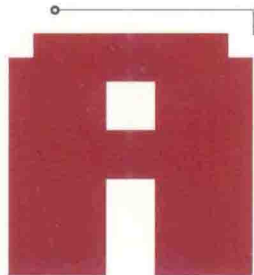


“十二五”

国家重点图书出版规划项目



学术中国 · 院士系列

ACADEMIC
CHINA

软件定义网络 核心原理与应用实践

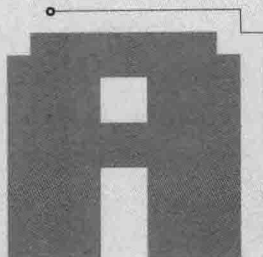
■ 黄韬 刘江 魏亮 张娇 刘韵洁 著

SDN Core Principles and
Application Practice



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

“十二五”
国家重点图书出版规划项目



学术中国·院士系列

CADEMIC
CHINA

软件定义网络 核心原理与应用实践

■ 黄韬 刘江 魏亮 张娇 刘韵洁 著

SDN Core Principles and
Application Practice

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

软件定义网络核心原理与应用实践 / 黄韬等著. —
北京: 人民邮电出版社, 2014. 9
(学术中国·院士系列)
ISBN 978-7-115-36369-5

I. ①软… II. ①黄… III. ①计算机网络—研究
IV. ①TP393

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第151846号

内 容 提 要

本书分为核心原理和应用实践两大部分, 对软件定义网络(SDN)技术进行了全面剖析和深入解读。第一部分首先阐述了SDN的设计思想与体系架构, 详细分析了软件定义网络的控制转发分离和可编程性两个突出属性, 其次介绍了以OpenFlow为代表的SDN南向接口协议, 以及北向和东向接口协议, 接下来根据SDN的层次化架构, 依次介绍了SDN数据平面、控制平面以及SDN应用案例, 最后梳理总结了SDN标准化进展以及学术发展情况。第二部分着重讲述SDN应用实践, 从系统架构、代码解析等方面详细介绍了虚拟交换机、开源控制器、仿真测试实验工具的基本知识, 并结合模拟网络环境搭建、虚拟网络设备部署、实际业务开发等具体应用实践场景, 深入讲解了利用SDN技术进行创新研发的过程。

本书涉及的内容广泛、技术思想凝练, 突出核心原理和基本概念的阐述, 同时力图深入浅出地讲解SDN的业务应用开发过程。本书对从事SDN技术研发的专业人士、网络运营管理人员、相关专业高校学生以及对SDN技术感兴趣的读者, 都具有一定的参考价值。

- 
- ◆ 著 黄 韬 刘 江 魏 亮 张 娇 刘 韵 洁
 - 责任编辑 代晓丽
 - 责任印制 杨林杰
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
 - 邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 北京铭成印刷印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 700×1000 1/16
 - 印张: 25.5
 - 字数: 484千字

定价: 98.00 元

读者服务热线: (010) 81055488 印装质量热线: (010) 81055316
反盗版热线: (010) 81055315

面对互联网规模与流量的爆发式增长,当前以 IP 为核心的网络体系架构逐渐暴露出了各式各样的问题,如可扩展性、可管控性、安全性、移动性、服务质量以及绿色节能等方面,尤其是以协议为核心的网络技术演进思路以及完全分布式的部署实施策略,使得网络技术的发展速度非常缓慢,甚至在一定程度上陷入了僵化的困局。在这样的背景下,亟需一种新型网络架构来改善这种局面、加快网络创新的步伐,因此,未来网络成为了全球范围内广受关注的研究热点。软件定义网络(Software-Defined Networking, SDN)则是近年来未来网络领域诸多方向中坚实且明确的一步,它最初被提出主要是为了找到一种更加灵活高效的部署模式,以适应企业级网络越来越灵活多变的需求。然而,随着 SDN 概念的发展与演进,它在网络技术革新领域的潜力受到了科研机构、产业巨头以及风险投资的高度关注,据不完全统计,仅 2012~2013 年,SDN 就引发了 20 余起商业并购,涉及资本近百亿美元。同时,关于 SDN 的标准化活动也在全球范围展开,这些现象充分说明了 SDN 所具备的潜在价值。

作为一项全新的技术,SDN 自提出以来,其外沿和内涵就随着人们对它的不断思考、讨论和实践而发展变化,基于这样一个事实,这本书的写作也更多是基于对已有实际工作的理解和记录整理。本书作者所在的科研团队自 SDN 提出以来就一直跟踪其发展演进,并展开了相应的科学研究,在这个过程中,整个团队不断加深对 SDN 的理解,积累了大量的实践经验,并最终整理形成了这本书。本书旨在为有志于从事 SDN 技术研究的读者提供一个全面系统的参考素材,使更多的人能够参与到 SDN 掀起的这场未来网络技术研究热潮中来。

当然,SDN 技术在实际应用中仍然面临诸多挑战,对于其未来的发展也还存在不同的观点,有的人认为 SDN 只能停留在少数大型企业的专有骨干或数据中心网络中,或是成为运营商网络的一个附属功能,当然也有人认为 SDN 技术必将掀起一场网络技术的革命。但不管 SDN 将来会怎样,当前的境况已经使它在网络技术的发展历史上留有地位,它代表了很多的正向思维,也是改变游戏规则的一个

创举。因此，在网络化和 IT 化的新时代，能够深入理解 SDN 技术，也许就能获得一把打开未来网络的钥匙，读这本书便是一个开始。

中国工程院院士 

软件定义网络 (Software Defined Networking, SDN) 正在成为整个行业瞩目的焦点,越来越多的业界专家相信其将给传统网络架构带来一场革命性的变革。但人们对 SDN 的理解并不相同,有人说它是“Stanford Defined Network”,又或是“Still Don't kNow”。那么,究竟什么是 SDN? 为什么需要 SDN? 它将对现有的网络架构产生何种影响? 这些问题的背后,是大家对 SDN 发展前景的不同态度和期望。

当前正在运行的互联网体系架构已经有 40 年的历史,随着网络规模的急剧膨胀和业务类型的不断丰富,互联网的结构和功能也日趋复杂,网络管控难度日渐增加,网络新功能难以快速部署。这促使人们重新思考网络体系架构的设计,而此时 SDN 的兴起为未来网络的发展提供了一个新的方向。

SDN 之所以是一种革新性的技术,是因为它打破了传统网络系统的设计理念,一方面实现了控制平面与数据平面相分离,另一方面开放了网络可编程能力,从而提高了网络的灵活性和可管控性。此外,SDN 网络运营建立在开放软件的基础上,不需要依靠特定的硬件设备,从而大大降低了业务部署和维护成本。

本书分为两个部分,第一部分包含第 1~7 章,主要介绍 SDN 的核心原理,重点围绕 SDN 的最初思想和主流南向接口协议 OpenFlow,并简要介绍 SDN 的其他拓展思路和相关成果;第二部分包含第 8~16 章,主要是分享 SDN 的实践经验,期望通过实践案例使读者对 SDN 有一个更加深入的认识。

第 1 章通过讲述互联网的发展历程,介绍了 SDN 技术的产生背景,使读者对 SDN 的兴起有一个大致的了解。

第 2 章介绍了 SDN 的基本原理,重点阐述了 ONF 组织定义的 SDN 体系架构,通过回顾发展历史,详细论述了软件定义网络的数控分离和可编程性这两大突出属性,并解读了这两个属性对网络技术发展的重要意义。

第 3 章介绍了 SDN 南向、北向以及东西向接口等相关内容,重点分析了发展较为成熟的 OpenFlow 协议及其伴侣协议 OF-CONFIG,同时对 XMPP、PCEP、OVSDB 等南向接口协议和 SDN 北向接口进行了简单介绍,并对东西向接口的进展和发展趋势进行了分析。

第4~6章按照SDN层次化架构,分别从数据平面(交换设备)、控制平面(控制器)和业务应用(SDN应用案例)3个层面剖析了支撑SDN架构的关键元素。通过分析SDN交换设备架构,重点介绍了SDN芯片和SDN软硬件交换机。在解读SDN控制器体系架构的同时,对开源和商用控制器进行了详细介绍。在此基础上,介绍了多个方面的SDN应用案例,阐释了在应用场景中引入SDN的策略和方法,帮助读者了解SDN多元的发展方向和应用前景。

第7章主要介绍了SDN在技术标准化和学术方面的进展,详细梳理了多个标准化组织对SDN相关技术标准的工作开展情况,并分类概述了SDN在相关领域的学术研究成果,使读者充分感受到SDN技术广阔的发展前景。

第8章和第9章分别讲解了开源SDN交换机Open vSwitch和SDN网络仿真工具Mininet的功能原理、代码解析以及安装配置等相关内容,并通过具体实践案例使读者可以参考这两章内容快速构建SDN网络仿真环境。

第10~13章介绍了目前广泛使用的SDN开源控制器POX、Ryu、Floodlight以及OpenDaylight。对各控制器进行了代码解读和分析,并通过模拟网络环境搭建、虚拟网络设备部署、实际业务研发等具体应用场景,介绍了SDN开源控制器的基本使用与开发方法。

第14章和第15章分别介绍了网络虚拟化工具FlowVisor和5个常用的扩展实验工具,重点讲解了FlowVisor虚网划分机理和各扩展实验工具的使用方法,有助于读者通过这些工具更好地研究SDN技术。

第16章以自主设计的微控制器Miracle为例,从代码层面讲解如何开发一个最简单的控制器,帮助读者熟悉SDN控制器架构,理解控制器运行原理以及OpenFlow协议的工作流程。

为便于读者检索,本书在附录中给出了SDN相关缩略语以及有关SDN资源网址列表。

本书参与撰写和审校的人员包括北京邮电大学的谢人超、姚海鹏、丁健、王健、胡文博、俞淑妍、张健男、张晨、汪硕、李呈、谢俊峰、肖海洋、杨潇、顾莹、于洁、杨帆、张丽、刘娟、张歌、胡晓露以及江苏省未来网络研究院的方辉、张欣慰、王松生、李蓬勃、薛进、孙庆冲、冀烨、周洁、陈俊霞、崔丽娴等,在此对大家表示衷心感谢。

感谢相关企业给予的大力支持与帮助,特别感谢中国联通研究院张云勇副院长、房秉毅博士;H3C公司孙晖部长、翟传璞部长;盛科公司孙剑勇总经理、张卫峰总监在本书编写过程中提出的诸多宝贵建议。

同时还要感谢北京邮电大学SDN试验平台小组高志鹏、赵钦、胡铮、李慧、乔秀全、孙咏梅等几位老师,正是由于大家的共同努力,为本书第6章试验平台部分提供了切实有力的支撑。

最后，感谢人民邮电出版社的大力支持和高效工作，使本书能尽早与读者见面。

本书内容是作者所在团队科研过程中一些实际经验的总结，希望能够对读者有所帮助。但是由于作者水平所限，同时 SDN 技术仍处于快速发展之中，因此书中难免存在疏漏，真诚地企盼读者批评指正。

作者

2014 年 8 月

第一部分 SDN 核心原理

第 1 章 SDN 概述	3
第 2 章 SDN 基本原理	9
2.1 SDN 定义与架构	9
2.1.1 SDN 定义	9
2.1.2 SDN 架构	11
2.2 数据控制分离	15
2.2.1 基本概念	15
2.2.2 数据控制分离历史	18
2.2.3 SDN 数据控制分离	22
2.3 网络可编程	25
2.3.1 基本概念	25
2.3.2 网络可编程历史	26
2.3.3 SDN 可编程	29
2.4 本章小结	32
参考文献	32
第 3 章 SDN 接口协议	34
3.1 OpenFlow 协议	34
3.1.1 OpenFlow v1.0 协议	35
3.1.2 OpenFlow 协议的演进	45

3.1.3	OpenFlow 协议面临的问题	54
3.2	OF-CONFIG 协议	55
3.2.1	协议框架	55
3.2.2	设计需求	56
3.2.3	数据模型	58
3.2.4	协议演进	60
3.3	其他 SDN 南向接口协议	61
3.3.1	XMPP	61
3.3.2	PCEP	62
3.3.3	I2RS	64
3.3.4	OpFlex	65
3.3.5	OVSDB Mgmt	66
3.4	SDN 北向接口	67
3.4.1	ONF 北向接口	68
3.4.2	SDN 其他北向接口	70
3.4.3	SDN 北向接口的前景	71
3.5	SDN 东西向接口协议	72
3.6	本章小结	76
	参考文献	76
第 4 章	SDN 数据平面	78
4.1	数据平面架构	78
4.2	SDN 芯片	81
4.3	SDN 硬件交换机	85
4.3.1	基于 ASIC 芯片的 SDN 品牌交换机	86
4.3.2	基于 ASIC 芯片的 SDN 白盒交换机	92
4.3.3	基于 NP 的 SDN 交换机	96
4.3.4	基于 NetFPGA 的 SDN 交换机	97
4.4	SDN 软件交换机	99
4.4.1	Open vSwitch	99
4.4.2	Pantou	100
4.4.3	Indigo	101
4.4.4	LINC	101
4.4.5	OpenFlowClick	102

4.4.6 OF13SoftSwitch	103
4.5 本章小结	104
参考文献	104
第5章 SDN 控制平面	107
5.1 SDN 控制器	107
5.1.1 SDN 控制器体系架构	107
5.1.2 SDN 控制器评估要素	110
5.2 开源控制器	112
5.2.1 NOX/POX	112
5.2.2 Ryu	114
5.2.3 Floodlight	116
5.2.4 OpenDaylight	118
5.2.5 OpenContrail	120
5.2.6 其他开源控制器	124
5.3 商用控制器	126
5.3.1 Big Network Controller	126
5.3.2 XNC	128
5.3.3 Contrail	129
5.3.4 SOX	131
5.4 本章小结	133
参考文献	133
第6章 SDN 应用案例	135
6.1 SDN 在网络试验平台中的应用	135
6.1.1 GENI OpenFlow	136
6.1.2 OFELIA	139
6.1.3 RISE	141
6.1.4 TWAREN	143
6.1.5 FINE	145
6.1.6 C-Lab	146
6.2 SDN 在网络虚拟化中的应用	148
6.2.1 基于 SDN 的网络虚拟化简介	149
6.2.2 网络虚拟化工具 FlowVisor	150
6.2.3 网络虚拟化平台 CNVP	154

6.3 SDN 在流量工程中的应用	158
6.3.1 概述	159
6.3.2 B4 的设计思路	160
6.3.3 B4 的核心网络功能	163
6.3.4 基于 SDN 的流量工程实现	167
6.3.5 B4 的部署与成效	170
6.4 本章小结	173
参考文献	174
第7章 SDN 标准化与学术进展	175
7.1 SDN 标准化进展	175
7.1.1 开放网络基金会	175
7.1.2 互联网工程任务组	178
7.1.3 国际电信联盟	179
7.1.4 欧洲电信标准化协会	181
7.1.5 中国通信标准化协会	184
7.2 SDN 学术进展	186
7.2.1 控制平面可扩展性	186
7.2.2 交换机/数据平面设计	188
7.2.3 SDN 编程语言	189
7.2.4 测试、调试及管理	189
7.2.5 数据中心应用	190
7.2.6 校园网应用	191
7.2.7 其他	191
7.3 本章小结	192
参考文献	192

第二部分 应用实践

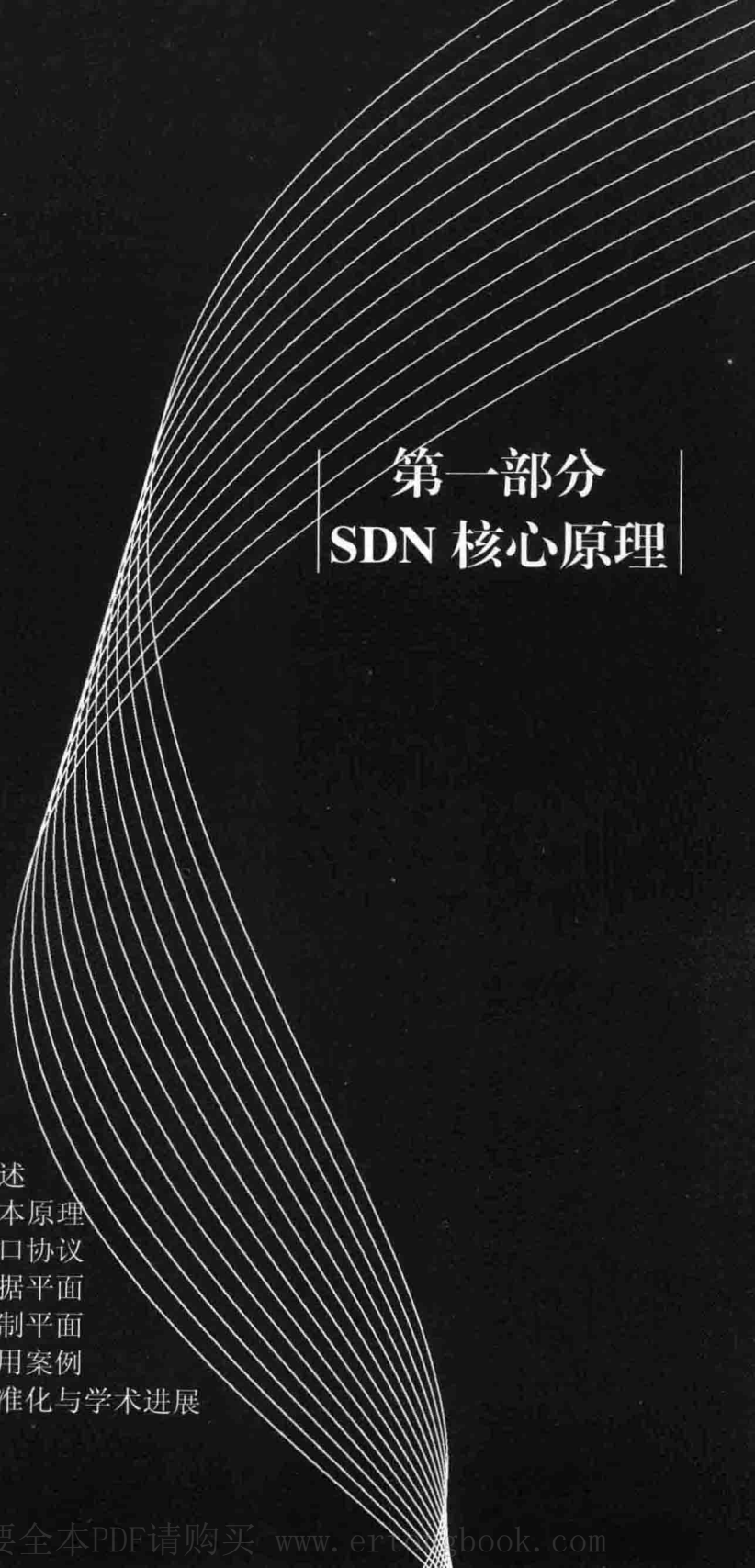
第8章 Open vSwitch 应用实践	197
8.1 OVS 系统架构	197
8.2 OVS 代码解读	200
8.2.1 代码结构	200
8.2.2 代码解析	201
8.3 OVS 安装使用	208

8.3.1 软件安装	208
8.3.2 使用说明	210
8.3.3 常用命令	211
8.4 OVS 应用实例	212
8.4.1 实例介绍	212
8.4.2 实例开发	213
8.4.3 实验结果	216
8.5 本章小结	217
参考文献	217
第9章 Mininet 应用实践	218
9.1 Mininet 系统架构	218
9.2 Mininet 代码解读	220
9.2.1 代码结构	220
9.2.2 代码解析	222
9.3 Mininet 安装使用	224
9.3.1 软件安装	224
9.3.2 使用说明	226
9.3.3 添加 OpenFlow 1.3 支持	228
9.4 Mininet 应用实例	230
9.4.1 实例介绍	231
9.4.2 实例开发	232
9.4.3 实验结果	234
9.5 本章小结	235
参考文献	236
第10章 POX 应用实践	237
10.1 POX 代码解读	237
10.1.1 代码结构	237
10.1.2 代码解析	238
10.2 POX 安装配置	249
10.2.1 软件安装	249
10.2.2 系统配置	250
10.3 POX 应用实例	252
10.3.1 实例介绍	252

10.3.2 实例开发	253
10.3.3 实验结果	261
10.4 本章小结	261
参考文献	262
第 11 章 Ryu 应用实践	263
11.1 Ryu 代码解读	263
11.1.1 代码结构	263
11.1.2 代码解析	264
11.2 Ryu 安装配置	269
11.2.1 软件安装	269
11.2.2 系统配置	270
11.3 Ryu 应用实例	271
11.3.1 实例介绍	271
11.3.2 实例开发	275
11.3.3 实验结果	281
11.4 本章小结	282
参考文献	283
第 12 章 Floodlight 应用实践	284
12.1 Floodlight 代码解读	284
12.1.1 代码结构	284
12.1.2 代码解析	285
12.2 Floodlight 安装配置	291
12.2.1 软件安装	291
12.2.2 系统配置	292
12.3 Floodlight 应用实例	292
12.3.1 实例介绍	292
12.3.2 实例开发	293
12.3.3 实验结果	296
12.4 本章小结	297
参考文献	297
第 13 章 OpenDaylight 应用实践	298
13.1 OpenDaylight 代码解读	298
13.1.1 代码结构	298

13.1.2 依赖技术	299
13.1.3 代码解析	300
13.2 OpenDaylight 安装配置	309
13.2.1 软件安装	309
13.2.2 系统配置	310
13.3 OpenDaylight 应用实例	311
13.3.1 实例介绍	311
13.3.2 实例开发	312
13.3.3 实验结果	315
13.4 本章小结	315
参考文献	316
第 14 章 FlowVisor 应用实践	317
14.1 FlowVisor 代码解读	317
14.1.1 代码结构	317
14.1.2 代码解析	318
14.2 FlowVisor 安装使用	328
14.2.1 软件安装	328
14.2.2 系统配置	328
14.2.3 常用命令	329
14.3 FlowVisor 应用实例	330
14.3.1 基于交换机的虚网划分	331
14.3.2 基于传输层的虚网划分	332
14.4 本章小结	335
参考文献	335
第 15 章 扩展实验工具	336
15.1 功能测试工具 OFTest	336
15.1.1 工具简介	336
15.1.2 安装配置	337
15.1.3 应用实例	338
15.2 性能测试工具 Cbench	340
15.2.1 工具简介	340
15.2.2 安装配置	341
15.2.3 应用实例	343

15.3 拓扑生成工具 VND	345
15.3.1 工具简介	345
15.3.2 应用实例	345
15.4 报文分析工具 Wireshark	347
15.4.1 工具简介	347
15.4.2 安装配置	347
15.4.3 应用实例	348
15.5 流量监控工具 sFlow	350
15.5.1 工具简介	350
15.5.2 安装配置	351
15.5.3 应用实例	352
15.6 本章小结	354
参考文献	354
第 16 章 微控制器 Miracle 开发实践	355
16.1 Miracle 简介	355
16.2 Miracle 实现详解	356
16.2.1 环境准备	356
16.2.2 网络通信	357
16.2.3 协议解析	361
16.2.4 核心应用	376
16.3 运行 Miracle	381
16.4 本章小结	382
参考文献	382
附录 A 缩略语	383
附录 B SDN 资源网站	390
名词索引	391



第一部分 SDN 核心原理

- 第 1 章 SDN 概述
- 第 2 章 SDN 基本原理
- 第 3 章 SDN 接口协议
- 第 4 章 SDN 数据平面
- 第 5 章 SDN 控制平面
- 第 6 章 SDN 应用案例
- 第 7 章 SDN 标准化与学术进展