 网络性能指标	96
4.2 SDN 网络服务质量分析	98
4.3 SDN 数据中心描述	99
4.4 基于 DAG 的 SDN 网络拓扑结构表达	102
4.4.1 SDN 网络拓扑的 DAG 表述	102
4.4.2 DAG 描述 SDN 网络不同时间段的拓扑状态	103
4.4.3 SDN 网络拓扑切换及流表下发	104
4.5 SDN 控制器性能分析	109
4.5.1 功能模型	110
4.5.2 消息响应模型	112
4.5.3 扩展性评估	114
4.6 分布式控制器资源开销	116
第5章 分布式控制器优化	122
5.1 分布式控制器实例部署	122
5.1.1 研究背景及现状	122
5.1.2 盒覆盖算法	123
5.2 应用状态切片及其迁移	124
5.2.1 ASPM 系统结构	125
5.2.2 ASPM 工作流程	126
5.2.3 ASPM 模块详解	126
5.2.4 ASPM 算法设计	132
5.3 应用管理	134
5.3.1 应用管理概述	134

5.3.2 应用分类	135
5.3.3 应用管理建模	136
5.3.4 应用管理架构设计	137
5.4 网络视图管理	138
5.4.1 网络视图管理概念	138
5.4.2 网络视图建模	139
5.4.3 网络视图管理架构设计	142
5.4.4 网络视图缓存算法设计	143
5.5 QoS 模块设计	152
5.5.1 需求分析	152
5.5.2 QoS 模块框架结构	153
5.5.3 QoS 模块处理流程	154
5.5.4 路径规划模块设计	155
第 6 章 SDN 虚拟网络映射	159
6.1 网络虚拟化与虚拟网络映射	159
6.1.1 网络虚拟化问题	160
6.1.2 网络虚拟化研究进展	162
6.1.3 虚拟网络映射问题	165
6.2 虚拟网络映射模型及算法	166
6.2.1 映射模型	166
6.2.2 静态映射与动态映射	168
6.3 映射可靠性	169
6.4 跨域映射	171
6.5 基于 SDN 的虚拟映射	173
6.5.1 SDN 虚拟化平台	173
6.5.2 网络资源虚拟化	174
6.5.3 SDN 虚拟化软件	175
6.5.4 基于 SDN 的智能虚拟映射系统原型	178
第 7 章 软件定义无线网络	181
7.1 wSDN 网络	181
7.2 无线 SDN 前沿	182
7.3 wSDN 典型应用	184
7.3.1 移动网络	184

7.3.2 Mesh 网络	184
7.3.3 WiFi 网络	186
7.3.4 物联网	186
7.3.5 传感器网络	187
7.4 wSDN 性能评估	188
7.4.1 系统模型描述	188
7.4.2 基于随机网络演算的上界延迟模型	189
7.5 wSDN 机遇与挑战	191
第 8 章 SDN 数据中心应用案例	193
8.1 在 SDN 环境下的入侵检测系统案例	193
8.2 SDN 虚拟机跨域迁移案例	198
8.2.1 架构设计	198
8.2.2 实验系统	204
参考文献	221
后记	225

第1章 软件定义网络概论

软件定义网络（software defined network, SDN）自提出以来获得了学术界和工业界的广泛支持。随着重要的南向接口如 OpenFlow 的提出，诸多成熟的产品和技术不断涌现，软件定义网络的概念不断进化，从早期实现控制平面和数据平面分离的简单架构，到今日囊括了各种网络操作系统及服务的三层架构，相信随着研究的深入，SDN 会不断增加新的特性并对产业产生更大的影响。

SDN 是一个难以用一个概念、一个原型甚至是一本书来定义的问题。SDN 能与传统网络兼容，这说明在 SDN 中依然保留传统网络的一些功能与特征；然而 SDN 又能够以其数控分离和可编程的特性实现传统网络难以实现的工作。SDN 中的“软件定义”到底体现在哪些方面？是可编程性的直观体现？还是说明应用层软件在整个网络中的作用？亦或是集中控制平面的另一种描述方式？

在介绍 SDN 的概念后，本书将介绍 SDN 当下的体系结构，其中各部分都会以独立小节来讲解。当下的 SDN 领域呈现百家争鸣的盛况：从数据平面、控制平面到应用平面都存在各种不同的技术解决方案及其原型系统。这些工作难以穷举，为此本书选出其中最具代表性的一部分进行了细致的介绍，重点在于通过某一层的具体案例让读者理解 SDN 特性在这一层的体现，而非完整罗列该技术所有细节，继而探究了 SDN 控制系统的模型，并对 SDN 性能进行了建模。

最后，本书将结合几个重要的应用场景介绍 SDN 的产业价值，包括网络虚拟化、数据中心网络管理、入侵检测系统等。

1.1 SDN 背景

计算机网络是人类最伟大的发明之一，进入 21 世纪以来，互联网的广泛存在已经使得世界进入到一个数字化的时代，近年来火热的云计算、物联网、大数据等前沿领域也离不开网络的支撑，这无疑证明网络在人类社会中扮演越来越重要的角色。虽然网络在人们的生活中已经得到广泛使用，但是国内外网络研究人员一直在寻求更好的网络体系架构。

早期的网络中，控制平面和数据平面捆绑在一起，受限于硬件条件，网络遵循着边缘智能、中心简单的设计理念，最终使得传统网络既难以根据预先定义好的策略配置网络，也难以实时地响应故障、负载和变化来对网络配置进行动态地调整。出于利润最大化的需要，网络设备开发商将网络设备内部的实现对使用者保密，少数厂商提供了专门的硬件、操作系统、

控制程序和网络应用的专有解决方案，使得网络设备的软硬件绑定使用并将网络设备变成了一个“黑盒”。不同厂商的设备之间使用的算法和协议难以良好地整合，通常大规模组网时只能选择在同一厂商的产品体系内部做业务对接或管理。

路由器和交换机内运行的分布式控制和网络传输协议是整个网络中最关键的技术，它们的工作直接决定数据包转发的正确性和效率。这些协议和技术标准在早期网络的建立和推广中发挥过积极的作用，但在性能与硬件成本之间的取舍决定了传统网络在当今是差强人意的信息传输方案。传统网络转发设备只支持生产厂商预装的功能，网络管理员为了必需的高级网络策略，往往要受限于设备供应商设计的命令，分别配置每个独立的网络设备，这种方式越来越难以适应随机出现的网络故障和网络变化。同时，难以穷举的应用在客户端/服务器模式、浏览器/服务器模式、云计算、大数据环境下不断出现于网络终端，极大地丰富了人们可以使用的服务，但这一现象没有出现在构成网络的节点上，路由器和交换机的应用创新远远落后于应用的爆炸增长。

计算机网络按照功能可以从逻辑上分成数据平面、控制平面和管理平面(如图 1-1 所示)。控制平面以路由协议和路由表的形式决定如何处理网络流量，数据平面根据路由转发表转发数据流，控制平面可选策略的受限降低了网络的灵活性。传统网络不经验证就使用新协议和算法会导致难以预估的经济损失，然而使用模拟网络环境去验证网络新协议并不完善，因此整个网络的创新与改革严重滞后于网络服务的发展。最终，传统网络的建设资本和运维开支居高不下，严重制约网络的进一步发展。

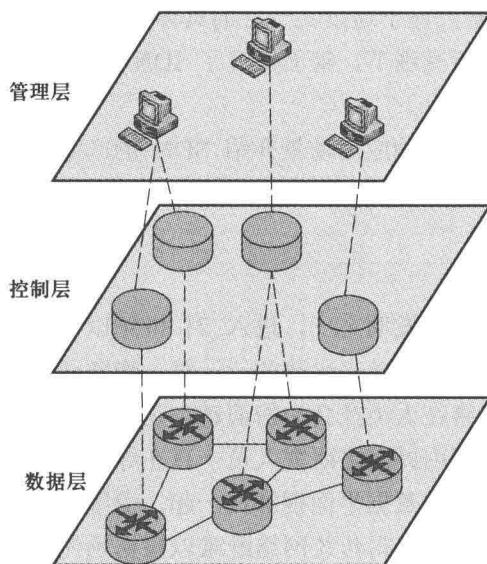


图 1-1 计算机网络逻辑分层

管理平面一般由网络设备生产商配套提供,包括软件服务,例如以简单网络管理协议(simple network management protocol, SNMP)为基础的工具等,它们用于实现远程监视、配置和控制的功能。网络策略由应用平面来定义,控制平面执行这些策略并且数据平面通过相对应地转发数据实现它,在传统的 IP 网络中每个设备只有有限的网络信息,因此整个网络中控制结构是高度分散的,策略的执行也难以保证最优。早期互联网遵循这种设计保证了网络的弹性,用较少的硬件资源达到了设计目标。事实上,这种方法当年被证明是相当有效的,在网络链路速率快速增加和端口密度急速增大的情况下有很好的表现。然而,与优点相伴的结果就是把网络变成了一个非常复杂和相对静态的结构。这也是传统网络采用刚性管理和控制的根本原因,使得网络管理员的工作变得更加复杂。因特网未来需要由多个独立的、软件控制的子区域构成^[1],需要快速响应网络业务的变化,互联网的发展、多种创新项目的合作和对大规模网络实验的需求导致新型网络必须打破传统网络的结构、原理与方法。

在当今的网络中,网络错误配置和由此衍生的执行错误是相当常见的,可以说人为失误是网络搭建环节中最大的不稳定来源,尤其是一个人处理成百上千设备的时候。例如,在边界网关协议(border gateway protocol, BGP)路由器端可以观察到一千多种配置错误。事实上,虽然少见但一个错误配置的路由器能够破坏整个网络的正常运行长达数小时。网络运营商必须雇佣人数众多的团队,不断购买新的运维软件,安装大量专门组件和中间件,不停处理软硬件故障,建设和维护一个网络基础设施的运营成本是巨大的,这成了改进网络的最大动力来源。综上,网络的实际运营者最看重的网络新特性如下。

① 自动重新配置机制。

② 动态环境中网络策略的灵活部署。

软件定义网络(software defined networking, SDN)^[2]是一种新兴的网络管理模式,有望改变传统网络的缺点、打破当前的网络基础设施的限制。公认的特性是通过开放的协议分离控制逻辑和转发设备,集中网络控制并实现网络编程性。这种分离被称作数控分离,它将网络策略定义与其在底层硬件上的实现分离开来;在数据转发方面,实现了数据流管理的灵活性,剥离了复杂的网络控制计算,仅保留易于处理的转发部分,SDN 更易创建和引入新的抽象,简化网络管理。控制逻辑由一个逻辑上集中的控制器(或网络操作系统)实施,简化了策略执行和网络配置。这种架构如图 1-2 所示。需要强调的是,一个逻辑上集中的编程模型并不意味着在物理上的控制器是一个集中式系统。事实上 SDN 的顺利运行需要保证控制器的高性能、可扩展性和可靠性,这也是 SDN 控制平面亟待解决的问题。处理海量底层设备请求是目前 SDN 控制器的性能瓶颈,目前比较主流的思路是通过分布式控制器或配有 GPU 的单节点控制器来实现请求处理速度的提升^[3]。企业级的 SDN 网络设计多采用物理分布式控制平面。

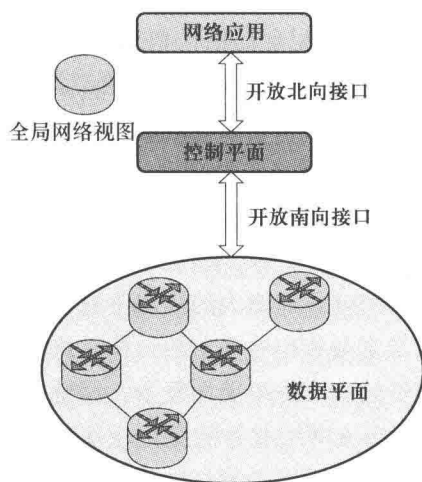


图 1-2 SDN 简化架构

控制器从定义良好的应用程序编程接口（application programming interface, API）直接控制数据平面单元的状态，如图 1-2 所示，这样的 API 称之为南向接口协议，这类 SDN 中的 API 最典型的例子是 OpenFlow^[4]。虽然目前 SDN 在架构上只是一个不大的改动，没有增加新的平面或改变整个网络的结构，但却带来了许多至关重要的好处，本书后续将从各个层次、具体应用场景来说明 SDN 对于计算机网络的巨大推进作用。

采用 SDN 的重要结果是实现了网络策略的定义、策略在转发设备硬件上的实现和数据的转发行为之间的分离（这表现为当前的三层架构，具体见第 2 章）。SDN 最开始仅作为学术实验进行研究，在过去的几年里这些技术显著牵引行业的发展。商用交换机的大多数供应商已经在他们的设备中增加 OpenFlow 的 API。国内外的大公司起初对部署 SDN 技术持保留态度，毕竟改变现有架构会带来很大的风险。2012 年，谷歌在 SDN 商用化中起到关键作用，迈出了大规模使用 OpenFlow 的第一步，在其示范下大批公司开始使用 SDN 技术优化数据中心网络，浪潮、腾讯、百度等公司都积极将 SDN 技术应用于数据中心的智能化管理。2015 年，成熟的软件定义广域网获得业界的认可，使得 SDN 的影响力更加深远。学术界一直热衷于将 SDN 应用于无线网络甚至是物联网，相信不久的将来 SDN 组件将成为无线传感器的必备模块。截至 2017 年，SDN 的市场已经由初期的创业型公司为主演变为众多传统大型厂商共同参与的局，SDN 的商业前景和重要地位已经得到了巩固。在国外，Facebook、雅虎、微软、Verizon、德国电信、开放网络基金会（ONF）等企业和标准化组织共同参与推广和采用 SDN；在国内，华为、中兴、盛科等厂商积极在 SDN 产业中布局。据统计，从 2006 年至 2015 年，我国企业在 SDN 领域累计申请专利 1252 项，获得的专利数仅次于美国，大于欧洲的 200 项。专利涉及回传网络、接入网、城域网、家庭网络、核心网、数据中心等典型网络，

影响力日渐扩大。在前沿领域，欧洲通信卫星公司与欧空局、西班牙空客防务与空间公司设计了世界第一颗软件定义通信卫星，通过软件定义技术实现了通信功能的灵活控制，相信在未来卫星网络中 SDN 也将发挥更大的作用。

谷歌公司已部署了一个互连世界各地数据中心的、使用 SDN 技术管理的网络。该网络已经部署了三年，SDN 帮助公司提高运营效率和显著降低成本^[5]。VMware 的网络虚拟化平台 NSX 是另一个例子，它是一个商业解决方案，完全是根据 SDN 原则提供了一个功能齐全的网络软件、配置独立的基础网络设备。SDN 实现逻辑上的集中控制有如下优点。

① 针对低级别的设备设计特有的配置，通过高级语言和软件组件来修改网络策略更简单。

② 节省了人力成本，更少的运维人员，更高的管理效率。

③ 控制程序能自动针对网络状态随机性的改变作出反应，从而保持高级别策略不变。

④ 随着控制器获得网络状态的全局知识，控制器的控制逻辑的集中简化了更先进的网络功能、服务和应用的开发。

⑤ 通过集中的应用和策略更新避免人为失误，提高网络运维效率。

⑥ 开放了网络市场的业务组合，使得创业公司具有了与传统网络设备供应商竞争的能力，促进了创新型企业的大量出现。

SDN 的出现也有利于在网络中分层构建策略规范，如图 1-3 所示，策略规范被网络应用程序用来表达所需的网络行为，通过虚拟化解决方案以及网络的编程语言可以让控制器变成整个网络的操作系统，向网络运维人员屏蔽底层资源使用细节。从而类似于操作系统在计算机中的作用，将网络功能的综合策略以一个简化的、抽象的描述来编辑，最终通过编译器转化成可直接在 SDN 控制器中显示的全局网络视图中各设备的物理配置。图 1-4 对比了传统网络与 SDN 架构的区别，传统网络中的设备相互独立，看不到提供全局视图的接口或统一管理的有效方法。与之相反，SDN 控制器成为应用与底层设备之间的桥梁，可以方便地实现底层信息的采集和上层策略的下发。

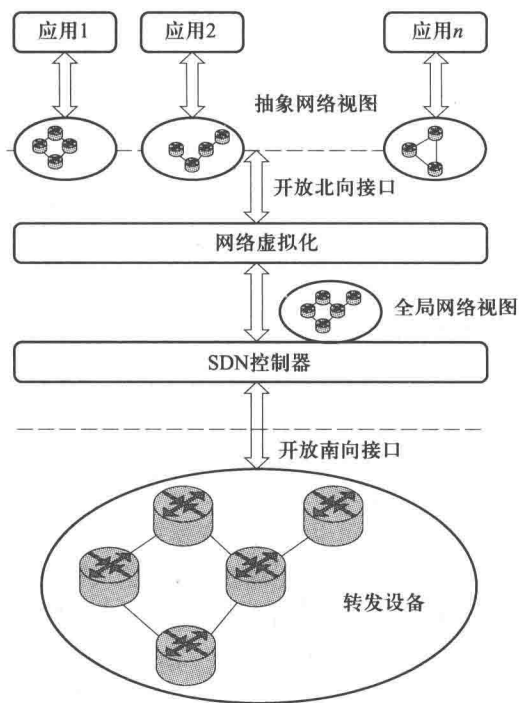


图 1-3 SDN 各层通过开放协议交互

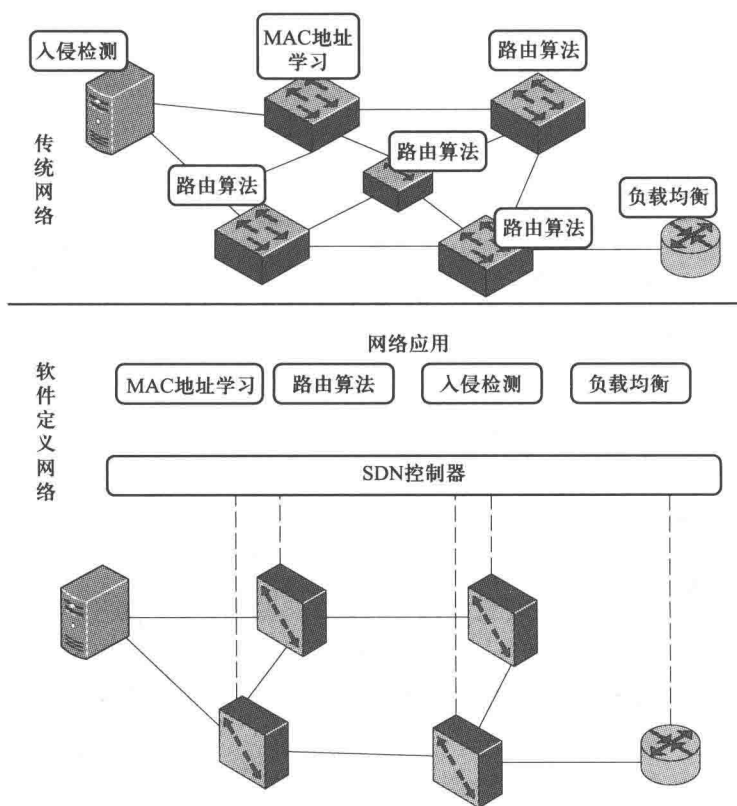


图 1-4 SDN 与传统网络对比

迄今，学术界和工业界在控制平面与数据平面上已经取得大量成果：有些涉及 SDN 具体架构^[2]，而有些面向 OpenFlow 的高层次的网络服务。总的来说，SDN 具有几个优点。

① 网络配置变得更加容易，通过控制平台和网络的编程语言提供的抽象可以被所有应用程序共享，以此降低了人工成本，赢得了时间效益。

② 所有的应用程序都可以利用全局网络视图，在实现一致和有效的决策同时重用控制平面的软件模块。

③ 不同应用的集成变得更直接。例如负载平衡和路由应用可以按顺序进行组合，其中负载平衡策略相对于路由策略具有优先权。

④ 适应下一代网络环境。目前 SDN 技术已经成为网络中的关键技术之一，在云计算数据中心网络、大数据网络、物联网、骨干网络、天地一体化信息网络中都有大量的应用。

1.2 SDN 形成过程

尽管 SDN 本身是一个相当新的概念，但与 SDN 的思想类似的工作在整个网络研究的过