



国之重器出版工程  
网络强国建设

未来网络创新技术研究系列

Advanced Technologies for  
Virtual Network

# 虚拟网络新技术

尹星 朱轶 王良民

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

未来网络创新技术研究系列

# 虚拟网络新技术

Advanced Technologies for  
Virtual Network

尹星 朱轶 王良民 编 著

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

虚拟网络新技术 / 尹星, 朱轶, 王良民编著. -- 北京: 人民邮电出版社, 2019. 4  
(未来网络创新技术研究系列)  
国之重器出版工程  
ISBN 978-7-115-49500-6

I. ①虚… II. ①尹… ②朱… ③王… III. ①虚拟网络 IV. ①TP393

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第226534号

## 内 容 提 要

本书从虚拟化技术的基本思想引出虚拟网络与网络虚拟化的基本概念, 然后分类介绍了基于传统网络架构和基于软件定义网络的网络虚拟化技术。在此基础上, 瞄准网络虚拟化的最新进展, 围绕虚拟网络的安全性、隐私保护、可生存性, 以及无线和移动网络虚拟化等关键技术进行了分类介绍。此外, 还论述了网络功能虚拟化技术。最后, 介绍网络虚拟化技术的应用情况和未来发展趋势。

本书可作为网络工程相关技术专业人员的参考资料, 也可作为计算机、通信、信息安全等相关专业研究生学习虚拟网络技术的参考书。

- 
- ◆ 编 著 尹 星 朱 轶 王良民  
责任编辑 陈 娟  
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: 710×1000 1/16  
印张: 18.5 2019 年 4 月第 1 版  
字数: 342 千字 2019 年 4 月河北第 1 次印刷
- 

定价: 129.00 元

读者服务热线: (010)81055493 印装质量热线: (010)81055316  
反盗版热线: (010)81055493

# 《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

随着互联网规模的不断扩大和网络技术应用范围的日益广泛，新型网络应用不断涌现，并对网络系统提出了千差万别的新需求。然而，“网络僵化”成为网络发展的一个主要障碍。这是由于互联网在诞生之初仅是以提供具有一定可生存性的网络连接为目标，建立了以 IP 为核心的网络架构。在这种互联网架构设计中，随着网络规模的扩展，发现了诸多欠考虑的地方，带来了大量难以妥善解决的问题，导致网络的灵活性、可扩展性、安全性、移动性、可靠性、经济性以及服务质量等方面均存在不足，这些问题与不足被称为“网络僵化”，严重阻碍了新型网络业务在互联网中的部署和推广。

网络虚拟化技术已被公认为解决互联网僵化问题的有效手段，它不但是网络领域近年来的研究热点，也是互联网未来的发展趋势。虚拟化技术最初用于服务器和存储领域，扩展到网络领域后，采用上层逻辑网络与底层物理网络相分离的思想，将物理网络抽象成多个独立的虚拟网络（即逻辑网络），进而在已有的网络基础设施上构建虚拟网络。

网络虚拟化技术让终端用户在使用虚拟网络时感觉像是在独享某个物理网络，并使上层的逻辑网络与底层的物理网络可以独立发展，提高了网络资源利用率和网络的灵活性，使新的网络技术、架构和协议更易于在现有网络中部署和验证，以满足新型网络应用的多样化需求，并加快网络技术创新的步伐。

目前，网络虚拟化技术作为网络发展的主流技术之一，依然在不断的发展与进化中，新技术、新领域、新方法不断涌现。本书以现有的网络虚拟化技术为基础，



对虚拟网络的安全性和隐私保护、虚拟网络可生存性、无线和移动网络虚拟化、网络功能虚拟化等研究热点进行深入探讨,采用理论分析与最新案例相结合的方法,尽力为读者提供一部能反映网络虚拟化技术最新进展的介绍性著作,为网络领域的研究者和相关读者提供有益的参考。

全书共有 8 章,各章主要内容安排如下。

第 1 章首先介绍了虚拟化技术基本思想,然后按发展的先后顺序,介绍了已较为成熟的服务器虚拟化技术和存储虚拟化技术,以及最后发展起来的网络虚拟化技术,同时还分析了当前网络虚拟化技术面临的主要挑战。

第 2 章全面介绍了网络虚拟化技术,包括网络虚拟化技术的目标、分类和实现方式,然后分别介绍了基于传统网络和基于新的软件定义网络(SDN)的网络虚拟化技术。此外,还对虚拟网络映射理论进行了阐述。

第 3 章研究了网络虚拟化的安全性。首先介绍了传统网络架构的安全和相关技术,然后分析了虚拟化技术给网络安全带来的利与弊,并针对网络虚拟化过程中出现的安全问题提出相应的解决方案,最后在分析 SDN 的安全隐患和安全保护技术的基础上,分析了如何利用 SDN 来增强网络的安全性。

第 4 章研究了虚拟网络的隐私保护技术。首先分析了隐私信息披露途径,介绍了现有的隐私保护技术,然后通过具体实例分析了虚拟网络中的隐私保护技术以及网络资源与隐私保护的博弈。

第 5 章研究了虚拟网络的可生存性。在介绍相关背景和研究现状的基础上,给出了虚拟网络的可生存性和可生存的虚拟网络的定义,并对几种具有代表性的虚拟网络单节点和单链路故障情况下的可生存映射算法进行分析。此外,还对基于 SDN 的虚拟网络可生存性相关研究工作进行了介绍。

第 6 章研究了无线和移动网络虚拟化。在介绍了 5G 的 D2D 通信网络和 Ad Hoc 网络这两种无线网络的基础上,对无线网络虚拟化的概念以及 3 种无线网络虚拟化的技术进行阐述,并重点分析了软件定义协议技术。然后针对目前蜂窝移动网络存在的问题及相关虚拟化方案的不足,分析了基于软件定义网络架构并且适用于蜂窝系统的网络虚拟化方案 SoftAir。

第 7 章研究了与网络虚拟化相关的网络功能虚拟化(NFV)技术,包括 NFV 技术的背景、基本思想、架构和各组成部分、服务模式和应用场景、NFV 相关产品和应用实例以及 NFV 面临的挑战和未来发展趋势,并对 NFV、SDN 和 NV 三者之



间的关系进行分析。

第8章介绍了网络虚拟化技术的应用。首先分析了当前具有代表性的网络虚拟化项目和产品，然后对网络虚拟化技术的发展趋势进行了简要的分析。

本书由王良民负责整体架构、内容安排，并指导了全书的编写过程。尹星编写了第1、2、7、8章，并参与了其余章节的编写。董娜、姚嘉莹、姚奕如、张明政分别编写了第3、4、5、6章。朱轶参与了第3、4、5、6章的编写，并审阅了全书。

由于作者水平有限，同时网络虚拟化技术仍处于快速发展之中，因此本书中难免出现一些疏漏和错误，恳请各位专家和读者提出宝贵意见和建议。需要指出的是，本书内容主要来自作者在科研过程中对所学资料的汇编与思考，以及实际经验的总结，在引文来源标注时，标注的是学习及科研过程中所获得的直接资料，因此极有可能存在未能引用最原始文献的错漏，如有发现，敬请告之。谨此致谢！

王良民

2018年8月于大禹山麓



# 目 录

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第 1 章 绪 论                  | 001 |
| 1.1 虚拟化思想                  | 002 |
| 1.2 虚拟化技术的发展和应             | 006 |
| 1.2.1 服务器虚拟化               | 007 |
| 1.2.2 存储虚拟化                | 009 |
| 1.2.3 网络虚拟化                | 011 |
| 1.3 网络虚拟化技术面临的挑战           | 013 |
| 参考文献                       | 014 |
| 第 2 章 网络虚拟化技术              | 017 |
| 2.1 网络虚拟化概述                | 018 |
| 2.1.1 网络虚拟化的设计目标           | 019 |
| 2.1.2 网络虚拟化技术的分类           | 021 |
| 2.2 基于传统网络的网络虚拟化技术         | 023 |
| 2.2.1 虚拟局域网                | 023 |
| 2.2.2 虚拟专用网                | 025 |
| 2.2.3 主动和可编程网络             | 027 |
| 2.2.4 基于隧道技术的覆盖网络          | 027 |
| 2.3 基于 SDN 架构的网络虚拟化技术      | 033 |
| 2.3.1 SDN 概述               | 033 |
| 2.3.2 SDN 架构模型             | 037 |
| 2.3.3 SDN 的实现与 OpenFlow 协议 | 040 |
| 2.3.4 基于 SDN 的网络虚拟化技术      | 045 |
| 2.4 虚拟网络模型和映射理论            | 049 |
| 2.4.1 网络虚拟化环境中的网络模型        | 050 |
| 2.4.2 虚拟网络映射及其形式化描述        | 052 |
| 2.4.3 虚拟网络映射的目标            | 055 |
| 2.4.4 求解最佳映射的主要方法          | 058 |
| 2.4.5 虚拟网络映射方案的分类          | 060 |



|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 2.4.6 虚拟网络映射技术面临的挑战 .....        | 064 |
| 参考文献 .....                       | 068 |
| 第3章 网络虚拟化的安全性 .....              | 073 |
| 3.1 网络安全与虚拟化安全 .....             | 074 |
| 3.1.1 网络安全概述 .....               | 074 |
| 3.1.2 网络虚拟化安全概述 .....            | 075 |
| 3.2 网络虚拟化安全问题及其分类 .....          | 076 |
| 3.2.1 整体视角 .....                 | 076 |
| 3.2.2 终端用户的角度 .....              | 077 |
| 3.2.3 InP 的角度 .....              | 078 |
| 3.2.4 虚拟网络嵌入的相关性 .....           | 079 |
| 3.3 网络虚拟化的安全实现技术手段 .....         | 079 |
| 3.3.1 安全方案设计 .....               | 080 |
| 3.3.2 网络模型建立 .....               | 081 |
| 3.3.3 SVNE 问题定义 .....            | 082 |
| 3.3.4 SVNE 框架构建 .....            | 082 |
| 3.3.5 安全代价评估 .....               | 087 |
| 3.3.6 网络虚拟化安全面临的主要问题 .....       | 087 |
| 3.4 基于 SDN 架构的虚拟网络安全性 .....      | 088 |
| 3.4.1 SDN 安全性概述 .....            | 088 |
| 3.4.2 基于 SDN 架构的虚拟网络安全问题分类 ..... | 089 |
| 3.4.3 SDN 的典型安全问题 .....          | 092 |
| 3.4.4 实现 SDN 安全的技术手段 .....       | 095 |
| 3.5 利用 SDN 来提高网络安全性 .....        | 100 |
| 3.5.1 嵌入式安全方案 .....              | 102 |
| 3.5.2 被动式安全方案 .....              | 104 |
| 3.5.3 网络异常检测应用程序 .....           | 105 |
| 参考文献 .....                       | 106 |
| 第4章 虚拟网络隐私保护 .....               | 109 |
| 4.1 隐私保护概述 .....                 | 110 |
| 4.1.1 隐私信息泄露 .....               | 110 |
| 4.1.2 隐私保护技术 .....               | 111 |



|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 4.2 虚拟网络的隐私保护方案             | 116        |
| 4.2.1 虚拟网络隐私泄露              | 117        |
| 4.2.2 隐私保护方案性能评估            | 118        |
| 4.2.3 基于 SDN 的匿名通信方案        | 119        |
| 4.3 虚拟网络隐私保护与资源博弈           | 125        |
| 4.3.1 博弈论简介                 | 126        |
| 4.3.2 隐私保护与资源博弈模型实例         | 128        |
| 4.4 工作展望                    | 136        |
| 参考文献                        | 136        |
| <b>第 5 章 虚拟网络可生存性与可生存技术</b> | <b>139</b> |
| 5.1 虚拟网络可生存概述               | 140        |
| 5.1.1 研究背景                  | 140        |
| 5.1.2 网络系统可生存性定义            | 141        |
| 5.1.3 虚拟网络可生存性定义            | 142        |
| 5.1.4 虚拟网络可生存技术分类           | 142        |
| 5.1.5 可生存的虚拟网络              | 144        |
| 5.2 虚拟网络可生存技术               | 145        |
| 5.2.1 可生存性映射方法              | 145        |
| 5.2.2 可生存性映射算法              | 146        |
| 5.3 基于 SDN 的虚拟网络可生存实例       | 165        |
| 5.3.1 软件定义网络的可生存性           | 165        |
| 5.3.2 基于 T-SDN 的虚拟基础设施可生存映射 | 165        |
| 参考文献                        | 168        |
| <b>第 6 章 无线和移动网络虚拟化</b>     | <b>173</b> |
| 6.1 无线网络类型                  | 174        |
| 6.1.1 Ad Hoc 网络             | 174        |
| 6.1.2 5G 的 D2D 通信网络         | 177        |
| 6.2 无线网络虚拟化                 | 181        |
| 6.2.1 无线网络虚拟化概述             | 181        |
| 6.2.2 无线网络虚拟化关键技术           | 182        |
| 6.2.3 无线网络虚拟化的未来发展          | 195        |
| 6.3 蜂窝移动网络虚拟化               | 195        |



|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 6.3.1 目前蜂窝网络存在的问题              | 196 |
| 6.3.2 已有 W-SDN 解决方案及其优缺点       | 197 |
| 6.3.3 5G 蜂窝系统的软件定义网络架构 SoftAir | 203 |
| 6.3.4 SDN 在未来移动网络中的应用前景        | 206 |
| 参考文献                           | 207 |

## 第 7 章 网络功能虚拟化 ..... 209

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 7.1 NFV 技术概述                    | 210 |
| 7.1.1 NFV 技术背景                  | 210 |
| 7.1.2 NFV 技术的目标和基本思想            | 212 |
| 7.1.3 NFV 的优势                   | 215 |
| 7.1.4 NFV 的发展和标准化组织             | 217 |
| 7.2 NFV 体系架构分析                  | 219 |
| 7.2.1 NFV 体系架构                  | 220 |
| 7.2.2 NFV 基础设施 (NFVI)           | 223 |
| 7.2.3 虚拟网络功能 (VNF)              | 225 |
| 7.2.4 网元管理系统 (EMS)              | 225 |
| 7.2.5 运营支撑系统/业务支撑支持系统 (OSS/BSS) | 226 |
| 7.2.6 NFV 管理与编排 (NFV MANO)      | 226 |
| 7.3 NFV 的服务模式和应用场景              | 232 |
| 7.3.1 NFV 的服务模式                 | 232 |
| 7.3.2 NFV 的主要应用场景               | 233 |
| 7.4 NFV 相关项目、产品和应用实例            | 235 |
| 7.4.1 NFV 相关项目                  | 235 |
| 7.4.2 NFV 相关产品                  | 237 |
| 7.4.3 基于 ONOS 的 NFV 应用实例        | 241 |
| 7.5 NFV 技术面临的主要挑战               | 245 |
| 7.5.1 设备可靠性问题                   | 245 |
| 7.5.2 数据转发性能的问题                 | 251 |
| 7.5.3 标准不成熟、不完善的问题              | 251 |
| 7.5.4 系统集成带来兼容性问题               | 252 |
| 7.5.5 虚拟化后的集成度下降的问题             | 252 |
| 7.5.6 网络虚拟化技术相对滞后的问题            | 253 |
| 7.6 NFV 与 SDN、NV 之间的关系          | 253 |



|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 7.6.1 NFV 与 SDN、NV 之间的区别与比较 .....    | 253        |
| 7.6.2 NFV 与 SDN、NV 之间的关联 .....       | 254        |
| 7.7 NFV 技术未来发展趋势 .....               | 256        |
| 参考文献 .....                           | 257        |
| <b>第 8 章 网络虚拟化技术的应用与未来发展趋势 .....</b> | <b>259</b> |
| 8.1 网络虚拟化技术的应用 .....                 | 260        |
| 8.1.1 基于传统网络的网络虚拟化应用 .....           | 260        |
| 8.1.2 基于 SDN 的网络虚拟化应用 .....          | 263        |
| 8.2 网络虚拟化技术未来发展趋势 .....              | 268        |
| 参考文献 .....                           | 270        |
| 中英文对照 .....                          | 273        |
| 名词索引 .....                           | 277        |



## 第1章 绪 论

**本**章首先介绍了信息技术（Information Technology, IT）领域的虚拟化（Virtualization）思想和虚拟化技术所采用的几种常见的技术手段。接着对虚拟化技术在 IT 领域的 3 类应用形式：服务器虚拟化、存储虚拟化和网络虚拟化进行介绍。最后对本书的重点——网络虚拟化技术所面临的主要挑战进行分析。



## | 1.1 虚拟化思想 |

作为近年来信息科学领域的热门技术，虚拟化技术已经越来越受到学术界和产业界的关注，并已在 IT 行业的多个领域得到应用。虚拟化技术现已成为服务器、云计算、大规模数据存储、网络通信等领域的关键技术。

虚拟化是一个宽泛的概念，虽然虚拟化技术已被广泛应用于很多领域，但不同领域的虚拟化技术的基本实现思想是相似的。从广义上讲，虚拟化是一种资源管理技术，泛指从实际存在的各类物理资源（包括 CPU、内存、外设、网络等硬件设备）中抽象出虚拟的逻辑资源，并对逻辑资源进行重新组合，然后使用虚拟出来的逻辑资源来代替或者模拟现实世界中真实的物理资源。虚拟化技术可以解决因物理设备的限制引起的诸多问题，这些限制因素包括物理结构不可分割以及资源架构方式、位置、配置无法灵活调整等。虚拟化技术通过将真实的物理资源抽象成可管控的逻辑资源，以逻辑的方式来进行资源管理，从而实现了资源的按需分配和自动化配置。从用户的角度看，虚拟化技术可以使用户以更加有效的方式来使用各类资源，并且可以让终端用户在应用中感觉不到物理设备数量和性能上的差异以及物理距离的远近，用户只需按照自己的习惯进行资源的调用和信息的交互即可。

虚拟化技术将原先紧密耦合的上层应用与底层物理设备（也称为基础设施）解耦，也就是在应用层与基础设施层之间引入一个虚拟化层，来实现物理资源的虚拟