



国之重器出版工程

网络强国建设

网络基础与关键技术研究丛书

Network Function Virtualization
Architecture, Development, Testing and Application

网络功能虚拟化 NFV 架构、开发、测试及应用

李素游 寿国础 编著



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

网络基础与关键技术研究丛书

网络功能虚拟化 NFV 架构、开发、测试及应用

Network Function Virtualization
Architecture , Development , Testing and Application

李素游 寿国础 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

网络功能虚拟化 : NFV架构、开发、测试及应用 /
李素游, 寿国础编著. — 北京 : 人民邮电出版社,
2018. 12
(国之重器出版工程·网络基础与关键技术研究丛书)
ISBN 978-7-115-50094-6

I. ①网… II. ①李… ②寿… III. ①计算机网络—
网络结构 IV. ①TP393.02

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第250358号

内 容 提 要

本书全面介绍了 NFV 体系架构与 NFV 中的两项基本技术: OpenStack 和 OpenDay Light/SDN 及其与 NFV 的相互关系, 介绍了开源平台 OPNFV、NFV 测试、NFV 应用场景, 并结合应用描述了 NFV 在 5G 以及移动核心网、移动边缘计算 (MEC) 中的应用等。

本书适合 ICT 领域的从业人员、研究人员和兴趣爱好者阅读。

-
- ◆ 编 著 李素游 寿国础
责任编辑 李 强
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: 720×1000 1/16
印张: 20.5
字数: 370 千字
- | |
|----------------------|
| 2018 年 12 月第 1 版 |
| 2018 年 12 月河北第 1 次印刷 |
-

定价: 108.00 元

读者服务热线: (010) 81055256 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

近年来,随着云计算、大数据以及移动互联网时代的到来,传统电信运营商面临着海量数据和多样业务的需求;在实力强大的互联网企业的竞争压力下,电信运营商面临着“管道化”的挑战,传统网络亟须改革。因此,ICT (Information and Communications Technology) 融合是未来发展的必然趋势。电信运营商积极拥抱以 NFV(Network Function Virtualization, 网络功能虚拟化) 为代表的 ICT 发展趋势,努力实现运营商的转型。NFV 是利用 IT 虚拟化技术将现有的网络设备功能整合进标准的服务器、存储和交换机等设备,以软件的形式实现网络功能,以此取代目前网络中私有、专用和封闭的网元设备。电信网络将借助 NFV 技术提高网络设备的利用率,降低运营商 OPEX/CAPEX 支出,加快业务创新的步伐,为用户带来更佳的业务使用体验,以此构造一个有竞争力的、创新的开放生态系统。

2012 年 10 月 22 日,全球 13 家网络运营商 (AT&T、BT、CenturyLink、中国移动、Colt、Deutsche Telekom、KDDI、NTT、Orange、Telecom Italia、Telefonica、Telstra、Verizon) 在软件定义网络 (SDN) 和 OpenFlow 世界大会上发布了 NFV 的第一份白皮书。随之而来的是,全球主要运营商、设备商以及 IT 厂商积极参与到 NFV 项目中,以推进 NFV 的发展。目前,NFV 已经开始逐步融入电信行业,研发、试验与部署进入快车道。2013 年 AT&T 首先推出了 Domain 2.0 计划 (也称为用户定义网络云项目); 2014 年 Telefonica 推出 UNICA Infrastructure 项目;典型的设备供应商,如爱立信、诺基亚、阿尔卡特朗讯以及华为也在不断向 NFV 转型。2014 年 10 月,由 AT&T、NTT、中国移动、Redhat、爱立信等厂商发起的 OPNFV(Open Platform of NFV)



开源社区正式成立。OPNFV 为 NFV 提供一个统一、开源的基础平台，此平台集成 OpenStack、OpenDaylight、OVS、CEPH 等上游社区的成果，并且推动上游社区加速接纳 NFV 相关需求。2015 年 1 月华为成立 NFV 开放实验室 (NFV Open Lab)。NFV 开放实验室针对各典型业务场景，构建了多厂商集成验证平台，同时以大数据平台为基础，与行业组织、运营商、合作伙伴进行联合解决方案开发，并进行相互认证和授权。另外，IT 公司也在开发符合电信级要求的软件，例如 Wind River, 6wind, Qosmos 等。NFV 技术日趋成熟，进入了快速发展期。

随着 NFV 技术的火热，广大读者和专业 ICT 行业技术人员对于 NFV 技术的学习和研究也产生了极大兴趣。因为市面上关于 NFV 的书籍甚少，而网上的资料晦涩且不系统，且其中大部分资料是英文的，这对于想快速入门的读者来说是个不小的障碍。本书较系统全面地介绍了 NFV 的架构、关键技术、测试、应用以及 NFV 与 5G、SDN、MEC 等新兴技术的联系和结合。希望本书能成为您学习的向导、工具和良师益友。

本书共 11 章。第 1 章为 NFV 概述，包含背景、技术基础以及优势与挑战等描述；第 2 章为 NFV 体系架构，结合标准化组织定义的 NFV 功能模块、参考架构、管理与编排等相关内容；第 3 ~ 4 章介绍 NFV 中的两项基本技术 SDN/OpenDaylight 和 OpenStack 以及讨论两项技术与 NFV 的相互关系；第 5 章介绍开源平台 OPNFV；第 6 章为 NFV 的测试；第 7 章为 NFV 应用场景的一般描述；第 8 ~ 11 章为结合应用的描述，包括 5G 与 NFV 以及 NFV 在移动核心网、移动边缘计算 (MEC) 中的应用等。

本书主要由李素游和寿国础编著，参加编写工作的还有廖春晓、王江龙、熊福荣、石黎云、柴瑶琳、薛俊礼、胡浩、杨健以及李洪星等。本书在编写过程中，得到郭志刚、胡怡红的大力支持，借此机会向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，不足和疏漏之处在所难免，恳请大家不吝指正，谨此致谢！

编著者



目 录

第 1 章 NFV 概述	001
1.1 NFV 概况	002
1.1.1 NFV 的发展背景	002
1.1.2 NFV 的优势	004
1.1.3 NFV 组织	005
1.1.4 NFV 行业发展概况	011
1.2 NFV 特性	012
1.2.1 可移植性	012
1.2.2 性能	012
1.2.3 伸缩	013
1.2.4 弹性和稳定性	013
1.2.5 安全	014
1.2.6 服务持续性	015
1.2.7 管理和编排	015
1.2.8 多厂商间的互操作性	015
1.2.9 可操作性	016
1.2.10 能源效率	016
1.2.11 兼容性	016
1.3 NFV 技术基础	016
1.3.1 标准服务器	016



1.3.2	虚拟化技术	017
1.3.3	云计算	019
1.3.4	软件定义网络 (SDN)	020
1.3.5	开源软件	021
1.4	NFV 挑战	022
1.4.1	性能问题	022
1.4.2	虚拟网络功能间的连接问题	023
1.4.3	网络安全问题	023
1.4.4	NFV 的标准问题	024
1.4.5	系统集成问题	024
1.4.6	运营商业务引入 NFV 问题	024
第 2 章	NFV 体系架构	027
2.1	NFV 设计目标	028
2.2	NFV 系统结构	030
2.3	NFV 参考架构	031
2.3.1	NFVI	032
2.3.2	VNF	033
2.3.3	NFV MANO	035
2.3.4	服务、VNF 以及基础设施描述符	039
2.3.5	EM	039
2.3.6	OSS/BSS	040
2.3.7	参考点	040
2.4	网络功能虚拟化	043
2.4.1	网络功能虚拟化的实现	043
2.4.2	VFBs 映射到 HFBs 的功能块方法	046
2.5	NFV 域	048
2.6	NFVI 域	051
2.6.1	NFVI 目标	051
2.6.2	NFVI 域	052
2.7	NFVI 和云计算	055
2.7.1	云计算的基本特征应用于 NFVI	056
2.7.2	云计算的服务模式应用于 NFVI	057
2.7.3	云部署模型应用于 NFVI	058



第3章 SDN 与 OpenDaylight	059
3.1 SDN 架构	060
3.1.1 数据转发层	061
3.1.2 控制层	063
3.1.3 应用层	064
3.2 SDN 控制器	065
3.2.1 NOX/POX	066
3.2.2 Floodlight	066
3.2.3 Ryu	066
3.2.4 OpenContrail	066
3.2.5 OpenDaylight	067
3.2.6 ONOS	067
3.2.7 其他类型控制器	067
3.2.8 多控制器模型	068
3.3 SDN 南北向接口	070
3.3.1 SDN 北向 REST 接口	070
3.3.2 SDN 南向接口与协议	074
3.4 OpenDaylight 控制器	076
3.4.1 OpenDaylight 架构	076
3.4.2 OpenDaylight 工作流程分析	078
3.4.3 OpenDaylight 版本	079
3.4.4 OpenDaylight 与 OpenStack	080
3.5 OpenDaylight 中部分重点项目	081
3.5.1 数据建模语言 YANG	081
3.5.2 L2Switch 项目	084
3.5.3 功能服务链项目	087
3.6 SDN 与 NFV	090
3.6.1 SDN 与 NFV 的关系	090
3.6.2 IEEE SDN/NFV 的标准化	092
3.6.3 NFV 架构中的 SDN	093
第4章 云管理平台 OpenStack	097
4.1 云管理平台	098



4.1.1	云管理平台功能	098
4.1.2	主流的云管理平台	099
4.2	OpenStack 发展历程	099
4.3	OpenStack 架构	101
4.4	OpenStack 核心组件	102
4.4.1	计算 (Nova)	105
4.4.2	网络 (Neutron)	107
4.4.3	对象存储 (Swift)	109
4.4.4	块存储 (Cinder)	112
4.4.5	认证 (Keystone)	113
4.4.6	镜像服务 (Glance)	116
4.4.7	界面 (Horizon)	116
4.5	OpenStack 与 NFV	117
第 5 章	OPNFV	123
5.1	OPNFV 简介	124
5.2	OPNFV 与 NFV 产业	125
5.2.1	OPNFV 目标	125
5.2.2	OPNFV 对 NFV 产业的推进作用	125
5.3	OPNFV 架构	126
5.3.1	OPNFV 架构	126
5.3.2	OPNFV 其他组件	127
5.3.3	OPNFV 模块交互接口	131
5.3.4	Arno 版本	132
5.3.5	Brahmaputra 版本	134
5.3.6	Colorado 版本	135
5.4	OPNFV 安装	137
5.4.1	安装方式	137
5.4.2	安装过程介绍	138
第 6 章	NFV 系统测试	143
6.1	NFV 系统测试原理和方法	144
6.1.1	测试需求分析	144
6.1.2	测试方法	146



6.1.3	平台测试	148
6.1.4	业务测试	154
6.1.5	系统可用性测试	158
6.2	NFV 系统测试分析	161
6.2.1	平台测试方案	161
6.2.2	平台测试结果分析	165
6.2.3	业务测试方案	167
6.2.4	业务测试结果分析	169
6.3	OPNFV Functest 测试	171
6.3.1	Functest 配置引导	172
6.3.2	Functest 使用引导	177
6.3.3	执行 Functest 测试	183
第 7 章	NFV 应用场景	187
7.1	网络功能虚拟化基础设施即服务 (NFVlaaS)	188
7.1.1	概述	189
7.1.2	虚拟化目标	192
7.1.3	虚拟化网络功能的共存	192
7.2	虚拟网络功能即服务 (VNFaaS)	193
7.2.1	动机	193
7.2.2	描述	194
7.2.3	vE-CPE	194
7.2.4	虚拟化目标	196
7.3	虚拟网络平台即服务 (VNPaaS)	197
7.4	VNF 转发图 (VNF-FG)	197
7.4.1	动机	198
7.4.2	描述	199
7.4.3	虚拟化目标	201
7.5	移动核心网虚拟化	202
7.5.1	动机	203
7.5.2	描述	203
7.5.3	虚拟化目标	204
7.5.4	物理和虚拟化网络功能的共存	205
7.6	移动基站虚拟化	207



7.6.1	动机	207
7.6.2	描述	207
7.6.3	虚拟化目标	208
7.6.4	物理和虚拟化网络功能的共存	209
7.7	家庭网络虚拟化	210
7.7.1	动机	210
7.7.2	描述	210
7.7.3	物理和虚拟化网络功能的共存	212
7.8	虚拟化内容分发网络 (vCDN)	214
7.8.1	动机	214
7.8.2	描述	215
7.8.3	虚拟化目标	215
7.8.4	物理和虚拟化网络功能的共存	216
7.9	固定接入网络功能虚拟化	217
7.9.1	动机	217
7.9.2	描述	217
7.9.3	挑战	218
7.9.4	虚拟化目标	219
7.9.5	物理和虚拟化网络功能的共存	219
第 8 章	5G 中的 NFV/SDN	221
8.1	5G 发展背景	222
8.2	5G 研发进展	223
8.2.1	5G 的标准组织	223
8.2.2	各国政府及组织对 5G 的支持	225
8.3	5G 网络的需求和挑战	227
8.4	基于 NFV/SDN 的 5G 网络架构设想	230
8.4.1	NFV/SDN 在 5G 中的优势	230
8.4.2	基于 NFV/SDN 的 5G 网络架构设计	231
8.5	5G 网络架构	232
8.5.1	NGMN 5G 网络架构	232
8.5.2	IMT-2020 5G 推进组网络架构	233
8.5.3	移动 5G 网络架构	236
8.5.4	联通 5G 网络架构	238



8.5.5 电信 5G 网络架构	239
第 9 章 NFV 与移动核心网	243
9.1 基于 NFV 的核心网演进	245
9.2 IMS 网络虚拟化系统架构研究（中国移动）	247
9.2.1 虚拟化 IMS 网络系统架构	247
9.2.2 虚拟化 IMS 网络主要接口	248
9.2.3 虚拟化 IMS 网络主要设备及设备形态研究	249
9.3 EPS 业务链虚拟化方案研究（华为）	250
9.3.1 业务链架构	250
9.3.2 业务链关键功能模块与接口	251
9.4 NFV 开源软件	252
9.4.1 EPC/IMS 开源软件	252
9.4.2 虚拟路由和交换	253
9.4.3 其他开源网络设备	254
9.5 NFV 开启现网试点	255
9.5.1 AT&T	255
9.5.2 中国移动	255
9.5.3 中国联通	256
9.5.4 中国电信	257
9.5.5 相关报道	257
第 10 章 NFV 与移动边缘计算（MEC）	259
10.1 背景	260
10.2 MEC 工作原理及优势	261
10.3 MEC 关键技术	262
10.3.1 虚拟化技术	262
10.3.2 无线接入技术	263
10.4 MEC 特点	264
10.5 ISG MEC 工作组工作	264
10.5.1 ISG MEC 的基本理念与目标	264
10.5.2 MEC 服务器部署方案	265
10.5.3 MEC 体系架构	266
10.6 应用	268



10.6.1	应用分类	268
10.6.2	应用例	270
10.6.3	5G 中的 MEC 应用	275
10.7	MEC 与触感互联网	276
10.8	MEC 的挑战	278
10.8.1	安全问题	278
10.8.2	平台管理和应用可移植性	279
10.8.3	顽健性和弹性	279
10.8.4	用户隐私和计费挑战	279
10.8.5	网络整合和服务器部署	280
10.8.6	能源效率	280
第 11 章	MEC 应用实例——WiCloud	281
11.1	WiCloud 架构	282
11.2	WiCloud 应用	284
11.2.1	商铺客流分析服务	285
11.2.2	智能客户分析服务	287
11.2.3	个性化定制服务	289
11.2.4	公共场所人员空间分析服务	291
11.2.5	无线网络质量分析与优化服务	292
主要概念术语		293
参考文献		305