

Communication  
Network Technology

现代通信网络技术丛书

# IPv6 技术、部署 与业务应用

- ◇ IPv4 地址耗尽，我们该怎么办？部署 IPv6！
- ◇ 来自电信运营商的第一手资料，参考价值高。
- ◇ 一线团队多年宝贵经验倾情奉献，实用性极强。
- ◇ 资深专家作序推荐，值得业界关注 IPv6 人士期待。

杨国良 李阳春 等 编著  
伍佑明

人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



现代通信网络技术丛书

Communication  
Network Technology

# IPv6 技术、部署 与业务应用

杨国良 李阳春 伍佑明 等 编著

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

IPv6技术、部署与业务应用 / 杨国良等编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2011. 6  
(现代通信网络技术丛书)  
ISBN 978-7-115-25222-7

I. ①I… II. ①杨… III. ①计算机网络—通信协议  
IV. ①TN915. 04

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第055444号

## 内 容 提 要

本书通过对 IPv4 和 IPv6 的比较分析加深读者对 IPv6 的理解, 从不同层面讲述 IPv4 和 IPv6 过渡和共存期间的策略和方案, 并以技术、网络部署和业务应用为线索进行讲解。全书分成 3 大部分: 第一部分讲述 IPv6 的技术基础, 主要包括 IPv6 的核心协议、路由技术、接入方式, 以及多播和移动 IP 等关键技术; 第二部分讲述在过渡期间的网络部署方案, 包括一些热点过渡技术、典型网络的过渡方案、网络支撑系统和终端的改造方案, 以及网络安全方面的考虑; 第三部分讲述 IPv6 对互联网应用的影响和相应的过渡策略, 包括 Web 服务、电子邮件等传统应用, 以及 IPTV 等新兴互联网应用。

本书内容全面, 注重工程实用性, 可供从事 IP 网络相关工作的工程技术人员和研发人员使用, 也可供高校计算机、通信、网络等专业的师生阅读参考。

现代通信网络技术丛书

### IPv6 技术、部署与业务应用

- 
- ◆ 编 著 杨国良 李阳春 伍佑明 等  
责任编辑 姚予疆  
执行编辑 刘 洋
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
三河市潮河印业有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 22.5  
字数: 551 千字 2011 年 6 月第 1 版  
印数: 1-3 500 册 2011 年 6 月河北第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-115-25222-7

定价: 65.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154





士、伍佑明、谭景华、黄灿灿、彭志劲、李小洋、陈琦、林晋彦、李伟波、汪来富等多名中国电信下一代互联网推进小组技术骨干联合编写。由于水平所限，书中难免有错误之处，请各位读者批评指正！

本书编辑邮箱：[liuyang@ptpress.com.cn](mailto:liuyang@ptpress.com.cn)。

作 者

# 目 录

## 第一部分 IPv6 基础

### 第 1 章 绪论 .....2

- 1.1 IPv4 的局限性 .....2
- 1.2 IPv6 的发展现状 .....5
- 1.3 互联网演进的困境 .....7

### 第 2 章 IPv6 基础协议 .....9

- 2.1 IPv6 框架 .....9
- 2.2 IPv6 编址 .....10
  - 2.2.1 地址表示方式 .....10
  - 2.2.2 地址空间和前缀 .....11
  - 2.2.3 地址分类 .....12
  - 2.2.4 单播地址 .....12
  - 2.2.5 任播地址 .....14
  - 2.2.6 多播地址 .....14
  - 2.2.7 特殊地址 .....15
- 2.3 IPv6 协议 .....16
  - 2.3.1 数据包格式 .....16
  - 2.3.2 扩展首部 .....17
- 2.4 ICMPv6 .....21
  - 2.4.1 协议概述 .....21
  - 2.4.2 错误消息 .....21
  - 2.4.3 信息消息 .....22
- 2.5 邻居发现协议 .....23
  - 2.5.1 数据包格式 .....23
  - 2.5.2 数据结构和算法 .....27
  - 2.5.3 前缀发现机制 .....27
  - 2.5.4 地址解析机制 .....28
  - 2.5.5 重复地址检测 .....29
  - 2.5.6 邻居不可达检测 .....29
  - 2.5.7 重定向机制 .....30
- 2.6 无状态地址自动配置 .....31
  - 2.6.1 地址状态 .....31

- 2.6.2 协议流程 .....32
- 2.7 DHCPv6 .....33
  - 2.7.1 数据包格式 .....33
  - 2.7.2 分配地址流程 .....34
  - 2.7.3 分配前缀流程 .....35

### 第 3 章 IPv6 接入方式 .....37

- 3.1 接入网络 .....37
  - 3.1.1 网络接入方式 .....38
  - 3.1.2 网络接入控制方式 .....39
- 3.2 PPPoE .....40
  - 3.2.1 PPPoE 链路建立过程 .....41
  - 3.2.2 IPv6CP 协议 .....44
  - 3.2.3 PPPoE 部署 .....45
- 3.3 IPoE .....49
  - 3.3.1 IPoE 接入过程 .....49
  - 3.3.2 IP Session .....51
  - 3.3.3 IPoE 部署 .....53
- 3.4 IPv6 接入方式综合部署 .....54

### 第 4 章 IPv6 路由协议 .....56

- 4.1 路由协议的演进 .....56
- 4.2 IGP 路由选择协议——OSPF .....58
  - 4.2.1 OSPF 概述 .....58
  - 4.2.2 OSPFv3 与 OSPFv2 的区别 .....59
- 4.3 IGP 路由选择协议——ISISv6 .....59
  - 4.3.1 ISIS 概述 .....59
  - 4.3.2 ISISv6 与 ISISv4 的区别 .....61
- 4.4 EGP 路由选择协议——BGP4+ .....63
  - 4.4.1 BGP 概述 .....63
  - 4.4.2 BGP4+与 BGP4 的区别 .....64

### 第 5 章 IPv6 多播技术 .....67

- 5.1 多播技术产生背景 .....67
  - 5.1.1 IP 多播历史 .....67

5.1.2 什么是多播	67	7.2.3 有状态 NAT64 协议转换技术	128
5.1.3 IP 多播的特点	68	7.2.4 无状态协议转换技术	131
5.1.4 多播技术应用	69	7.2.5 TRT 系统	136
5.2 多播技术原理、标准	69	7.2.6 Socks64	138
5.2.1 IP 多播地址结构	69	7.3 隧道技术	141
5.2.2 IPv6 多播 MAC 地址	70	7.3.1 6to4	143
5.2.3 IPv6 多播组管理协议	71	7.3.2 6over4	146
5.2.4 IPv6 多播路由协议	76	7.3.3 ISATAP	147
5.3 多播技术在 IPv6 与 IPv4 下的差异	77	7.3.4 GRE	150
5.3.1 IPv6 的优势	77	7.3.5 L2TP	151
5.3.2 IPv6 多播协议差异	77	7.3.6 6PE	155
5.4 多播技术的应用场景	77	7.3.7 6VPE	160
<b>第 6 章 移动 IPv6</b>	<b>80</b>	<b>第 8 章 IPv6 网络部署</b>	<b>162</b>
6.1 移动 IP 基础	80	8.1 过渡技术现状概述	162
6.1.1 移动 IP 技术产生的背景	80	8.1.1 IPv6 标准化概况	162
6.1.2 移动 IP 相关标准的发展	81	8.1.2 应用平台的 IPv6 支持程度	163
6.2 移动 IPv6 技术	82	8.1.3 网络设备对 IPv6 的支持能力	164
6.2.1 移动 IPv6 网络框架	82	8.1.4 IPv6 网络设备试用概况	165
6.2.2 移动 IPv6 消息格式	83	8.2 IPv6 过渡部署需求分析	165
6.2.3 移动 IPv6 工作机制	86	8.2.1 业界对 IPv6 过渡的态度	165
6.3 移动 IPv6 扩展	87	8.2.2 ISP 过渡业务选择	166
6.3.1 快速移动 IPv6	88	8.2.3 ISP 网络过渡需求分析	166
6.3.2 分级移动 IPv6	91	8.2.4 企业网过渡需求	168
6.3.3 快速分级移动 IPv6	94	8.3 ISP 骨干网部署	168
6.4 代理移动 IPv6	96	8.3.1 ISP 骨干网部署概述	168
6.4.1 代理移动 IPv6 网络框架	97	8.3.2 MPLS 骨干网部署	170
6.4.2 代理移动 IPv6 消息格式	97	8.3.3 IP 骨干网部署	186
6.4.3 代理移动 IPv6 工作机制	99	8.3.4 新建骨干网部署	191
6.5 移动 IPv6 优势	101	8.3.5 骨干网部署方案对比	195
<b>第二部分 IPv6 部署</b>		8.4 ISP 宽带接入部署	196
<b>第 7 章 IPv6 技术过渡</b>	<b>104</b>	8.4.1 宽带接入模型	196
7.1 双栈技术	104	8.4.2 IPv6 对 IPv4 的兼容性分析	199
7.1.1 DS-Lite	104	8.4.3 宽带接入部署总体方案	200
7.1.2 6RD	114	8.4.4 公网双栈过渡部署	202
7.2 翻译技术	119	8.4.5 私网双栈过渡部署	208
7.2.1 无状态 IP/ICMP 转换	119	8.4.6 DS-Lite 过渡部署	216
7.2.2 NAT-PT 技术	124	8.4.7 6RD 过渡部署	222
		8.4.8 认证溯源部署	225
		8.4.9 各种过渡方案的比较	236



8.5	ISP 移动宽带接入部署	237		
8.5.1	移动宽带接入模型	237		
8.5.2	移动宽带过渡部署需求	238		
8.5.3	移动宽带接入部署方案	239		
8.6	企业网过渡部署	241		
8.6.1	企业网模型	241		
8.6.2	企业网过渡部署方案	242		
8.6.3	企业网演进方案	245		
<b>第 9 章</b>	<b>IPv6 支撑系统过渡</b>	<b>246</b>		
9.1	网管系统过渡	246		
9.1.1	网络管理系统结构	246		
9.1.2	网络管理协议	247		
9.1.3	IPv6 网络管理	249		
9.1.4	网络管理系统过渡	250		
9.2	DNS 系统过渡	252		
9.2.1	DNS 工作原理	252		
9.2.2	IPv6 网络的 DNS	254		
9.2.3	DNS 系统过渡	255		
9.3	AAA 系统的过渡	256		
9.3.1	AAA 与 RADIUS	256		
9.3.2	IPv6 的 AAA	258		
9.3.3	AAA 系统过渡	260		
<b>第 10 章</b>	<b>IPv6 终端过渡</b>	<b>261</b>		
10.1	终端接入网络的现状	261		
10.1.1	宽带网络终端现状	261		
10.1.2	VPN 虚拟专用网现状	263		
10.1.3	各种操作系统对 IPv6 的支持	264		
10.2	IPv6 终端的过渡技术	267		
10.2.1	终端的双栈架构	267		
10.2.2	Bump-In-the-Stack (BIS)	269		
10.2.3	Bump-In-the-API (BIA)	272		
10.2.4	Teredo 隧道	274		
10.3	终端向 IPv6 迁移	277		
10.3.1	终端通过 PPPoE 连接到 IPv6 网络	277		
10.3.2	配置支持 IPv6 的操作系统	280		
10.3.3	应用程序的迁移	288		
<b>第 11 章</b>	<b>IPv6 网络安全</b>	<b>289</b>		
11.1	IPv6 网络安全技术	289		
11.1.1	IPv6 协议安全	289		
11.1.2	IPSec 协议及应用安全	291		
11.1.3	移动 IPv6 安全	295		
11.1.4	IPv6 协议安全小结	299		
11.2	IPv6 网络安全部署	300		
11.2.1	IPv6 骨干网安全	300		
11.2.2	边界网络安全	302		
11.2.3	内网安全部署	303		
11.2.4	DNS 系统安全	304		
11.2.5	应急响应机制完善	304		
11.3	IPv6 网络安全业务	305		
11.3.1	综述	305		
11.3.2	国外 IPv6 安全业务开展情况	306		
11.3.3	IPv6 安全业务	307		
<b>第三部分 IPv6 应用</b>				
<b>第 12 章</b>	<b>应用过渡</b>	<b>310</b>		
12.1	网页浏览	310		
12.1.1	IPv6 对网页浏览的影响	310		
12.1.2	网页浏览迁移方案	313		
12.2	电子邮件	316		
12.2.1	IPv6 对电子邮件的影响	316		
12.2.2	电子邮件迁移方案	318		
12.3	即时通信	318		
12.3.1	IPv6 对即时通信的影响	318		
12.3.2	即时通信迁移方案	320		
12.4	VoIP	320		
12.4.1	VoIP 业务概述	320		
12.4.2	VoIP 通信编码	322		
12.4.3	VoIP 业务现状	322		
12.4.4	VoIP 业务过渡	323		
12.5	IPTV	325		
12.5.1	IPTV 业务概述	325		
12.5.2	IPTV 系统构成	326		
12.5.3	IPTV 业务现状	329		

12.5.4 IPTV 业务过渡.....	329	12.7.1 物联网概述.....	340
12.6 3G.....	331	12.7.2 物联网引入 IPv6 的必要性.....	342
12.6.1 3G 概述.....	331	12.7.3 物联网 IPv6 技术进展.....	344
12.6.2 3GPP 的迁移.....	333	12.7.4 物联网 IPv6 引入策略.....	347
12.6.3 3GPP2 的迁移.....	337	<b>参考文献</b> .....	<b>349</b>
12.7 物联网.....	340		

# 第一部分

## IPv6 基础

- 第 1 章 绪论
- 第 2 章 IPv6 基础协议
- 第 3 章 IPv6 接入方式
- 第 4 章 IPv6 路由协议
- 第 5 章 IPv6 多播技术
- 第 6 章 移动 IPv6

---

---

---

---

# 第 1 章

## 绪论

自 1945 年第一台计算机诞生以来，计算机逐步渗透到生活的每个角落。随着计算机数量的增加和应用需求的不断提高，人们把多台计算机联成网络以发挥更大的效能，计算机网络因此而产生。20 世纪 60 年代是计算机网络的萌芽时期，科学工作者把远程计算机终端连接到计算机中心的大型计算机上，这就是最原始的计算机与计算机间的通信。20 世纪 70 年代是计算机网络的兴起时期，涌现了很多网络解决方案，如美国国防部高级研究计划局的 ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network)、IBM 公司的 SNA (System Network Architecture)、DEC 公司的 DNA (Digital Network Architecture) 和 Intel 公司的 INA (Intel Network Architecture)，但这些网络互不兼容。20 世纪 80 年代是计算机网络的发展和完善时期，美国国防部提出一种能把各种不同结构的计算机网络互联起来的网络协议——TCP/IP，并对 ARPANET 进行 TCP/IP 改造。后来美国科学基金会也采用 TCP/IP 构建了用于教学和科研的 NSFNET (National Science Foundation Network)，并最终和 ARPANET 互联，统称为互联网 (Internet)，这就是现代互联网的雏形。20 世纪 90 年代是互联网大发展的时期，美国率先提出了国家信息基础设施计划 (National Information Infrastructure, NII)，各国也纷纷提出自己的信息化计划，建设大型计算机网络，并接入互联网。进入 2000 年，互联网进一步宽带化，应用极大丰富，网络规模快速增长。

### 1.1 IPv4 的局限性

30 年前设计的 IP 协议 (Internet Protocol version 4, IPv4) 仍然是现代互联网的核心协议。虽然目前运行稳定，但已经暴露出很多不足之处，如扩展性问题、服务质量 (Quality of Service, QoS) 问题和安全性问题。

#### 1. 扩展问题

每个接入互联网的计算机和设备都需要一个唯一的 IPv4 地址作为标识。IPv4 地址空间为 32 位空间，可以提供大约 43 亿个 IPv4 地址。但在现今社会，几乎人人都离不开互联网，而且随着手机、汽车、家电等越来越智能化，接入到互联网的不仅仅是计算机，还有很多智能设备。IPv4 的 43 亿个地址空间在不久的将来显然是不够的。

除了 IPv4 地址不足直接影响互联网扩展外，IPv4 路由表日益增大对网络设备造成的压力也间接地影响了互联网的继续扩张。互联网中的每个自治域 (Autonomous System, AS)

都有自己的网段地址，因为难以做到提前规划，随着自治域自身的增长，地址的层次化结构被破坏，一个 AS 有多个网段地址，产生多条路由。目前互联网已经超过 3.7 万个 AS 和 35 万条路由。随着 IPv4 地址的日益紧缺，地址规划的结构性更差，路由条目更多，这对互联网骨干路由器来说是一个很大的压力，从而限制了互联网规模的进一步发展。

虽然导致 IPv4 路由表不断增大的原因很多，但 IPv4 地址不足是无法层次化规划的主要原因，所以 IPv4 扩展问题的主要根源还是 IPv4 的地址空间不够。

## 2. QoS 问题

视频/语音等实时通信应用对网络的时延、丢包、抖动和带宽有较高的要求。网络需要针对这些应用的特点予以特殊的服务质量保障。虽然 IPv4 设计之初已经考虑到 QoS 保障问题，而且通过后来的 DiffServ 等 QoS 解决方案为特定应用提供更好的时延、丢包、抖动和带宽方面的服务质量保障，但由于各种部署的复杂性，导致现在的互联网难以全面提供 QoS 服务。

## 3. 安全问题

在使用网上银行等关键应用时，用户需要对个人信息进行严格保密，但 IPv4 协议本身并没有考虑安全问题，目前主要通过 IPSec 等安全手段来实现信息加密。但互联网的安全问题不仅仅是一个技术问题，它需要从法律、管理、技术等多层面联合解决。

在 IPv4 存在的各种问题中，地址不足问题尤为严重，限制了互联网的规模扩张，也限制了互联网对物联网（Internet of Things）等新型应用的支撑，这是迫使互联网向下一代互联网（IPv6）演进的原动力。

## 4. IPv4 地址使用情况

全球 IP 地址由互联网号码分配机构（Internet Assigned Numbers Authority, IANA）统一管理和分配。IANA 下设 5 大区域网络注册机构（Regional Internet Registry, RIR），分别是非洲（AfrinIC）、亚太地区（APNIC）、北美（ARIN）、拉丁美洲（LACNIC）和欧亚地区（RIPE NCC），如图 1-1 所示。RIR 以会员制的模式运作，其会员是各国的国家网络注册机构（National Internet Registry, NIR），也可以是超大规模的网络运营商（Internet Service Provider, ISP）。NIR 一般也采取会员制，会员包括本地网络注册机构（Local Internet Registry, LIR）、ISP 和大型企业等。

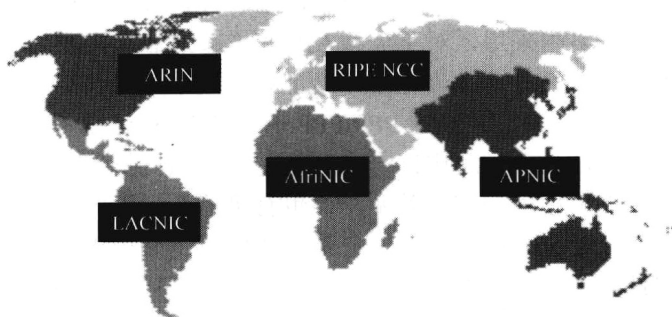


图 1-1 5 大 RIR 的管辖区域

一般来说，个人用户和企业用户的 IP 地址都是所接入 ISP 分配的，而 ISP 的地址则向 LIR 申请，LIR 再向 NIR 申请，NIR 向 RIR 申请，RIR 向 IANA 申请。一些较大的 ISP 可以直接向 NIR，甚至 RIR 申请 IP 地址。根据 APNIC 等 5 大 RIR 的规定，ISP 只能根据未来一

年的地址使用规划提出地址申请，并必须提供网络建设的证据，如网络设备购买合同等，旨在防止地址囤积。

2011年2月3日，IANA正式宣布其所有IPv4地址资源分配结束，各大RIR也于2011年4月15日分配完成。虽然IPv4地址枯竭是一个全球性问题，但由于各国发展历程不尽相同，IPv4地址枯竭对各国的冲击也不完全一样。因为互联网发源于美国，所以美国拥有最多的IPv4地址，人均拥有6.3个，中国拥有的IPv4地址虽然也有2.9亿个，全球排名第二，但人均拥有量只有0.64个，所以中国等发展中国家IPv4地址非常贫乏。另外，欧美互联网发展比较早，发达国家互联网渗透率非常高，已经接近饱和的缓慢发展期，所以IPv4地址增量需求不大。但中国目前的互联网渗透率只有32%，随着中国经济的腾飞，中国互联网用户快速增长，对新IPv4地址需求量很大。所以IPv4地址枯竭问题的重灾区主要集中在中国等发展中国家。各国的IPv4地址拥有情况如表1-1所示。

表 1-1 各国 IPv4 地址拥有情况

国 家	地 址 总 量	人均地址量	互联网渗透率
美国	15 亿	6.3 个	77%
中国	2.9 亿	0.64 个	32%
日本	1.8 亿	1.9 个	78%
韩国	1 亿	2.6 个	81%

## 5. 地址枯竭应对方案

20世纪90年代互联网兴起之时，人们已经意识到IPv4地址有枯竭的一天，所以早已未雨绸缪。目前应对IPv4地址枯竭的主要方法有：地址挖潜、私有地址和IPv6。

### (1) 地址挖潜

如果ISP或企业申请不到新的地址，只能通过对现有地址存量进行挖潜，努力提高IPv4地址的利用效率，挤出地址来应对新的业务需求。地址挖潜的手段分为管理手段和技术手段。运营商和企业申请到地址后，一般根据不同地域、业务或用户预分配地址块，但真正的业务发展和预测往往不完全一致，有些地方分配多了，造成浪费，有些地方分配少了，不够用。针对这种情况就需要采取管理手段，根据最新的业务发展情况修订原来的地址规划，对网络重新编址，把多余的地址挪到地址不够的地方。通过管理手段提高地址利用率是一个相当庞大的工程，一般在小型网络中采用，对于大型ISP实施起来非常困难。

地址挖潜的技术手段主要有动态分配用户地址和无类型域间路由(Classless Inter-Domain Routing, CIDR)等。很多大型ISP通过PPP/PPPoE或DHCP等技术手段为用户动态分配地址，用户每次上网都从地址池中临时申请一个地址，下网后就把地址释放回地址池给其他用户使用。这种方法可以提高地址的使用效率，但也有可能在繁忙时段用户因为申请不到地址而不能上网，所以动态分配中的地址量与用户量的比值设定必须根据用户上网习惯的历史数据慎重考虑。另一种技术手段是CIDR。RFC 791中定义了3种单播IPv4地址类型，分别是A、B、C类地址。A类地址的掩码为/8，B类地址掩码为/16，C类地址掩码为/24。由于这3类地址的掩码都比较短，如果严格按照RFC 791的规定，容易造成浪费，所以人们提出了CIDR概念。它支持任意长度的地址掩码，使ISP能够按需分配地址空间，提高了地址空间的利用率。目前几乎所有网络都采用CIDR技术，它能在一定程度上缓解地址紧张，但没有在本质上解决IPv4地址空间过小的问题。

### (2) 私有地址

IPv4 地址可以分为公有地址和私有地址。公有地址可以唯一标识一个网络设备，让其在全球范围内被寻址。目前大部分 ISP 都给用户分配公有地址。私有地址则只在内部网络使用。私有地址不需要向 RIR 等地址管理组织申请，可以从 10/8、172/20、192.168/24 这 3 段地址中选取。但因为没有统一管理，不同网络的私有地址互相重叠，所以私有地址在互联网上不可路由。私有地址终端访问外部互联网时，必须进行地址转换（Network Address Translator, NAT），把私有地址换成公有地址。通过 NAT 技术，多个用户可以共享一个公有地址，用户之间通过不同的 TCP/UDP 端口加以区分。NAT 技术已经提出多年，广泛应用于小型 ISP、企业网络和家庭网络中，主流的互联网应用都能在 NAT 环境下使用。

通过 NAT 技术，一个公有地址大约可以支持 100 个用户，理论上把 IPv4 地址空间扩大 100 倍，所以 ISP 在应对 IPv4 地址枯竭问题上，优先考虑私有地址方案。但是，NAT 本身固有的缺点注定它不可能成为一种长期有效的解决方案。首先，NAT 破坏了 IP 的端到端通信模型。NAT 后的私有地址用户在互联网上不可见。其次，NAT 容易产生单点故障。NAT 设备必须维护公、私地址的映射关系，一旦发生故障，即使快速路由到其他 NAT 设备，由于备用 NAT 设备没有原来 NAT 上的状态信息，因此所有会话连接都需要重新建立。还有，NAT 可能影响部分应用的使用。如 FTP、WINS 等通信报文中内嵌 IP 地址，但 NAT 并不转换报文内嵌地址，导致无法正常通信。最后，NAT 并不能在根本上解决所有地址短缺问题，当用户大量使用迅雷、Google Map 等消耗大量 TCP/UDP 端口资源的应用时，地址复用率迅速下降，地址压力又重新浮现。

### (3) IPv6

IPv6 是人们针对 IPv4 目前暴露出来的不足而重新设计的一套网络层协议，上层传输协议 TCP/UDP 没有改变。IPv6 的地址空间为 128 位，是 IPv4 地址空间的  $79 \times 10^{24}$  倍，有人戏称地球上每一粒沙子都可以有一个 IPv6 地址。其实 IPv4 地址空间与 IPv6 相比，就如一块小石头和地球相比一样，可见 IPv6 地址空间可以理解成无穷大。IPv6 可以从根本上解决 IPv4 地址不足的问题。同时 IPv6 在扩展性、QoS 以及安全性方面也相对 IPv4 进行了改进。

除了地址挖潜、私有地址和 IPv6 等解决方案以外，还有 IPv9 等其他较为超前的解决方案，但都因为难以形成产业链而未被业界所接受。目前业界基本认为，私有地址是最成熟和最简单的应对方法，但也是一个临时过渡方案，只有 IPv6 才能真正解决 IPv4 地址枯竭问题，是终极目标。可惜在 IPv6 开发之初，人们没有意识到 IPv4 会如此成功，没有正确评估网络升级换代的难度，所以 IPv6 并没有考虑与 IPv4 的兼容。这导致 IPv6 从提出到现在的十多年来，并没有得到很好的支持，也给网络和应用向 IPv6 过渡带来很多困难。本书就是围绕 IPv6 过渡问题展开讨论的。

## 1.2 IPv6 的发展现状

20 世纪 90 年代，人们已经意识到 IPv4 的局限性，并着手下一代互联网（IP Next Generation, IPng）的研究工作。互联网工程任务组（Internet Engineering Task Force, IETF）作为最权威的互联网标准组织，承担了下一代互联网相关技术规范的研发和制定工作。IETF 于 1993 年

成立了专门的 IPng 工作组, 1994 年提出下一代 IP 网络协议标准, 并正式定义为 IPv6 (Internet Protocol version 6), 1996 年发起全球 IPv6 试验床 (IPv6 Backbone, 6BONE), 1998 年进一步完善 IPv6, 成为今天看到的 IPv6 标准协议。1999 年成立 IPv6 论坛, 开始正式分配 IPv6 地址。自此 IPv6 开始了它漫长的完善和推广工作。

### 1. 各国 IPv6 的进展

初期 IPv6 主要由高校和科研机构推进, 政府扶持为主, 基本上没有真正意义上的商业应用。近期随着 IPv4 地址枯竭的预期日渐明确, 越来越多的商业组织参与其中。

#### (1) 美国

美国是互联网的发源地, 无论在地址资源和商业应用方面都占据了绝对优势, 不管是 IPv4 地址总量还是人均地址量都遥遥领先于其他国家, 可以说美国总体不存在地址不够的问题, 但这些地址都已经被老牌的科研机构和商业组织占据, 地址枯竭问题同样制约新进入的网络运营商。美国政府为了继续保持在互联网上的领先地位和推动国内互联网产业的长盛不衰, 同样非常重视下一代互联网的研发工作, 其中最主要的 3 个计划是白宫的下一代互联网倡议 (Next Generation Internet, NGI)、美国国家科学基金会的超高带宽网络服务 (very-high-performance Backbone Network Service, vBNS) 和高等院校与企业合作的 Internet2。美国政府在通过各种渠道资助下一代互联网研发的同时, 还积极推动 IPv6 的商用, 要求国防部、政府网络和主要的商业网站于 2008 年 6 月前支持 IPv6。目前美国在 IPv6 地址申请量上已经是全球第一, 像 Google 等大型网站已经可以提供 IPv6 的服务。

#### (2) 欧洲

欧洲互联网发展得比较早, 网络普及率很高, 用户增长缓慢, 地址压力不大, 但考虑到未来新型业务的潜在需求, 同样非常重视 IPv6 的研究和应用工作, 在 3G 标准研发之初就引入 IPv6, 希望利用移动通信方面的传统优势, 在下一代互联网时代改变互联网长期落后于美国的现状。欧盟已经提供超过 5 500 万欧元资助 GEANT2 等试验网络, 计划实现 25% 的企业、政府机构和家庭用户 IPv6 化。

#### (3) 亚洲

亚洲国家起步晚、人口多, 是 IP 地址最为匮乏的地区, 虽然拥有世界上最大的互联网用户群, 但又缺乏应有的话语权, 所以很多亚洲国家均视 IPv6 为新的机遇。目前亚洲国家中, 对 IPv6 报以极大热情的是中国、日本以及韩国。日本政府起步较早, 制定了“e-Japan”的战略, 大概在 2000 年左右开始分配 IPv6 地址, 2001—2005 年开始提供全日本的 IPv6 商用化服务。目前 NTT 拥有最大的 IPv6 商用网, 在全球范围内提供 IPv6 接入和数据中心业务。

韩国在战略、政策、立法、项目资助、国际合作等方面对 IPv6 都有相应的措施, 已经制订了 IPv6 的演进规划, 陆续投入 468 亿韩元支持 IPv6 产业的发展, 并在 2008 年建成 6 个 IPv6 交换中心。

中国是 IPv4 地址压力最大的国家之一, 所以政府早已对 IPv6 给予高度重视。从 1999 年开始, 建设 NSFCnet, 2003 年启动中国下一代互联网示范网 (CNGI) 工程, 建成全球最大的纯 IPv6 网络。

### 2. IPv6 标准进展

IPv6 标准工作主要由 IETF、宽带论坛 (Broadband Forum, BBF) 和国际电信联盟电信标准化部 (International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector,



ITU-T) 共同推动。IETF 主要负责 IPv6 技术协议的制定,相关的工作组共 12 个,其中 6man (IPv6 maintenance) 负责 IPv6 协议规范以及寻址架构的维护和完善, Behave (Behavior Engineering for Hindrance Avoidance) 关注 IPv4/IPv6 互通技术, Softwire 关注 IPv4 over IPv6 或 IPv6 over IPv4 的隧道机制, v6Ops (IPv6 Operations) 关注 IPv6 的网络部署, 另外还有 CSI (Cga & Send maIntenance)、DHC (Dynamic Host Configuration)、DNSEXT/DNSOPS (DNS Extensions/ Domain Name System Operations)、Mext (Mobility EXTensions for IPv6)、6lowpan (IPv6 over Low power WPAN)、SAVI (Source Address Validation Improvements)、Shim6 (Site Multihoming by IPv6 Intermediation) 等。至于 BBF 则关注 ISP 的具体需求, 重点研究 IPv6 接入解决方案。ITU-T 侧重于场景和需求的描述。另外 IPv6 论坛也是一个重要的 IPv6 组织, 专注于 IPv6 的部署和测试。

IPv6 寻址、路由等基础协议在 2000 年前后基本完成, 同时也提出一些网络/应用过渡技术, 如 NAT-PT (Network Address Translation-Protocol Translation) 等。但因为 IPv6 商用进展非常缓慢, 导致后面几年内 IPv6 标准工作停滞不前, 特别在 2007 年, NAT-PT 因为难以部署而被废止, IPv6 标准化工作陷入低潮。但从 2009 年开始, IPv4 地址枯竭问题真正受到各界的高度关注, IPv6 的标准工作又重新红火, 此时的工作焦点主要集中在 IPv4 向 IPv6 过渡的各种技术实现方案, 包括双栈、隧道和协议转换技术。在 2010 年 11 月的 IETF 79 次会议上, IPv6 已经成为大会最受关注的主题。

### 1.3 互联网演进的困境

IPv4 在过去的 30 年内取得非常大的成功, 网络规模从最初的几百台计算机发展到今天数以亿计的计算机。作为更为先进的 IP 协议, IPv6 标准从提出到现在已有十多年时间, 但 IPv6 的成就远不如 IPv4。目前 IPv6 的路由条目才 4 600 条, 相比 IPv4 的 35 万条可以说微不足道。

IPv4 迅速成功, 而且实现全球统一标准, 从某种程度上可以归功于互联网发展初期的非营利性。最初的互联网基本上定位于科研和教学, 不允许商业使用, 所以互联网研究工作者都把自己的研究成果无偿贡献出来。IETF 就是一个松散、自律和志愿的学术组织, 所有参加人员都只代表个人, 所以工作效率很高。但进入 2000 年以后, 互联网已经是一个非常重要的信息化渠道, 原来非营利的性质早已改变。目前互联网发展的推动者已经不是高校和科研机构, 而是成千上万的网络运营商, 他们都是以营利为目的。虽然 IPv6 很先进, 但目前绝大部分的信息源和用户都在 IPv4 上, 网络运营商没有建设 IPv6 网络的积极性。既然连 IPv6 网络都没有, 就不可能形成 IPv6 用户群。如果没有 IPv6 用户群, 应用开发商和信息生产商也不愿意开发 IPv6 的应用, 没有 IPv6 应用就更加没有 IPv6 用户群。这就是最为突出的网络演进死锁问题。打破死锁必须依靠外力, 政府就是破解这死锁的关键。只有政府引导网络运营商率先升级到 IPv6, 同时要求应用开发商逐步支持 IPv6, 慢慢把用户引导到 IPv6 上, 从而实现网络、应用和用户互相促进, 进入良性循环。

由于业务可持续发展的需要, 运营商必须寻找地址枯竭的应对方案。但新技术的先行者往往要付出更多的成本推动技术的成熟和产业链的形成。所以很多运营商不愿意在 IPv6 上作