

# 软件定义网络核心原理 与应用实践（第三版）上册

**SDN Core Principles and  
Application Practice (3rd edition) Volume 1**

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

国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



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）上册

SDN Core Principles and  
Application Practice (3rd edition) Volume 1

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。

本系列丛书期望对当前 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。本册属于核心原理部分,重点介绍了 SDN 数控分离的体系架构和主流南向接口协议,以及 SDN 各个平面的相关成果,第三次再版,本册主要对 SDN 领域的最新进展进行了更新。具体章节内容介绍如下。

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，使读者更方便了解 SDN 技术的发展前景。

为便于读者检索，本书在附录中给出了 SDN 相关缩略语、名词索引以及有关 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、晏思宇、侯乐、张歌、胡晓露、蒋韵、曹睿、马宁宁、毛健炜、师圣蔓、王泽南、王领、张航、张然、辛远铭、吴理炫、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、徐锬、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、徐雷博士，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。

同时还要感谢北京邮电大学 SDN 试验平台小组的高志鹏、赵钦、胡铮、李慧、乔秀全、孙咏梅等几位老师，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。由于作者水平所限，同时 SDN 技术仍处于快速发展之中，因此书中难免存在不少疏漏之处，真诚地企盼读者批评指正。

作者



# 目 录

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第 1 章 SDN 概述 .....           | 001 |
| 第 2 章 SDN 基本原理 .....         | 011 |
| 2.1 SDN 定义与架构 .....          | 012 |
| 2.1.1 SDN 定义 .....           | 012 |
| 2.1.2 SDN 架构 .....           | 014 |
| 2.2 数据控制分离 .....             | 019 |
| 2.2.1 基本概念 .....             | 019 |
| 2.2.2 数据控制分离历史 .....         | 022 |
| 2.2.3 SDN 数据控制分离 .....       | 026 |
| 2.3 网络可编程 .....              | 030 |
| 2.3.1 基本概念 .....             | 030 |
| 2.3.2 网络可编程历史 .....          | 031 |
| 2.3.3 SDN 可编程 .....          | 034 |
| 2.4 本章小结 .....               | 040 |
| 参考文献 .....                   | 040 |
| 第 3 章 SDN 接口协议 .....         | 043 |
| 3.1 OpenFlow 协议 .....        | 044 |
| 3.1.1 OpenFlow v1.0 协议 ..... | 045 |



|       |                       |     |
|-------|-----------------------|-----|
| 3.1.2 | OpenFlow 协议的演进        | 056 |
| 3.1.3 | OpenFlow 协议面临的问题      | 067 |
| 3.2   | OF-CONFIG 协议          | 068 |
| 3.2.1 | 协议框架                  | 069 |
| 3.2.2 | 设计需求                  | 070 |
| 3.2.3 | 数据模型                  | 072 |
| 3.2.4 | 协议演进                  | 074 |
| 3.3   | 其他 SDN 南向协议           | 074 |
| 3.3.1 | XMPP                  | 075 |
| 3.3.2 | PCEP                  | 076 |
| 3.3.3 | I2RS                  | 078 |
| 3.3.4 | OpFlex                | 079 |
| 3.3.5 | OVSDB Mgmt            | 080 |
| 3.3.6 | POF                   | 081 |
| 3.3.7 | P4                    | 086 |
| 3.4   | SDN 北向接口              | 090 |
| 3.4.1 | ONF 北向接口              | 091 |
| 3.4.2 | SDN 其他北向接口            | 093 |
| 3.4.3 | 北向接口的趋势与前景            | 094 |
| 3.5   | SDN 东西向接口协议           | 096 |
| 3.6   | 本章小结                  | 100 |
|       | 参考文献                  | 100 |
| 第 4 章 | SDN 数据平面              | 103 |
| 4.1   | 数据平面架构                | 104 |
| 4.2   | SDN 芯片                | 108 |
| 4.3   | SDN 硬件交换机             | 112 |
| 4.3.1 | 基于 ASIC 芯片的 SDN 品牌交换机 | 113 |
| 4.3.2 | 基于 ASIC 芯片的 SDN 白盒交换机 | 121 |
| 4.3.3 | 基于 NP 的 SDN 交换机       | 125 |
| 4.3.4 | 基于 NetFPGA 的 SDN 交换机  | 127 |
| 4.4   | SDN 软件交换机             | 129 |
| 4.4.1 | Open vSwitch          | 129 |



|       |                              |     |
|-------|------------------------------|-----|
| 4.4.2 | Pantou .....                 | 130 |
| 4.4.3 | Indigo .....                 | 131 |
| 4.4.4 | LINC .....                   | 131 |
| 4.4.5 | OpenFlowClick .....          | 133 |
| 4.4.6 | OF13SoftSwitch .....         | 133 |
| 4.4.7 | P4 BMv2 与 P4 Runtime .....   | 134 |
| 4.5   | 其他 SDN 业界相关进展 .....          | 135 |
| 4.5.1 | DPDK .....                   | 135 |
| 4.5.2 | FD.io .....                  | 137 |
| 4.5.3 | SONiC .....                  | 140 |
| 4.6   | 本章小结 .....                   | 142 |
|       | 参考文献 .....                   | 143 |
| 第 5 章 | SDN 控制平面 .....               | 145 |
| 5.1   | SDN 控制器 .....                | 146 |
| 5.1.1 | SDN 控制器体系架构 .....            | 146 |
| 5.1.2 | SDN 控制器评估要素 .....            | 150 |
| 5.2   | 开源控制器 .....                  | 153 |
| 5.2.1 | NOX/POX .....                | 153 |
| 5.2.2 | Ryu .....                    | 155 |
| 5.2.3 | Floodlight .....             | 157 |
| 5.2.4 | OpenDaylight .....           | 159 |
| 5.2.5 | ONOS .....                   | 163 |
| 5.2.6 | OpenContrail .....           | 165 |
| 5.2.7 | 其他开源控制器 .....                | 169 |
| 5.3   | 商用控制器 .....                  | 170 |
| 5.3.1 | Big Network Controller ..... | 171 |
| 5.3.2 | XNC .....                    | 172 |
| 5.3.3 | SDN Contrail .....           | 174 |
| 5.3.4 | Agile Controller .....       | 175 |
| 5.3.5 | ZENIC .....                  | 177 |
| 5.4   | 本章小结 .....                   | 178 |
|       | 参考文献 .....                   | 179 |



|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 第 6 章 SDN 应用案例 .....           | 181 |
| 6.1 SDN 在网络试验平台中的应用 .....      | 182 |
| 6.1.1 GENI OpenFlow .....      | 183 |
| 6.1.2 OFELIA .....             | 186 |
| 6.1.3 RISE .....               | 188 |
| 6.1.4 TWAREN .....             | 189 |
| 6.1.5 FINE .....               | 191 |
| 6.1.6 C-Lab .....              | 193 |
| 6.2 SDN 在网络虚拟化中的应用 .....       | 196 |
| 6.2.1 基于 SDN 的网络虚拟化 .....      | 197 |
| 6.2.2 网络虚拟化平台 FlowVisor .....  | 200 |
| 6.2.3 网络虚拟化平台 OpenVirteX ..... | 204 |
| 6.2.4 网络虚拟化平台 CNVP .....       | 208 |
| 6.3 SDN 在流量工程中的应用 .....        | 212 |
| 6.3.1 B4 概述 .....              | 213 |
| 6.3.2 B4 设计思路 .....            | 214 |
| 6.3.3 B4 核心网络功能 .....          | 217 |
| 6.3.4 基于 SDN 的流量工程实现 .....     | 221 |
| 6.3.5 B4 的部署与成效 .....          | 224 |
| 6.4 本章小结 .....                 | 228 |
| 参考文献 .....                     | 229 |
| 第 7 章 SDN 标准化与学术进展 .....       | 231 |
| 7.1 SDN 标准化进展 .....            | 232 |
| 7.1.1 开放网络基金会 .....            | 232 |
| 7.1.2 互联网工程任务组 .....           | 236 |
| 7.1.3 国际电信联盟 .....             | 239 |
| 7.1.4 欧洲电信标准化协会 .....          | 242 |
| 7.1.5 中国通信标准化协会 .....          | 246 |
| 7.2 SDN 学术进展 .....             | 249 |
| 7.2.1 控制平面可扩展性 .....           | 249 |
| 7.2.2 交换机 / 数据平面设计 .....       | 252 |



|                        |     |
|------------------------|-----|
| 7.2.3 SDN 编程语言 .....   | 254 |
| 7.2.4 测试、调试及管理 .....   | 256 |
| 7.2.5 数据中心应用 .....     | 258 |
| 7.2.6 校园网应用 .....      | 259 |
| 7.2.7 Peering 应用 ..... | 260 |
| 7.2.8 其他 .....         | 261 |
| 7.3 本章小结 .....         | 262 |
| 参考文献 .....             | 263 |
| 缩略语 .....              | 269 |
| 名词索引 .....             | 275 |



## 第1章

# SDN 概述

**软**件定义网络（Software Defined Networking, SDN）是近几年来受到广泛关注的一个技术理念。本章通过回顾整个互联网的发展历程来分析 SDN 诞生的背景，以及它之所以受到学术界和产业界如此强烈关注的原因，使读者对 SDN 技术有一个感性的认识；然后在第 2 章中详细阐释 SDN 的具体定义，从而使读者能够对 SDN 有更深入的理解。



谈到互联网的发展历史,我们可以从任何一本关于计算机网络的课本中找到,下面仅对互联网发展历程中具有代表性的一些重要事件做简要介绍。在 20 世纪 50 年代,随着计算机技术和通信技术的快速发展,科学家们认识到通过组建连通性的网络,能够实现不同计算机用户之间的远距离通信,这促进了学术界开始对数据分组交换、分布式网络、排队论等一系列技术展开探索和研究。1962 年,Leonard Kleinrock 在美国麻省理工学院的博士论文中首次提出分组交换概念,该技术后来成为互联网的标准通信方式。在 20 世纪 60 年代特定的“冷战”历史背景下,美国国防部于 1969 年启动了计算机网络开发计划 ARPANet (Advanced Research Projects Agency Network),这一网络最初连接了美国加利福尼亚大学洛杉矶分校、美国斯坦福大学、加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校以及犹他大学的几台大型计算机,虽然开始时规模很小,但是 ARPANet 的成功运行使计算机网络的概念发生了根本变化,同时标志着现代互联网的诞生。1974 年,国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)发布了著名的 ISO/IEC 7498 标准,它首次提出并定义了网络分层模型设计思想,也就是我们所熟知的 OSI(Open System Interconnection,开放式系统互连)7 层参考模型,同年 12 月,斯坦福大学的 Vinton G. Cerf 和 Robert E. Kahn 一起领导的研究小组提出了著名的 TCP/IP(Transmission Control Protocol/Internet Protocol,传输控制协议/互联网协议),利用计算机网络互连的思想,以互连具有不同协议的网络,从而使得构建大规模数据分组网络成为可能。1983 年,



ARPANet 宣布将过去的通信协议——NCP( Network Control Protocol, 网络控制协议)向 TCP/IP 过渡。1984 年, 欧洲粒子物理研究实验室(CERN)的 Tim Berners Lee 博士为解决由于 CERN 主机不兼容而无法共享文件的问题, 提出了开发一个分布式系统的设想。1991 年夏, Tim 利用 HTML( HyperText Markup Language, 超文本标记语言)、HTTP( HyperText Transfer Protocol, 超文本传输协议)成功编制了第一个局部存取浏览器 Enguire, 从此 Web 应用开始起飞, 随后通过不断演进最终形成了著名的万维网( World Wide Web, WWW)技术。1996 年, 随着万维网的大规模应用, “Internet( 互联网)”一词广泛流传。之后 10 年, 互联网基于“细腰”的设计理念成功容纳了各种不同的底层网络技术和丰富的上层应用, 迅速风靡全世界。

可以看到, 互联网最初的设计目标是要把分散的计算机连接起来以达到资源共享的目的。在互联网发展的初期, 一所大学、一个研究机构或者企业都能够把自己的计算机资源通过网络组织起来形成私有的网络, 这个网络只是为了自己的小规模研究或者给员工提供辅助性服务。例如, 在一些中小企业内部往往构建一个小规模专用机房, 为员工提供邮件、数据库以及其他一些功能型应用服务, 这些应用服务的主要服务对象是公司的内部人员, 服务的规模通常很小, 因此, 各种设备只需要少量的运维管理人员就可以很好地进行管理。但是随着企业规模逐渐增大, 以及对外提供服务的增加, 原来专用的小型机房难以满足日益增长的需求, 这就需要企业对其进行扩容或扩建, 当然这将会使得机房的运维管理成本急剧上升。为应对这一问题, 互联网数据中心( IDC)应运而生, 业界开始考虑把各种业务托管到数据中心进行统一管理, 进而有效降低企业的 IT 运维成本。

随着业务的增长和数据中心的不断扩大, 服务器的计算能力与最初的计算机相比提高了成百上千倍, 但计算资源往往难以得到充分的利用, 一台服务器如果只处理少量任务, 或者有大量空闲时间没有执行操作系统的任务, 显然是对计算资源的一种浪费, 于是, 有研究者提出了一种新的技术设想——虚拟化。虚拟化技术的核心思想是希望能够在—台真实的物理机器上创建多个虚拟的逻辑主机, 每个逻辑主机有自己虚拟的网卡、主板等虚拟设备, 这些虚拟设备能够高效地复用真实物理设备, 从而极大地提高物理基础设施资源的利用率。同时, 为便于用户使用各逻辑资源, 还特别强调灵活性和隔离性, 即各台逻辑主机可以支持不同的操作系统, 能够并行运行且互不干扰。正是由于上述这些技术特点, 在随后几年中, 虚拟化技术凭借种种优势逐步成为了信息技术( IT)领域持续关注的热点之一。

事实上, 虚拟化技术在充分利用物理资源的同时也带来了许多其他好处。