

未来网络体系 与核心技术

Future Network Architectures
and Core Technologies

兰巨龙 胡宇翔 张震 江逸茗 王鹏 邬江兴 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

学术中国·院士系列
未来网络创新技术研究系列

未来网络体系 与核心技术

Future Network Architectures
and Core Technologies

兰巨龙 胡宇翔 张震 江逸茗 王鹏 邬江兴 编 著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

未来网络体系与核心技术 / 兰巨龙等编著. — 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 978-7-115-48764-3

I. ①未… II. ①兰… 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137106号

内 容 提 要

本书在介绍未来网络体系发展背景、基本概念和演进路线的基础上,通过对比分析现有国内外典型网络体系结构,总结提炼和详细阐述了未来网络体系结构和核心技术,并讨论了未来网络试验床。基于对未来网络的体系结构、运行机理的研究和作者所从事工作的实践经验,本书最后给出了一种可重构、可演进的网络功能创新平台开发实例。

本书取材新颖、内容翔实、实用性强,反映了国内外未来网络体系结构研究的现状与未来,适合从事通信、计算机网络体系设计与研究的广大工程技术人员阅读,也可作为大专院校通信、计算机等专业和相关培训班的教材或教学参考书。

◆ 编 著 兰巨龙 胡宇翔 张 震 江逸茗
王 鹏 邬江兴

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: 710×1000 1/16

印张: 25.25

2018年8月第1版

字数: 467千字

2018年8月河北第1次印刷

定价: 178.00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

随着网络技术和应用的不断发展，特别是大数据、云计算、人工智能的出现和运用，互联网迎来了裂变式的新一轮革命，正催使社会各方面发生许多颠覆性变化，并深刻改变着人类世界的空间轴、时间轴和思想维度。互联网业已成为与国民经济和社会发展高度相关的重大信息基础设施，其发展水平是衡量国家综合实力的重要标准之一。

现行互联网是以主机互联和资源共享为设计目标而实现的，只能提供尽力而为的数据分组转发服务，其自身体系结构的局限性阻碍着应用和服务的进一步发展，包括可扩展性、安全性、服务质量、移动性、内容分发能力、绿色节能等一系列问题，难以通过增量式的研究模式彻底解决。在此背景下，未来网络体系及其核心技术研究成为当前全球关注的热点领域。

本书主要内容包括：第1章概述了未来网络体系的发展背景、基本原理和演进路线，总结提炼了未来网络体系的核心技术和发展趋势；第2章以SDN为切入点，深入分析未来网络的开放可编程技术，包括SDN的体系框架、核心思想和应用案例；第3章介绍了网络虚拟化技术及相关网络体系和技术；第4章介绍了基于内容寻址的未来网络体系，包括基本概念、典型网络以及内容命名、路由转发、缓存与QoS等；第5章介绍了面向服务的未来网络体系的基本原理和核心技术；第6章从移动性的角度，对未来网络的支撑技术进行了梳理；第7章详细阐述了Choicenet、播存网、XIA、空天地一体化信息网络等新型网络体系；第8章介绍了国内外典型的未来网络试验床；第9章结合本书作者研发团队的实际工作，重点介绍了一种可重构、可演进的网络功能创新平台和验证环境实例。

本书在编写过程中得到了国家自然科学基金创新群体项目“网络空间拟态防御



基础理论研究”(编号:61521003)、国家“973”计划课题“网络组件模型与聚类机制”(编号:2013CB329104)、国家“863”计划课题“软件定义网络体系结构与关键技术研究”(编号:2015AA016102)、国家自然科学基金课题“不依赖网络的内容之特征及其网络功能抽象”(编号:61372121)、“流媒体网络多模式协同模型研究”(编号:61309019)和“虚拟网络自适应管理技术研究”(编号:61502530)等的资助。同时,本书在编写过程中也得到了许多国内外研究团队和同行专家的指导和帮助,在此也表示最衷心的感谢。

兰巨龙教授和邬江兴院士负责本书的统筹规划并编写了第1章,胡宇翔博士编写了第2章和第9章,江逸茗博士编写了第3章和第7章,张震博士编写了第4章、第6章和第8章,王鹏博士编写了第5章。另外,项目组谢立军、张少军、张果、陈龙、段通、周桥、古英汉、赵丹等为本书的文字校阅、插图绘制等做了大量工作。

限于作者水平,且各种未来网络体系结构和核心技术研究仍在快速发展和完善之中,本书难免存在缺点甚至错误之处,敬请广大读者批评指正。

作者



目 录

第 1 章 未来网络体系概述	001
1.1 未来网络的提出	002
1.1.1 网络创新的根本动力——需求的发展	002
1.1.2 未来网络的基本概念和认识	005
1.2 未来网络创新的两种路线	007
1.2.1 演进式路线	007
1.2.2 革命式路线	008
1.3 未来网络体系的研究实践	010
1.3.1 国内外研究现状	010
1.3.2 核心思路与技术	019
1.4 未来网络发展趋势	026
1.4.1 柔性化可重构网络组织结构	027
1.4.2 多样化寻址与路由方式的多模多态共存	029
1.4.3 辐射与对流耦合的抵近式缓存技术	031
1.4.4 支持主动防御的网络安全技术	033
参考文献	035
第 2 章 开放可编程的未来网络体系	037
2.1 开放可编程思想的提出	038
2.1.1 早期开放可编程思想	038
2.1.2 控制与转发分离	039



2.1.3	软件定义网络	040
2.2	基本结构与原理	041
2.2.1	体系框架	041
2.2.2	基本运行原理	043
2.2.3	典型应用案例	044
2.3	核心技术分析	059
2.3.1	数据平面可编程技术	059
2.3.2	控制平面可编程技术	066
2.3.3	接口技术	076
2.4	基于多级流表的动态编程机制	109
2.5	小结	113
	参考文献	113
第 3 章	网络虚拟化技术与未来网络体系	117
3.1	网络虚拟化技术概述	118
3.1.1	发展历程	118
3.1.2	核心技术思路	119
3.1.3	虚拟网映射问题	122
3.1.4	虚拟网的动态重构	130
3.1.5	虚拟网管理	132
3.2	基于虚拟化的未来网络体系结构	143
3.2.1	早期实现方案	143
3.2.2	PlantLab	144
3.2.3	4WARD	144
3.2.4	Nebula	146
3.2.5	FlowVisor	150
3.3	网络功能虚拟化	151
3.3.1	发展历程	151
3.3.2	网络功能虚拟化结构	153
3.3.3	网络功能虚拟化设计考虑因素	155
3.3.4	后续研究面临的挑战	156
	参考文献	160
第 4 章	基于内容寻址的未来网络体系	167
4.1	内容寻址的基本概念与意义	168



4.1.1	内容寻址的基本概念	169
4.1.2	内容寻址的意义	169
4.2	典型内容寻址网络体系	171
4.2.1	DONA	172
4.2.2	PSIRP	174
4.2.3	4WARD	175
4.2.4	NDN	177
4.3	命名机制	184
4.3.1	扁平化命名机制	185
4.3.2	层次化命名机制	186
4.3.3	二者的结合	188
4.4	路由和转发机制	189
4.4.1	路由机制	189
4.4.2	转发机制	191
4.4.3	路由和转发的关系	192
4.5	缓存机制	193
4.5.1	节点缓存规划	193
4.5.2	缓存决策算法	194
4.5.3	缓存替换算法	196
4.5.4	缓存、路由和转发的关系	197
4.6	QoS 机制	198
4.6.1	分类传输机制	198
4.6.2	拥塞控制机制	198
4.7	基于内容寻址的网络发展前景	199
4.7.1	与现有网络兼容	199
4.7.2	当前硬件处理速度和空间约束	199
4.7.3	具体应用探索	200
4.7.4	构建基于内容寻址的服务承载网	200
	参考文献	201
第 5 章	面向服务的未来网络体系	207
5.1	服务的基本概念	208
5.2	典型面向服务的网络体系	210
5.2.1	SOI	210
5.2.2	NetServ	214



5.2.3	COMBO	216
5.2.4	SONA	219
5.2.5	SILO	222
5.2.6	SLA@SOI	223
5.2.7	智慧协同网络	224
5.2.8	服务定制网络	227
5.3	面向服务的未来网络核心技术	228
5.3.1	服务标识定义与管理	228
5.3.2	服务注册与查询	231
5.3.3	服务动态感知方法	233
5.3.4	服务标识与位置的映射	234
5.3.5	服务寻址与路由	238
	参考文献	245
第 6 章	面向移动性的未来网络体系	247
6.1	移动性技术概述	248
6.2	传统网络的移动性技术	249
6.2.1	MIPv6	250
6.2.2	HMIPv6	251
6.2.3	FMIPv6	251
6.2.4	PMIPv6	251
6.3	新型移动性技术	252
6.3.1	LISP	252
6.3.2	HIP	253
6.3.3	LIN6	255
6.3.4	Six/One	256
6.3.5	MobilityFirst	257
6.4	NDN 对移动性的支持	262
6.4.1	NDN 对移动性支持的优势	262
6.4.2	NDN 支持移动性时仍存在的问题	263
6.4.3	NDN 的移动性支持方案	265
6.5	分布式移动性管理技术	269
6.5.1	分布式移动性管理的产生及发展	269
6.5.2	典型分布式移动性管理方案	271
	参考文献	275



第 7 章 其他典型未来网络体系	279
7.1 ChoiceNet	280
7.1.1 ChoiceNet 项目概述	280
7.1.2 支持用户选择的基本原则	281
7.1.3 ChoiceNet 互联网结构	282
7.2 播存网	285
7.2.1 播存网的特点	285
7.2.2 体系结构及其关键要素	286
7.3 XIA	287
7.3.1 XIA 设计理念	287
7.3.2 XIA 体系结构	288
7.3.3 XIA 实现机理	290
7.4 空天地一体化信息网络	291
7.4.1 概述	292
7.4.2 研究现状	293
7.4.3 体系结构	295
7.4.4 主要技术挑战	299
参考文献	301
第 8 章 未来网络试验床	305
8.1 未来网络试验床概述	306
8.2 未来网络试验床分类	307
8.2.1 基本分类	307
8.2.2 按试验要素分类	308
8.2.3 按服务模型分类	309
8.2.4 按网络元素分类	310
8.3 未来网络试验床关键技术	311
8.3.1 试验描述技术	311
8.3.2 控制框架技术	313
8.3.3 网络虚拟化技术	316
8.4 国外典型未来网络试验床	318
8.4.1 PlanetLab	319
8.4.2 GENI	322
8.4.3 FIRE	332



8.4.4	AKARI	334
8.4.5	Global X-Bone	336
8.4.6	Emulab	337
8.4.7	VINI	338
8.4.8	CORONET	340
8.4.9	CABO	341
8.4.10	FIRST	341
8.4.11	JGN	343
8.5	国内典型未来网络试验床	344
8.5.1	CNGI-CERNET2	344
8.5.2	NGB-3TNet	346
8.5.3	可重构柔性试验网	349
8.5.4	未来网络体系结构和创新环境	354
8.5.5	未来网络试验设施	356
8.6	小结	357
	参考文献	358
第 9 章	可重构可演进的网络功能创新平台开发实例	361
9.1	系统开发背景与需求分析	362
9.2	可重构可演进的网络功能创新平台总体方案	364
9.3	支持灵活编程的平台数据平面	365
9.3.1	软件设计方案	366
9.3.2	硬件设计方案	368
9.4	动态适配的平台控制平面	370
9.4.1	功能描述	371
9.4.2	拓扑维护和节点管理	372
9.4.3	跨域通信	377
9.4.4	负载均衡	380
9.4.5	主备切换	381
9.5	小结	381
	参考文献	382
	中英文对照	383
	名词索引	387



第 1 章

未来网络体系概述

首

先从网络创新的根本动力出发，介绍未来网络的基本概念和认识，然后分别从演进性路线和革命性路线讨论未来网络创新思路，之后从可扩展性、开放性、服务质量、安全性和可管理性等方面简要介绍未来网络当前的国内外研究现状、核心思路与技术，最后对未来网络发展的趋势进行探讨。



| 1.1 未来网络的提出 |

1.1.1 网络创新的根本动力——需求的发展

自互联网诞生以来，互联网具有的开放透明、结构分层和互通互联等特性使其遍布全球。可以说，互联网已成为现代信息社会的支柱。但是，“尽力而为”“一切基于 IP”和“瘦腰”结构（如图 1-1 所示）等“先天的基因缺陷”，使传统互联网在可扩展性、移动性、安全性、可管可控、绿色节能等方面存在很大不足，这些问题很难在现有结构下得到有效解决。另一方面，随着互联网与人类社会生活的深度融合，用户对互联网的使用需求已经从简单的端到端模式转变为对海量内容的获取，并发展出移动互联网、物联网、云计算等新的需求模式，现有的互联网难以有效满足这些需求^[1]。

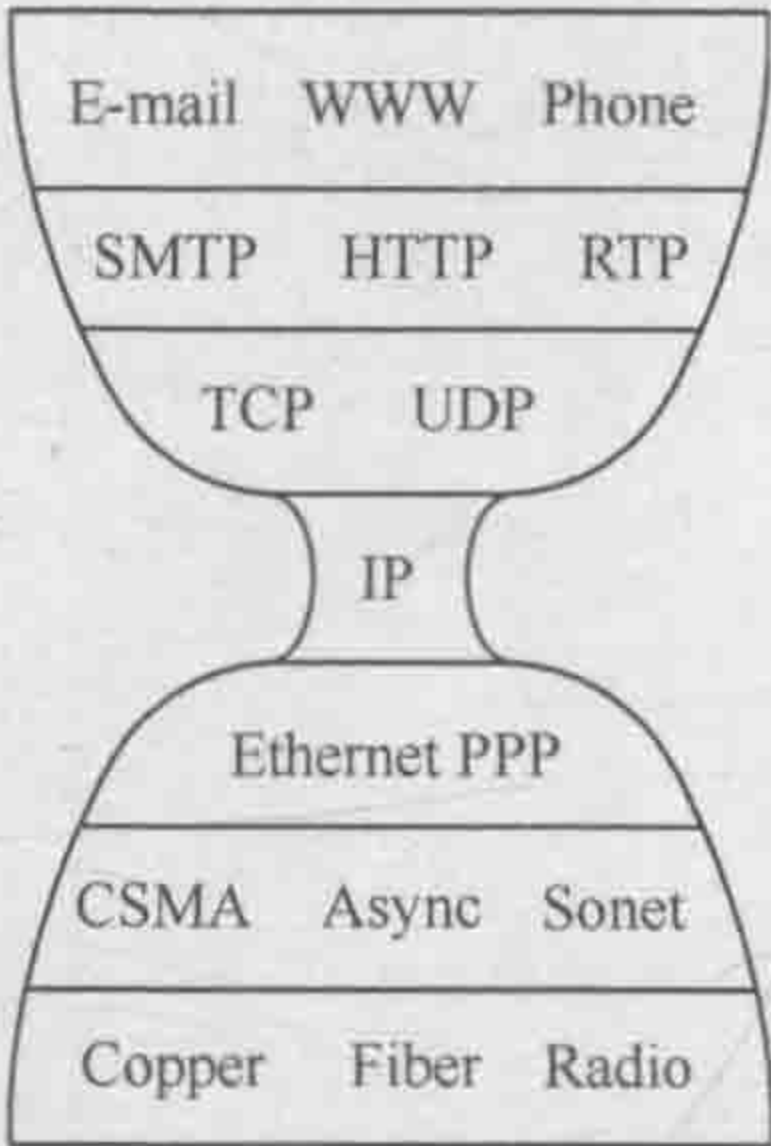


图 1-1 传统网络的“瘦腰”结构