

软件定义网络核心原理 与应用实践（第三版）下册

**SDN Core Principles and
Application Practice (3rd edition) Volume 2**

黄韬 刘江 魏亮 张娇 杨帆 刘韵洁 著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



国之重器出版工程
网络强国建设

学术中国·院士系列
未来网络创新技术研究系列

软件定义网络核心原理 与应用实践（第三版）下册

SDN Core Principles and
Application Practice (3rd edition) Volume 2

黄韬 刘江 魏亮 张娇 杨帆 刘韵洁 

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. --
3版. -- 北京 : 人民邮电出版社, 2018.8
(学术中国. 院士系列. 未来网络创新技术研究系列)
国之重器出版工程
ISBN 978-7-115-48767-4

I. ①软… II. ①黄… III. ①计算机网络—网络结构
—研究 IV. ①TP393.02

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第137152号

内 容 提 要

本套书包含核心原理和应用实践上下两册,对软件定义网络(SDN)技术进行全面剖析和深入解读。上册属于核心原理部分,首先阐述 SDN 的设计思想与体系架构,详细分析控制转发分离和开放可编程两个重要属性;其次介绍以 OpenFlow 为代表的 SDN 南向接口协议,以及北向和东西向接口协议;接下来根据 SDN 的层次化架构,自下而上依次介绍 SDN 数据平面、控制平面和应用案例;最后梳理总结 SDN 标准化和学术进展情况。下册属于应用实践部分,首先介绍虚拟交换机 Open vSwitch 和网络仿真工具 Mininet,其次介绍开源控制器 NOX/POX、Ryu、Floodlight、OpenDaylight 以及 ONOS,接下来介绍网络虚拟化工具 FlowVisor 和 OpenVirtex,最后介绍实验测试工具的基本知识。

本书涉及内容广泛,较为全面地阐述了 SDN 的核心原理和基本概念,对从事 SDN 技术研发的专业人士、网络运营管理人员、相关专业的高校学生以及对 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 杨帆 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>
固安县铭成印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 700×1000 1/16
印张: 40.5 2018 年 8 月第 3 版
字数: 749 千字 2018 年 8 月河北第 1 次印刷
-

定价: 288.00 元

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

《国之重器出版工程》

编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	李 东	高延敏	何 琼	刁石京
谢少锋	闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生
赵永红	韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波
卢 山	徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁
张 炜	聂 宏	付梦印	季仲华	



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- 于 全 中国工程院院士
- 王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 王建民 清华大学软件学院院长
- 王哲荣 中国工程院院士
- 王 越 中国科学院院士、中国工程院院士
- 尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 邓宗全 中国工程院院士
- 甘晓华 中国工程院院士
- 叶培建 中国科学院院士
- 朱英富 中国工程院院士
- 朵英贤 中国工程院院士
- 邬贺铨 中国工程院院士
- 刘大响 中国工程院院士
- 刘怡昕 中国工程院院士
- 刘韵洁 中国工程院院士
- 孙逢春 中国工程院院士
- 苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授



- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原
机械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国计算机学会原理事长
- 郑建华 中国科学院院士



屈贤明 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任

项昌乐 “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长

柳百成 中国工程院院士

闻雪友 中国工程院院士

徐德民 中国工程院院士

唐长红 中国工程院院士

黄卫东 “长江学者奖励计划”特聘教授

黄先祥 中国工程院院士

黄 维 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长

董景辰 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员

焦宗夏 “长江学者奖励计划”特聘教授



前言

软件定义网络（Software Defined Networking, SDN）正在成为行业注目的焦点，越来越多的业界专家相信它将推动传统网络的发展与变革。但是，究竟什么是SDN？为什么需要SDN？它将对现有网络架构产生何种影响？这些问题的背后，是大家对网络技术发展的思考与期许。

当前正在运行的互联网体系架构已经有超过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的提出与兴起为未来网络的发展提供了一个新的可行方向。

SDN之所以是一种革新性的技术，是因为它打破了传统网络架构的设计理念，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运营建立在开放软件的基础上，可以显著降低业务部署和维护成本。

本套书期望对当前SDN的概念定义、核心原理、关键技术和部署应用几方面进行较为全面的介绍，具体包含核心原理和应用实践上下两册。本册属于应用实践部分，重点介绍了SDN应用实践相关的软件，并分享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。本册重新整理了代码部分，修订了之前版本中出现的一些问题。具体章节内容介绍如下。

第1章和第2章分别讲解了开源SDN交换机Open vSwitch和SDN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仿真环境。

第3~9章介绍了目前广泛使用的SDN开源控制器NOX/POX、Ryu、Floodlight、OpenDaylight以及ONOS。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 10 章和第 11 章分别介绍了网络虚拟化工具 FlowVisor 和 OpenVirtX。从代码、模块、结构及其安装使用方法对 FlowVisor 和 OpenVirtX 进行解析，并列举了相关实际应用的例子加深读者对这两个网络虚拟化工具的理解。

第 12 章介绍了 5 个常用的扩展实验工具，分别是功能测试工具 OFTest、性能测试工具 Cbench、拓扑生成工具 VND、报文分析工具 Wireshark 以及流量监控工具 sFlow，读者通过掌握这些工具能更好地研究 SDN 技术。

为便于读者检索，本书在附录中给出了 SDN 相关缩略语和名词索引。

本书参与撰写和审校的人员包括：北京邮电大学的汪硕、张晨、李呈、丁健、王健、胡文博、俞淑妍、张健男、谢俊峰、肖海洋、杨潇、顾莹、于洁、张丽、刘娟、张歌、胡晓露、张然、辛远铭、吴理炫、耿直、李婕妤、吴畏虹、邹贵今、王彬、尹弼柏、周正强、陈进、李倩、田家翼、王领、张泽阳，以及江苏省未来网络研究院的檀朝红、张婉蒙、王统柱、徐锟、吴正东、程智炜、周陆宁、陈俊霞、张小雅等。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院长、房秉毅博士，盛科公司孙剑勇总经理、张卫峰总监，杨勇涛经理在本书编写过程中提出的诸多宝贵建议。

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。由于作者水平有限，同时 SDN 技术仍处于快速发展之中，因此书中难免会存在不少疏漏，真诚地期盼读者批评指正。

作 者



目 录

第 1 章 Open vSwitch 应用实践	001
1.1 OVS 系统架构	002
1.2 OVS 代码解读	005
1.2.1 代码结构	005
1.2.2 代码解析	006
1.3 OVS 安装使用	013
1.3.1 软件安装	013
1.3.2 使用说明	016
1.4 OVS 应用实例	018
1.4.1 实例介绍	018
1.4.2 实例开发	019
1.4.3 实验结果	022
1.5 本章小结	023
参考文献	024
第 2 章 Mininet 应用实践	025
2.1 Mininet 系统架构	026
2.2 Mininet 代码解读	028
2.2.1 代码结构	029



2.2.2	代码解析	030
2.3	Mininet 安装使用	033
2.3.1	软件安装	033
2.3.2	使用说明	035
2.4	Mininet 应用实例	038
2.4.1	实例介绍	038
2.4.2	实例开发	040
2.4.3	实验结果	043
2.5	本章小结	044
	参考文献	044
第 3 章	POX 应用实践	045
3.1	POX 代码解读	046
3.1.1	代码结构	046
3.1.2	代码解析	047
3.2	POX 安装配置	060
3.2.1	软件安装	060
3.2.2	系统配置	061
3.3	POX 应用实例	063
3.3.1	实例介绍	063
3.3.2	实例开发	064
3.3.3	实验结果	073
3.4	本章小结	073
	参考文献	074
第 4 章	Ryu 应用实践	075
4.1	Ryu 代码解读	076
4.1.1	代码结构	076
4.1.2	代码解析	077
4.2	Ryu 安装配置	081
4.2.1	软件安装	081
4.2.2	GUI 配置	081
4.3	Ryu 应用实例	083
4.3.1	实例介绍	083



4.3.2 实例开发	087
4.3.3 实验结果	095
4.4 本章小结	097
第 5 章 Floodlight 应用实践	099
5.1 Floodlight 代码解读	100
5.1.1 代码结构	100
5.1.2 代码解析	101
5.2 Floodlight 安装配置	107
5.2.1 软件安装	108
5.2.2 参数配置	109
5.3 Floodlight 应用实例	109
5.3.1 实例介绍	109
5.3.2 实例开发	110
5.3.3 实验结果	114
5.4 本章小结	115
第 6 章 OpenDaylight 应用实践（一）	117
6.1 OpenDaylight 项目	118
6.1.1 项目介绍	118
6.1.2 系统架构	122
6.1.3 关键技术	126
6.2 OpenDaylight 代码解读	136
6.2.1 代码结构	136
6.2.2 代码解析	137
6.3 OpenDaylight 安装配置	149
6.3.1 软件安装	149
6.3.2 系统配置	153
6.4 本章小结	155
第 7 章 OpenDaylight 应用实践（二）	157
7.1 基于 OpenDaylight 的二层转发应用	158
7.1.1 项目介绍	158
7.1.2 代码解析	160



7.1.3	实例开发	164
7.2	基于 OpenDaylight 的 OVSDb 应用	169
7.2.1	项目介绍	169
7.2.2	代码解析	169
7.2.3	实例开发	175
7.3	基于 OpenDaylight 的云网络应用	189
7.3.1	项目介绍	189
7.3.2	环境搭建	194
7.3.3	实例开发	199
7.4	本章小结	204
第 8 章	ONOS 应用实践 (一)	205
8.1	ONOS 项目	206
8.1.1	项目介绍	206
8.1.2	系统架构	207
8.2	ONOS 代码解读	211
8.2.1	代码结构	211
8.2.2	代码解析	212
8.3	ONOS 安装配置	218
8.3.1	软件安装	218
8.3.2	系统配置	219
8.4	本章小结	221
第 9 章	ONOS 应用实践 (二)	223
9.1	基于 ONOS 的 HelloONOS 应用	224
9.1.1	项目介绍	224
9.1.2	代码解析	224
9.1.3	实例开发	227
9.2	基于 ONOS 的三层转发应用	232
9.2.1	项目介绍	232
9.2.2	代码解析	232
9.2.3	实例开发	235
9.3	基于 ONOS 的命令行与服务应用	246
9.3.1	项目介绍	246



9.3.2	代码解析	247
9.3.3	实例开发	249
9.4	基于 ONOS 的网络故障检测应用	256
9.4.1	项目介绍	256
9.4.2	代码解析	257
9.4.3	实例开发	259
9.5	本章小结	270
第 10 章	FlowVisor 应用实践	273
10.1	FlowVisor 代码解读	274
10.1.1	代码结构	274
10.1.2	代码解析	275
10.2	FlowVisor 安装使用	285
10.2.1	软件安装	285
10.2.2	使用说明	286
10.3	基于交换机的虚拟网划分应用实例	287
10.3.1	实例介绍	287
10.3.2	实验流程	288
10.3.3	实验结果	289
10.4	基于传输层的虚拟网划分应用实例	290
10.4.1	实例介绍	290
10.4.2	实验流程	291
10.4.3	实验结果	292
10.5	本章小结	293
第 11 章	OpenVirteX 应用实践	295
11.1	OpenVirteX 代码解读	296
11.1.1	代码结构	296
11.1.2	代码解析	297
11.2	OpenVirteX 安装使用	304
11.2.1	软件安装	305
11.2.2	使用说明	305
11.3	OpenVirteX 应用实例	307
11.3.1	实例介绍	307



11.3.2	实验流程	308
11.3.3	实验结果	312
11.4	本章小结	313
	参考文献	313
第 12 章	扩展实验工具	315
12.1	功能测试工具 OFTest	316
12.1.1	工具介绍	316
12.1.2	软件安装	317
12.1.3	应用实例	318
12.2	性能测试工具 Cbench	320
12.2.1	工具介绍	320
12.2.2	软件安装	321
12.2.3	应用实例	323
12.3	拓扑生成工具 VND	325
12.3.1	工具介绍	325
12.3.2	应用实例	326
12.4	报文分析工具 Wireshark	327
12.4.1	工具介绍	327
12.4.2	软件安装	328
12.4.3	应用实例	329
12.5	流量监控工具 sFlow	331
12.5.1	工具介绍	331
12.5.2	软件安装	332
12.5.3	应用实例	334
12.6	本章小结	336
	缩略语	337
	名词索引	341



第1章

Open vSwitch 应用实践

数据平面交换设备是 SDN 系统的重要组成部分之一，目前，SDN 的基础设施层可采用商用硬件交换设备，也可使用软件实现的交换设备。二者的主要差异体现在转发性能上，基于软件实现的交换设备能否大规模应用于商用系统成为很多用户普遍担心的问题。然而，随着通用处理器性能的提升，软件交换设备的转发性能也逐步增强，因此业界也开始积极尝试采用基于软件实现的可编程网络设备来构建软件定义网络。

Open vSwitch 作为一款开源的 OpenFlow 软件交换机，基于与平台无关的 C 代码实现，容易移植到其他环境，既能够作为虚拟机管理平台的软件交换机，也可以作为交换芯片的控制堆栈，因此得到了广泛关注。本章将详细地对 OVS 的核心原理及使用方法进行介绍，并给出应用 OVS 进行 SDN 组网的实例。



| 1.1 OVS 系统架构 |

OVS 功能全面，可以实现大规模网络的自动化配置、管理、维护，且支持大量现有标准管理接口和协议，利用其作为 SDN 的基础设施层转发设备，可大幅降低部署成本，还可以提高网络的灵活性以及可扩展性^[1-2]。

OVS 架构分为内核空间、用户空间、配置管理层 3 个部分^[1]，如图 1-1 所示。其中，内核空间包含了流表（Flow Table）和一个或多个 Datapath 模块，其中 Datapath 模块类似于网桥，主要负责对数据分组进行操作^[3]，另外，内核空间中维护的流表规定了针对数据分组应该进行的操作，Datapath 通过关联流表与其协同完成分组处理过程。用户空间中运行着 OVS 的守护进程（Open vSwitch Daemon，vswitchd）和数据库（Open vSwitch Database，ovsdb），它们是 OVS 的核心功能模块，vswitchd 类似于 OVS 的心脏，它维持着 OVS 的生命周期，而 ovsdb 就像 OVS 的大脑，它存储着 OVS 的配置信息和数据流信息，vswitchd 和 ovsdb 协调工作确保 OVS 健康的运行状态。配置管理层包括 ovs-dpctl、ovs-ofctl、ovs-appctl、ovs-vsctl 和 ovsdb-tool 等，主要用于和 vswitchd、ovsdb 之间进行交互操作以及 OVS 的安装配置和部署。