

卓越工程师培养计划规划教材

IPv6网络

——基础、安全、过渡与部署

王相林 编著

 中国工信出版集团

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

卓越工程师培养计划规划教材

IPv6 网络—— 基础、安全、过渡与部署

王相林 编著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书在 IPv6 协议原理、技术基本知识的基础上, 围绕 IPv6 面临的安全问题、IPv6 推进中的过渡机制和 IPv6 网络建设的部署方案, 展开技术应用和实现方法的介绍。本书主要内容涵盖: IPv6 网络基础知识、IPv6 协议结构、地址结构、ICMPv6 和邻居发现协议、IPv6 路由、IPv6 安全机制、移动 IPv6 技术、IPv6 过渡技术、IPv6 网络配置实验、IPv6 部署, 也介绍了 IPv6 与相邻层协议、IPv6 网络协议栈应用等知识。本书突出分析和讨论了 IPv6 安全技术、过渡技术和 IPv6 网络部署。

全书内容层次分明, 考虑到作为教材使用, IPv6 基础知识部分涵盖前 8 章内容。书中突出 IPv6 推广过程中面临的安全、过渡与部署主要问题, 说明需要注意的事项并给出解决问题的思路和建议。书中内容理论与实验结合紧密, 实验部分包括 IPv6 网络协议栈应用和 IPv6 网络配置实验。

本书适合作为高等学校计算机科学与技术专业、网络工程专业和通信工程专业的本科生、研究生的教学用书, 也适合从事 IPv6 网络、下一代网络 (NGN) 研究和应用的 IT 专业人员阅读, 或需要学习 IPv6 网络知识的读者阅读。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

IPv6 网络: 基础、安全、过渡与部署 / 王相林编著. — 北京: 电子工业出版社, 2015.7

卓越工程师培养计划规划教材

ISBN 978-7-121-26548-8

I. ①I… II. ①王… III. ①互联网络—通信协议—教材 IV. ①TN915.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 149833 号

策划编辑: 戴晨辰

责任编辑: 郝黎明

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 19.5 字数: 500 千字

版 次: 2015 年 7 月第 1 版

印 次: 2015 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

前 言

IPv6 网络是下一代 Internet (NGI) 和下一代网络 (NGN) 的基础核心网络, 是未来信息社会的基础设施。IPv6 技术的提出是为了解决 IPv4 网络面临的诸多问题, 用 IPv6 网络取代 IPv4 网络已经成为业界的共识。随着网络应用范围的不断扩大, IPv6 网络安全问题日益凸显, IPv6 网络过渡对 IPv6 网络建设的推进至关重要, IPv6 网络部署应用的步伐正在加快。

在 IPv6 网络迅速推广、日益引起人们重视的今天, 人们要问的是, IPv6 网络离人们还有多远, 人们身边的 IPv6 技术在哪里, 人们什么时候才能使用 IPv6 网络。其实 IPv6 技术正在或已经融入了人们的生活, 国内外 IPv6 的推广和部署一直在紧锣密鼓地进行着, IPv6 网络就在人们的身边, 人们在计算机网络上发送和接收的信息, 此刻就在作为因特网主干网的 IPv6 网络上传输, 人们正在使用着 IPv6 技术。

从现有 IPv4 网络过渡到 IPv6 网络会面临一些困难, 因为从 IPv4 升级到 IPv6 涉及很多技术问题、商业问题, 甚至政治问题。中国在 IPv6 技术方面的研究起步晚于美国、日本和韩国等, 但是中国 Internet 和通信市场的巨大空间及前景, 都使中国的 IPv6 技术研究和应用, 有机会、有潜力成为未来 IPv6 产业化进程中举足轻重的一部分。

2010 年 3 月 11 日, 由清华大学与中国电信联合建立的“下一代互联网技术与应用联合实验室”正式揭牌, 中国电信计划于 2010 年开始在湖南、广东、江苏、浙江、四川和山东等省部署 20 余万 IPv6 宽带用户, 包括小区宽带、ADSL 及 Wi-Fi 接入。此外, 中国以教育科研领域为先锋, 拉开了 IPv6 试商用的序幕, 并明确要求国内 100 所知名高校的校园网在 2010 年底实现向 IPv6 网络的升级改造。

CERNET 和 CERNET2 是教育信息化的重要信息基础设施, 于 2013 年开始实施“三通两平台”网络保障工程。在 CERNET 2 建设推动下, 几十个教育科研重大应用实现了 IPv6 升级, 带动了上千个校园信息资源和应用系统 IPv6 升级, 在 100 多个 IPv6 校园网上提供了上千个 IPv6 信息资源与应用服务。可以看出, 人们迫切需要学习 IPv6 技术, 掌握 IPv6 网络的知识。

让读者对学习到的 IPv6 网络知识, 能够知其然, 更知其所以然, 明白所学、知道所用, 是编者编写本书的初衷。

本书在介绍 IPv6 协议原理、技术基本知识的基础上, 围绕 IPv6 面临的安全问题、IPv6 推进中的过渡机制和 IPv6 网络建设的部署方案, 展开技术应用和实现方法的介绍。其主要内容涵盖: IPv6 网络基础知识、IPv6 协议结构、地址结构、ICMPv6 和邻居发现协议、IPv6 路由、IPv6 安全机制、移动 IPv6 技术、IPv6 过渡技术、IPv6 网络配置实验、IPv6 部署; 也介绍了 IPv6 与相邻层协议、IPv6 网络协议栈应用等知识; 突出分析和讨论了 IPv6 网络安全、过渡与部署知识。

本书注重 IPv6 网络基础知识内容的介绍, 前 8 章内容为学习 IPv6 网络基本理论、技术提供了支持。第 9 章为 IPv6 网络协议栈应用, 涉及 Windows、Linux 应用环境中 IPv6 网络协议栈的配置方法, 以及 IPv6 网络命令的使用方法。第 10 章为 IPv6 技术配置实验, 涉及到 IPv6 网络基本实验、IPv6 网络路由器配置、IPv6 隧道基本配置、ISATAP 隧道配置、6to4 隧道配置、内网节点与外部 IPv6 网络节点的连接等, 实验内容与 IPv6 应用密切相关, 对读者学习 IPv6 网络基本配置方法、熟悉网络设备的 IPv6 配置要求, 掌握在自己的网络结点访问外部 IPv6 网络的结点的设置过程提供了帮助。第 11 章为 IPv6 部署, 涉及 IPv6 部署的推进过程, 以及升级现有 IPv4 网络支持 IPv6 应用的途径, 讲述在不同应用环境中部署 IPv6 网络的多种方案, 供读者在建设部署 IPv6 网络时参考。

全书内容层次分明,考虑到作为教材使用,IPv6 基础知识涵盖前 8 章内容,书中又突出了 IPv6 推广过程中面临的安全、过渡与部署的主要问题,说明需要注意的事项并给出解决问题的思路和建议。书中内容理论与实验结合紧密,实验部分包括 IPv6 网络协议栈应用和 IPv6 网络配置实验,涵盖第 9 章和第 10 章。

许多计算机网络知识的学习是触类旁通的,这些章节内容的安排,目的是让读者通过阅读,知道 IPv6 技术的由来、IPv6 网络在哪里、IPv6 网络怎样配置、怎样使用 IPv6 网络,进一步加深对 IPv6 网络安全、过渡和部署方面的理论、技术和实现方法的理解,为今后进行 IPv6 网络学习、推进 IPv6 网络部署、建设 IPv6 网络和应用 IPv6 网络打下基础。

写作内容结合教学和科研实践,突出 IPv6 安全技术、过渡技术与 IPv6 网络部署的主要内容,注重 IPv6 网络理论、技术与应用的融合,使读者容易理解 IPv6 网络安全、过渡与部署中面临的主要问题。

引导读者从动手实践层面理解 IPv6 网络协议栈和网络设备配置方法,学习实现 IPv6 网络安全面临的问题和采用的主要防御技术,掌握从 IPv4 网络向 IPv6 网络过渡阶段中采用的主要方法,学习怎样针对不同网络应用采用相应的 IPv6 网络部署方案。

本书在编写内容、编写形式方面做了以下尝试。

1) IPv6 网络知识讲述循序渐进、层次清晰,力求讲清楚 IPv6 网络基本理论知识的来龙去脉。内容涵盖 IPv6 网络基础知识、理论、安全、过渡和部署主要内容,注重对 IPv6 网络深层次内容的介绍。

2) 透彻分析 IPv6 安全、过渡与部署三个主题,给出解决 IPv6 安全、过渡与部署面临问题的思路和途径,可以使对 IPv4 网络比较熟悉,又对 IPv6 网络有一定了解的读者看到 IPv6 网络的广阔性和多样性。

3) 引导读者循序渐进地了解 and 掌握 IPv6 基本知识,说明从 IPv4 网络向 IPv6 网络过渡中,在理论、应用和工程方面需要注意的问题。

4) 注重理论与实践的融合,突出 IPv6 网络协议栈应用,通过 IPv6 网络实验配置实例,使读者较快熟悉和掌握 IPv6 网络配置、连接和使用方法,尽快体验到 IPv6 网络带来的便捷和高效。

本书由王相林编著。王景丽、朱晨、沈清姿、刘立朋、陈国峰、江宜为、王慧娟、卢庆菲、李蓓蕾、何晓龙、李明月、孙冬梅、王志华参与了书稿编写工作,这里一并向他们表示感谢。

本书得到了国家自然科学基金(No.61172133, No.61273075, No.61333011)的资助。

本书适合作为高等学校计算机科学与技术专业、网络工程专业和通信工程专业的本科生、研究生的教学用书,也适合从事 IPv6 网络、下一代网络(NGN)研究和应用的 IT 专业人员阅读,或需要学习 IPv6 网络知识的读者阅读。

由于 IPv6 网络在安全、过渡与部署诸多方面面临许多问题,IPv6 技术正处在发展过程中,书中难免存在疏漏,不妥之处请读者批评指正,在此向阅读和使用本书的读者表示感谢。作者的电子邮件地址为 wangedu@163.com。

作者
于杭州

目 录

第 1 章 IPv6 基础知识	1	2.2.6 封装安全荷载扩展首部	40
1.1 计算机网络基本知识	1	2.2.7 目的选项扩展首部	41
1.1.1 计算机网络概述	1	2.2.8 IPv6 扩展首部与 IPv4 选项的 比较	42
1.1.2 计算机网络和计算机网络体系 结构	4	2.3 IPv6 协议与相邻层协议的关系	43
1.1.3 当代计算机网络体系结构	6	2.3.1 高层协议使用的一些规则和上层 校验和计算	43
1.1.4 网络协议层次与网络拓扑中网络 结点的对应位置	7	2.3.2 IPv6 协议与底层网络协议	44
1.1.5 计算机网络协议	8	2.3.3 IPv6 与链路层 MTU	44
1.1.6 常用的计算机网络体系结构	9	2.3.4 底层网络对 IPv6 协议的封装	45
1.1.7 计算机网络中的寻址	11	2.3.5 IPv6CP 的配置选项	45
1.1.8 计算机网络中层次和协议的 绑定	12	2.3.6 IPv6 与帧中继	46
1.2 IPv6 协议的研究历程	14	2.4 思考练习题	47
1.2.1 IPv4 协议需要改进的原因	14	第 3 章 IPv6 地址结构	48
1.2.2 IPv6 协议的研究过程	15	3.1 IPv6 地址技术	48
1.2.3 IPv6 协议的制定过程	16	3.1.1 IPv6 地址标识方法	48
1.2.4 IPv6 协议的主要特征	17	3.1.2 IPv6 前缀和 IPv6 地址空间	49
1.2.5 IPv4 协议与 IPv6 协议的主要差异	18	3.1.3 IPv6 地址分配机构及所分配的 前缀位数	50
1.3 IPv6 标准化工作和协议分析工具	19	3.2 IPv6 地址分类	51
1.3.1 标准制定组织	19	3.2.1 IPv6 地址分类概述	51
1.3.2 IPv6 标准化进程	19	3.2.2 取消广播地址的原因	51
1.3.3 网络协议分析工具	20	3.2.3 IPv6 地址的一般格式	52
1.4 思考练习题	23	3.3 IPv6 单播地址	52
第 2 章 IPv6 协议首部结构	25	3.3.1 IPv6 单播地址概述	52
2.1 IPv6 协议数据单元的结构	25	3.3.2 可汇聚全球单播地址	53
2.1.1 IPv6 协议数据单元	25	3.3.3 链路本地地址	55
2.1.2 IPv6 协议与 IPv4 协议的比较	27	3.3.4 站点本地地址	56
2.2 IPv6 协议的扩展首部	31	3.3.5 6to4 地址和 ISATAP 地址	57
2.2.1 IPv6 协议扩展首部概述	31	3.4 IPv6 多播地址	58
2.2.2 逐跳选项扩展首部	32	3.4.1 IPv6 多播地址格式	58
2.2.3 路由扩展首部	35	3.4.2 请求结点多播地址	59
2.2.4 分段扩展首部	37	3.4.3 IPv6 多播地址映射为 Ethernet 地址	59
2.2.5 身份认证扩展首部	39		

3.5 IPv6 任播地址	60	4.3.2 分组过大报文和超时报文	80
3.5.1 任播地址的特点	60	4.3.3 参数问题报文	80
3.5.2 任播地址的格式	61	4.4 ICMPv6 查询报文	81
3.6 IPv6 特殊地址	62	4.4.1 回声请求报文	81
3.6.1 未指定地址和回环地址	62	4.4.2 回声应答报文	81
3.6.2 IPv4 兼容或 IPv4 映射的 IPv6 地址	62	4.5 多播监听发现协议	82
3.6.3 IPv4 与 IPv6 地址的比较	63	4.5.1 多播监听发现协议定义	82
3.6.4 主机 IPv6 地址和路由器 IPv6 地址	63	4.5.2 多播监听发现报文	82
3.7 IPv6 地址配置技术	64	4.5.3 多播监听查询报文	83
3.7.1 IPv6 地址配置	64	4.5.4 多播监听报告报文和完成报文	84
3.7.2 地址手工配置和检测	65	4.6 IPv6 邻居发现协议	86
3.8 IPv6 地址无状态自动配置	65	4.6.1 邻居发现协议概述	86
3.8.1 IPv6 地址无状态自动配置的特征	65	4.6.2 邻居发现协议的主要用途	87
3.8.2 IPv6 主机地址自动配置过程	66	4.6.3 邻居缓存和目的地缓存	88
3.8.3 Windows 支持的地址自动配置	66	4.7 邻居发现协议报文格式及选项	89
3.9 IPv6 地址有状态自动配置		4.7.1 邻居发现协议报文格式	89
DHCPv6	68	4.7.2 邻居发现协议的选项	89
3.9.1 DHCPv6 的作用和工作模式	68	4.8 IPv6 邻居发现协议报文	92
3.9.2 DHCPv6 标准	69	4.8.1 路由器请求和路由器通告报文	92
3.9.3 DHCPv6 报文格式	70	4.8.2 邻居请求和邻居通告报文	94
3.10 IPv6 域名系统	71	4.9 IPv6 重定向协议	96
3.10.1 IPv6 域名系统的实现	71	4.9.1 重定向技术	96
3.10.2 IPv6 域名地址的解析	72	4.9.2 ICMPv6 重定向报文	97
3.10.3 自动发现 DNS 服务器和自动域名更新	72	4.10 IPv6 地址解析技术分析	97
3.11 思考练习题	73	4.10.1 主机的数据结构	97
第 4 章 ICMPv6 协议和邻居发现协议	75	4.10.2 IPv6 地址解析	98
4.1 ICMPv6 协议概述	75	4.10.3 主机数据包的发送算法	99
4.1.1 ICMPv6 协议的功用	75	4.10.4 邻居可达性检测	100
4.1.2 ICMPv6 对 ICMPv4 的改进	75	4.10.5 路由器和前缀发现	100
4.1.3 ICMPv6 报文的类型和组成	76	4.10.6 邻居发现协议与 ARP 协议的比较	101
4.2 ICMPv6 协议格式	77	4.10.7 邻居发现协议的改进	102
4.2.1 ICMPv6 报文的一般格式和处理规则	77	4.11 思考练习题	103
4.2.2 ICMPv6 报文的类型	78	第 5 章 IPv6 路由协议	105
4.3 ICMPv6 差错报文	79	5.1 RIPng 协议	105
4.3.1 目的地不可达报文	79	5.1.1 RIPng 协议概述	105
		5.1.2 RIPng 路由更新的规则	106
		5.1.3 RIPng 报文格式	107
		5.1.4 RIPng 下一跳实现和默认路由	108
		5.2 OSPFv3 协议	109

5.2.1	IPv6 OSPFv3 概述	109	6.2.1	IPSec 协议概述	140
5.2.2	IPv6 的 OSPFv3 报文格式	110	6.2.2	IPSec 体系结构	142
5.2.3	OSPFv3 的 Hello 报文	111	6.2.3	IPsec 安全关联	143
5.2.4	OSPFv3 数据库描述报文	113	6.2.4	IPSec 操作模式	144
5.2.5	OSPFv3 链路状态请求、更新和 确认报文	114	6.2.5	IPSec 模块对 IP 分组的处理	146
5.3	OSPFv3 链路状态通告	115	6.2.6	IPSec 部署	147
5.3.1	概述	115	6.2.7	IPSec 存在问题分析	149
5.3.2	路由器 LSA	118	6.3	IPv6 中的认证	150
5.3.3	网络 LSA	119	6.3.1	IPSec 安全协议认证首部	150
5.3.4	区域间前缀 LSA 和区域间 路由器 LSA	120	6.3.2	IPv6 认证过程	151
5.3.5	自治系统外部 LSA	121	6.3.3	IPv6 认证模式	152
5.3.6	链路 LSA	122	6.4	IPv6 中的加密	153
5.3.7	区域内前缀 LSA	122	6.4.1	IPSec 安全协议 ESP	153
5.4	OSPFv3 技术分析	123	6.4.2	IPv6 中的加密模式	154
5.4.1	指定路由器和备份指定路 由器	123	6.5	密钥交换协议	155
5.4.2	LSA 洪泛	124	6.5.1	密钥交换协议概述	155
5.5	IPv6 的 BGP4+协议	125	6.5.2	3 种密钥交换协议	156
5.5.1	BGP4+协议	125	6.5.3	IKE 使用的属性和 IKE 的 实现	159
5.5.2	BGP4+协议选路过程	126	6.5.4	基于公钥基础设施的密钥 方案	160
5.6	BGP4+报文结构	127	6.6	邻居请求和邻居通告欺骗攻击	161
5.6.1	BGP4+报文首部	127	6.6.1	邻居缓存欺骗攻击	161
5.6.2	OPEN 报文	127	6.6.2	邻居不可达检测攻击	162
5.6.3	UPDATE 报文	129	6.6.3	重复地址检测攻击	163
5.6.4	BGP4+路径属性	130	6.6.4	邻居请求和邻居通告欺骗攻击 防御	164
5.6.5	通知报文和生命期报文	131	6.7	路由通告和多播欺骗攻击	165
5.7	BGP4+多协议可达机制	132	6.7.1	虚假路由通告	165
5.7.1	多协议可达 NLRI	132	6.7.2	多播的安全问题	166
5.7.2	多协议不可达 NLRI	134	6.7.3	针对路由通告及多播欺骗攻击 防御	167
5.8	思考练习题	134	6.8	思考练习题	168
第 6 章	IPv6 安全机制	136	第 7 章	移动 IPv6 技术	169
6.1	IPv6 安全技术	136	7.1	移动 IPv6 概述	169
6.1.1	IPv6 面临的安全问题	136	7.1.1	移动 IP 的基本概念	169
6.1.2	IPv6 协议在网络安全上的 改进	137	7.1.2	移动结点的功能	169
6.1.3	IPv6 协议存在的网络安全 问题	138	7.2	移动 IPv6 的组成和特征	170
6.2	IPSec 协议	140	7.2.1	移动 IPv6 的组成和技术要求	170
			7.2.2	移动 IPv6 工作原理	171

7.2.3	移动 IPv6 的基本操作	172
7.3	移动 IPv6 新增内容	173
7.3.1	移动 IPv6 增加的新协议及内容	173
7.3.2	移动 IPv6 与移动 IPv4 的比较	174
7.4	移动 IPv6 报文和选项格式	176
7.4.1	移动报文首部格式	176
7.4.2	绑定更新请求报文和家乡测试初始报文	177
7.4.3	转交测试初始报文、家乡测试报文和转交测试报文	178
7.4.4	绑定更新报文、绑定确认报文和绑定错误报文	180
7.5	移动选项	182
7.5.1	移动选项格式	182
7.5.2	绑定更新建议、备用转交地址和随机数索引选项	183
7.5.3	绑定授权数据选项	184
7.6	家乡地址选项和第 2 类路由首部	184
7.6.1	家乡地址选项	184
7.6.2	第 2 类路由扩展首部	185
7.7	移动 IPv6 对 ICMPv6 的扩展	186
7.7.1	ICMPv6 家乡代理地址发现请求报文和应答报文	186
7.7.2	ICMPv6 移动前缀请求报文和通告报文	187
7.8	用于移动 IPv6 的邻居发现协议	188
7.8.1	移动扩展路由器通告报文和增加路由标志位的前缀信息选项	188
7.8.2	新的通告时间间隔选项和家乡代理信息选项	189
7.9	移动 IPv6 的通信	190
7.9.1	移动结点与通信对端结点之间的通信	190
7.9.2	移动结点与家乡代理之间的通信	191
7.10	移动 IPv6 网络管理	192
7.10.1	IPv6 网络管理技术	192
7.10.2	移动 IPv6 网络管理技术	193

7.11	思考练习题	194
第 8 章	IPv6 过渡技术	195
8.1	IPv6 过渡技术概述	195
8.1.1	推动 IPv6 过渡的措施	196
8.1.2	IPv6 技术过渡的一些原则	196
8.1.3	IPv6 过渡技术研究现状	197
8.1.4	过渡时期采用的主要技术	198
8.2	双栈技术	198
8.2.1	双栈技术工作原理	198
8.2.2	双栈技术的组网结构	199
8.3	隧道技术	200
8.3.1	隧道技术的工作原理	200
8.3.2	隧道技术机制分析	201
8.3.3	IPv6 配置隧道	202
8.3.4	IPv6 自动隧道	203
8.3.5	6to4 隧道	204
8.3.6	ISATAP 隧道	205
8.3.7	ISATAP 隧道配置机制	206
8.4	协议转换技术	209
8.4.1	协议转换技术概述	209
8.4.2	NAT 和 NATP	210
8.4.3	NAT-PT	211
8.4.4	SIIT 转换机制	211
8.4.5	BIS、SOCKS64、BIA 转换机制	212
8.5	IVI 转换技术	213
8.5.1	IVI 转换技术概述	213
8.5.2	IVI 地址格式	214
8.5.3	IVI 路由	214
8.5.4	IVI 工作原理	214
8.6	IPv4 与 IPv6 协议之间的转换	216
8.6.1	IPv4 协议转换为 IPv6 协议	216
8.6.2	IPv4 协议首部到 IPv6 协议首部的转换	217
8.6.3	ICMPv4 协议转换至 ICMPv6 协议	219
8.7	过渡技术分析比较	221
8.7.1	几种转换技术的比较	221
8.7.2	如何选择合适的过渡机制	222
8.8	思考练习题	223

第 9 章 IPv6 网络协议栈应用	225	10.4 IPv6 网络隧道技术配置实验设计和实验环境搭建	252
9.1 IPv6 协议栈安装	225	10.4.1 IPv6 网络隧道技术配置实验设计	252
9.1.1 Windows 环境中 IPv6 协议栈配置	225	10.4.2 IPv6 网络隧道技术配置实验环境搭建	254
9.1.2 Linux 环境中 IPv6 协议栈配置	226	10.5 路由器到路由器的配置隧道的实现及分析	255
9.1.3 IPv6 地址查看和 IPv6 连通性测试	228	10.5.1 网络拓扑和实验设计思路	255
9.2 IPv6 协议配置命令和 IPv6 ISATAP 配置	230	10.5.2 路由器到路由器的配置隧道实验配置过程	255
9.2.1 IPv6 网络配置命令行工具 netsh	230	10.5.3 路由器到路由器的配置测试过程及分析	260
9.2.2 常用 IPv6 命令格式及功用	231	10.6 主机到路由器和路由器到主机的配置隧道的实现和分析	260
9.2.3 IPv6 命令与等价的 netsh 命令	234	10.6.1 网络拓扑和实验设计说明	260
9.2.4 IPv6 ISATAP 配置	235	10.6.2 主机到路由器和路由器到主机的配置隧道的实验配置过程	261
9.3 思考练习题	236	10.7 6to4 隧道的实现及分析	264
第 10 章 IPv6 技术配置实验	238	10.7.1 路由器到路由器的 6to4 隧道实验拓扑及设计思路	264
10.1 IPv6 网络基本实验	238	10.7.2 路由器到路由器的 6to4 隧道配置过程	265
10.1.1 Windows 环境 IPv6 网络实验	238	10.7.3 路由器到路由器的 6to4 隧道配置测试分析	268
10.1.2 IPv6 网络路由器的静态路由配置	240	10.8 主机到路由器和路由器到主机的 ISATAP 隧道的实现及分析	269
10.1.3 IPv6 动态路由 RIPng 配置	243	10.8.1 网络拓扑和实验设计说明	269
10.1.4 IPv6 动态路由 OSPFv3 配置	244	10.8.2 实验和配置步骤	269
10.2 连接外部 IPv6 网络结点的实验	246	10.8.3 主机到路由器的 ISATAP 隧道测试过程分析	273
10.2.1 配置设计与网络实验拓扑	246	10.9 思考练习题	273
10.2.2 网络设备和网络接口配置过程	247	第 11 章 IPv6 部署	275
10.2.3 内部网络 IPv6 主机与外部网络 IPv6 结点的连接测试	248	11.1 IPv6 技术部署	275
10.2.4 实验室 Windows 主机使用浏览器访问外部 IPv6 站点	249	11.1.1 IPv6 网络就在人们身边	275
10.3 因特网主机访问 IPv6 网络中的结点	250	11.1.2 IPv6 技术推广面临的问题	275
10.3.1 连接因特网 ISATAP 路由器实验设计和网络拓扑	250	11.1.3 IPv6 在国外的部署	276
10.3.2 网络设备和接口配置过程	250	11.1.4 IPv6 在国内的部署	277
10.3.3 测试公网 IP 地址主机与外部 IPv6 网络的连接	251	11.1.5 CNGI-CERNET 2	278
		11.1.6 中国发展 IPv6 技术的原因	279

11.1.7 IPv6 成为下一代网络的核心 技术	279	11.3.4 远端 IPv6 结点接入网络的 部署	286
11.1.8 采用 IPv6 核心技术实现的商业 价值	280	11.3.5 基于 IPv6 的广域网组网 部署	287
11.2 IPv6 部署中的关键要素	280	11.3.6 中型企业 IPv6 网络部署	288
11.2.1 IPv6 部署应采取的原则和 步骤	280	11.3.7 跨越广域网的 IPv6 连接	289
11.2.2 IPv6 地址规划和路由规划	281	11.3.8 基于 IPv6 的园区无线网络 部署	289
11.2.3 IPv6 网络安全部署要素	282	11.3.9 提供 IPv6 连接的校园网络 部署	290
11.2.4 IPv6 网络 QoS 和网管的 部署	283	11.3.10 运营商 IPv6 过渡阶段部署	290
11.2.5 IPv6 网络部署能够带来什么	284	11.3.11 路由模式的家庭用户 IPv6 接入	291
11.3 IPv6 网络部署方案	284	11.4 思考练习题	292
11.3.1 IPv6 部署的推进过程	284	附录 英文缩写词	293
11.3.2 升级现有 IPv4 网络支持 IPv6 应用	285	参考文献	301
11.3.3 新建 IPv6 网络的部署	286		

第 1 章 IPv6 基础知识

1.1 计算机网络基本知识

1.1.1 计算机网络概述

1. 计算机网络的发展阶段

计算机网络在 20 世纪 50 年代末出现，经历了 4 个发展阶段，这 4 个阶段如下：联机终端网络、计算机-计算机网络、遵循开放式系统互连的网络、因特网（Internet）。

计算机网络发展的 4 个阶段的时间和特征如表 1-1 所示。

表 1-1 计算机网络发展的 4 个阶段的时间和特征

阶段	时间	名称	特征	典型应用
1	1950~1960 初	联机终端网络	主机一个，终端多个	气象数据传输
2	1962~1969	计算机-计算机网络	主机多个，两级子网，层次协议	ARPANet
3	1974	开放式系统互连网络	开放的计算机网络体系结构框架	OSI
4	1990	因特网	网络的网络，信息社会基础设施	Internet、Intranet

随着计算机和计算机网络的出现，人类社会走向信息社会，计算机网络已经构成信息社会的基础设施，经过多年持续的计算机网络技术研究、开发和应用推广，计算机网络已经渗入人类社会的各个领域，正在影响着人们的生活、学习、工作的方式。计算机网络与人类社会发展的联系越来越紧密，计算机和计算机网络已经无处不在。

计算机网络正在深刻影响着人类社会发展的进程，计算机网络形成了一种新的文化，使得人类冲破了空间和时间的限制，可以把时间和空间缩小到最小，人类居住的地球变成了地球村。整个人类世界被有线、无线网络包围，携带着信息资源的计算机网络协议数据单元（Protocol Data Unit, PDU），如 IP 分组（协议包）正在迎面扑来，虚拟世界与现实世界的信息流互相映射联系，呈现出绚丽的画卷。

因特网的出现，改变了信息社会的结构，网络应用开始普及。因特网改变了人们生活和工作的习惯，为人们的出行、获取知识和医疗等提供了方便，同时正在提高人类的生存质量。

2. Internet 发展过程中的里程碑技术

因特网是由 ARPANet 演变来的，1958 年 1 月，美国政府设立了一个专门从事高科技方面的研究机构，称为高级研究规划局（Advanced Research Projects Agency, ARPA）。ARPA 的主要研究方向是信息处理，为此专门成立了一个部门，称为信息处理技术办公室（Information Processing Technology Office, IPTO）。

IPTO 的第一任主任是利克莱德，它最有影响的思想是对未来计算机网络的描述，当时他认为在 10~15 年的时间内，将会有一种计算机网络。世界上所有的计算机联为一体，任何人都可以使用地理上很遥远的计算机，获取任何计算机中的数据，利克莱德把这种计算机网络称为“思维中心”，它

就像一个巨大的图书馆，但比图书馆的功能强得多，而全世界有很多这种中心，用通信线路互相连接。它们可以互相共享资源，平衡工作负载，为全世界的用户服务。可以说，利克莱德提出了 Internet 的思想。

在上述问题的解决和研究过程中，产生的 Internet 的核心技术有协议分层、协议封装、分组交换、网关、以太网、路由器和 TCP/IP 协议。

1974 年 12 月，Cerf 和 Kahn 的第一份 TCP/IP 协议详细说明在《IEEE 通信技术汇刊》正式发表。当时美国国防部与三个科学家小组签订了制定 TCP/IP 协议标准的合同，但由 Cerf 和 Kahn 领衔的小组，首先制定出了通过详细定义的 TCP/IP 协议标准。

TCP/IP 协议标准中阐述了协议封装、分组、网关等概念，提出把网络纠错的位置从接口报文处理机（Interface Message Processor, IMP）转移到对端主机上，使通信子网尽可能简单的思想。

1974 年，Cerf 等人在 RFC 675 中第一次使用 Internet 替代了 Internetwork。

3. ARPANet 演变为 Internet

为了实现异种计算机的互连，1974 年在 ARPANet 上实现了 TCP/IP 协议，进入 20 世纪 80 年代以后，许多 LAN（局域网）连接到 ARPANet，1980 年 ARPANet 转向 TCP/IP 协议研究，1983 年 1 月 TCP/IP 协议成为 ARPANet 正式协议，1983 年 ARPANet 的军用部分分离出来组成 MILNet。1990 年 ARPANet 演变为 Internet，和 NSFNet 一起构成 Internet 的主干，ARPANet 完成历史使命后退出使用。

TCP/IP 协议成为 Internet 的语言，正是由于 TCP/IP 协议，才有了今天“地球村”Internet 的巨大发展。如今计算机连接 Internet 都要进行 TCP/IP 协议的设置，TCP/IP 协议成为当今地球村“人与人”之间的“牵手协议”。

4. Internet 的基础结构

Internet 的基础结构经历了 3 个阶段的推进。

1) 第一阶段是从单个 ARPANet 向 Internet 发展的过程，主要是 TCP/IP 协议的研制与应用，互连异种计算机、异种计算机网络，到 1983 年至 1984 年 Internet 已经形成。

2) 第二阶段是三级 Internet 结构的组建，1985 年起，美国国家科学基金会（NSF）围绕 6 个大型计算机中心建设计算机网络，1986 年 NSF 建成国家科学基金网（NSFNet），NSFNet 是一个三级结构的网络，由主干网、地区网和校园网组成，覆盖了美国主要的大学和研究机构。1991 年，Internet 扩大使用范围，世界上的许多公司开始纷纷接入 Internet，Internet 中信息量迅速膨胀，Internet 的容量已经满足不了需要，美国政府决定将 Internet 主干网交给私人公司经营，1993 年主干网速率提高到 45Mb/s（T3 速率）。

3) 第三阶段为多级结构 Internet，从 1993 年开始 NSFNet 逐渐被若干个商用的主干网替代，这些主干网也称为服务提供者网络（Service Provider Network, SPN）。用户可以通过 Internet 服务提供商（Internet Service Provider, ISP）接入 Internet。从 1994 年起，Internet 逐渐演变为多级网络结构，今天已经很难对 Internet 的结构给出细致的描述，一般可以把 Internet 分为 5 个接入级：第 1 级为网络接入点（Network Access Point, NAP）；第 2 级为多个公司经营的国家主干网；第 3 级是地区 ISP（商用、国家的）；第 4 级是本地 ISP；第 5 级是校园网、企业网或家庭上网用户。

5. Internet 研制过程中的贡献

Internet 研制过程中建立的计算机网络基本概念、技术、理论原理框架主要如下。

1) 列奥纳德·克莱因洛克提出了“分组交换”、存储转发协议包的传输思想，其主要贡献是用被称为概率论和排队论的数学工具，研究出了一整套分组交换数据通信的数学理论，对网络的很多具体

技术问题给出了理论指导，如协议包的长度设置、分组交换性能、拥塞控制，通信流量优化和减少延迟时间等。

2) 网络结点功能设计，每个结点除了作为结点的局部功能外，还必须有全局的功能。结点的全局功能包括支持与其他结点的通信，对整个网络的测试和性能分析，允许本地用户使用远程结点的资源。

3) 使用专用通信线路，决定租用性能更高的专用通信线路，确保通信传输信道的可靠性。

4) 采用美国 BBN 科技公司为解决可靠性和结点计算机的不兼容问题而发明的接口报文处理机 (IMP)。网络结点之间通过 IMP 连接。IMP 是重要的网络设备，类似交换机和路由器。

6. 对 Internet 的主要批评

目前对 Internet 的批评主要有 3 个。

第一个批评是，Internet 好像一座“大垃圾山”，人们不停地往上倒东西，结果使得它包含很多重复、过时、零散、混乱的数据和信息，人们很难找到所需要的东西。而 Internet 的初衷是把垃圾变成金子，用一些简单的办法把数据和信息组织起来，让人们更方便地获得信息。

第二个批评是，Internet 就像一个只有神经细胞的低等生物，它没有大脑，50 多年过去了，人们并没有实现利克莱德在 1960 年勾画出的把计算机网络建成“思维中心”的设想。

第三个批评是，Internet 太不安全了，最初设计时仅考虑网络在大学和科研机构使用，使用者应是可靠的，所设计的 TCP/IP 协议没有考虑到安全问题，随着 Internet 和计算机网络深入人类社会的各个方面，网络安全问题日益凸显，迫切需要寻找解决网络安全的有效技术和途径。

7. 因特网的技术标准

因特网的技术文档和标准以请求注释 (Request For Comments, RFC) 文档的形式给出。因特网是由一些独立的管理机构管理的，最初的因特网管理组织是在 1983 年为管理 ARPANet 而成立的因特网活动委员会 (Internet Activities Board, IAB)，然后改为因特网体系结构委员会 (Internet Architecture Board, IAB)，负责因特网技术和标准的制定。后来又成立了因特网协会 (Internet Society, IS)。

为满足因特网应用发展的需要，1989 年 IAB 进行了重组，研究人员集中到因特网研究特别任务组 (Internet Research Task Force, IRTF) 和因特网工程特别任务组 (Internet Engineering Task Force, IETF)。IRTF 主要负责与 Internet 长期发展有关的研究，涉及 Internet 协议、体系结构等。IETF 主要解决工程和技术发展问题，又分为若干工作组，IETF 的工作领域涉及 Internet 服务、网络管理、路由技术、网络安全、RFC 技术文档、应用程序等。

RFC 文档是在 1969 年与 ARPANet 一起出现的，目的是形成 Internet 网络研究的技术文档系列。任何人都可以提交 RFC 文档，但是要成为 Internet 技术标准，是需要经过审核和验证的。RFC 文档是获得 Internet 技术发展状况与动态的主要信息来源之一，RFC 系列文档用数字命名，阅读 RFC 文档时需要注意两个问题：一是确定是否为最新的文档；二是需要注意文档的类别，看是否为正式标准。

RFC 文件编号唯一，文档修改后，修改后的内容使用新的 RFC 编号，如果有新的 RFC 文件取代了旧的 RFC 文件，则会在新的 RFC 文件标题页上注明作废的旧 RFC 编号，指出新的 RFC 文件编号。2013 年 11 月，RFC 7040 给出了接入网过渡技术 (Public 4 over 6) 标准，RFC 文档的编号已经排列到 7000 以上。

RFC 是在线存放的，可以方便地使用 FTP、WWW 浏览器，或其他检索方式获得 RFC 文档。RFC 文档可以在 <http://www.rfc-editor.org> 上得到。

1.1.2 计算机网络和计算机网络体系结构

1. 计算机网络的定义

计算机网络的定义：通过通信协议和传输介质，把分散在不同地点的计算机设备连接起来，实现资源共享和数据传输的系统。

在上述计算机网络定义中，涉及 7 个知识点：①传输介质；②通信协议；③不同地点；④计算机设备；⑤资源共享；⑥数据传输；⑦系统。计算机网络的原理和技术围绕这 7 个知识点展开讨论，对计算机网络的学习就是分析这些知识的含义，涵盖的内容，涉及的技术。

与人类日常生活中的通信需要使用协议一样，计算机网络采用网络协议进行通信。计算机网络采用分组交换，把需要传输的数据分割成小数据段，加上网络协议首部，形成协议数据单元在网络中传输，这些协议首部是通信传输的规则和约定，是冗余的，但是不可缺少的。

2. 计算机网络体系结构

计算机网络体系结构是计算机网络协议和层次的集合。

计算机网络是一个复杂的系统，有多台计算机设备在计算机网络中通信传输、共享资源，还涉及不同计算机网络之间的互连，计算机网络要提供复杂的功能和可靠的服务。

在日常生活中，人们习惯把一个复杂的问题分解成多个简单的问题，解决好了多个简单的问题即可解决好这个复杂的问题。采用类似的做法，把计算机网络提供的复杂功能分散到不同的层次上，每一层次实现特定的功能，下层提供的功能是上层提供功能的基础，下层为上层提供服务，层次之间通过接口（网络协议）联系。网络中通信的双方均有相同的层次，通过对等层协议彼此理解、完成该层的功能。

通过对计算机网络系统采用分层的设计方法，把计算机网络的功能分散到每一层次上，可以简化复杂问题的处理，由于各层功能实现彼此独立，也便于对计算机网络系统进行设计实现、维护和扩充。

计算机网络中的层次应划分为多少层呢？层数不能太多，也不能太少。层数太多会使网络体系结构过于复杂，层之间的接口过多，给网络设计带来困难。层数过少会造成网络功能的界面不清楚，每一层实现的内容太多，给层次功能实现带来不便。

计算机网络中每一层的功能和提供的服务由网络协议数据单元（Protocol Data Unit, PDU）描述和实现，网络协议涉及通信双方理解的约定和规则，这些约定与规则按实现的功能划分到不同的层次上，发送方和接收方在同一网络层次上制定、遵循和理解网络协议的内容。不同系统中同一层次上的网络协议称为对等层网络协议。

3. 计算机网络的物理结构

计算机网络的组成和结构可以从计算机网络物理结构、计算机网络拓扑结构和计算机网络协议体系结构 3 个方面进行描述。

计算机网络物理结构也可以分为资源子网和通信子网两个部分，资源子网又称为网络边缘，通信子网又称为网络核心。

资源子网负责计算机网络中数据的发送和接收，是数据源端点和数据目的端点，资源子网的设备包括联网的计算机设备，如计算机、网络打印机、手持移动设备等。

通信子网负责数据的传输、交换和连接，以及通信控制，如路由器、交换机等，用做计算机网络中的交换结点和访问结点。通信子网可以设计成两种信道：点到点信道和广播信道。不同的信道与计算机网络拓扑有关。

计算机网络中的结点一般指网络中的主机（计算机）、路由器和交换机等计算机设备。计算机网络中有 3 种结点：端结点、访问结点、交换结点。通信子网中有访问结点和交换结点，端结点位于资源子网。

1) 端结点处于资源子网中，一般是发送、接收和处理数据的通用计算机，也称为数据终端设备 (Data Terminal Equipment, DTE)。用于发送数据的计算机称为源端结点，用于接收数据的计算机称为目的端结点。

2) 访问结点位于通信子网的边缘，可以连接处于资源子网的计算机设备。访问结点连接发送端结点，构成源结点。访问结点连接接收端结点，构成目的结点。访问结点也称为数据电路端接设备 (Data Circuit-terminating Equipment, DCE)，如调制解调器。

3) 交换结点位于通信子网内部，用于对数据信号的转接和交换，存储转发是交换结点的主要工作。计算机网络中采用分组交换方式。

计算机网络的两级子网及网络结点如图 1-1 所示。

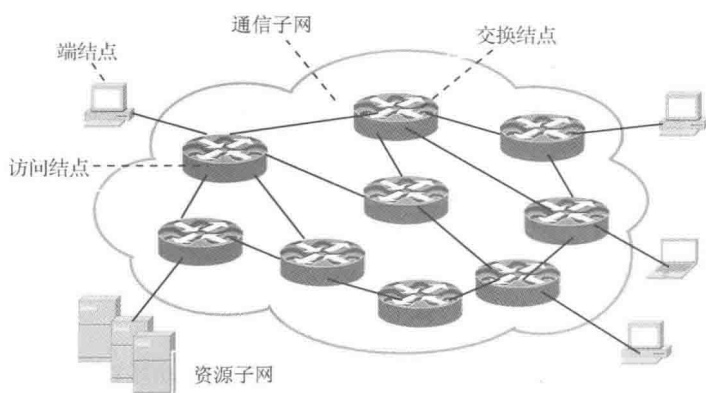


图 1-1 计算机网络的两级子网及网络结点

4. 计算机网络拓扑结构

计算机网络拓扑结构用数学拓扑学中的点和线来描述计算机网络的连接构型，可以简化计算机网络中结点之间的联系，清晰地看出网络的基本构型和网络结点之间的连接关系。常用的网络拓扑结构有总线型、环型、星型、树型、网状型、卫星或无线电型等。

5. 计算机网络的协议体系结构

根据计算机网络两级子网的结构，可以看出层次划分的轮廓。人们把计算机网络的功能划分为 5 个层次，自底向上依次如下。

1) 计算机设备及端系统和通信子网的连接处，以及网络中结点与结点之间的物理连接处，应划分一个层次，用于实现物理连接，称为物理层，位置在网络中的各个结点上。

2) 网络中相邻结点之间实现可靠传输的功能应划分为一个层次，称为数据链路层，位置在相邻结点上。

3) 源主机结点和目的主机结点之间实现网络传输的功能可划分为一个层次，称为网络层，位置在 PDU 传输路由经过的各个结点上，传输路由从源主机结点、中间经过的结点，到达目的主机结点。

4) 在源端结点到目的端结点，即两个通信的计算机设备之间，为实现应用进程可靠传输所提供的功能应划分为一个层次，称为运输层，位置在端结点上。

5) 网络应用之间的可靠传输可划分为一个层次，称为应用层，位置在端结点上。

1.1.3 当代计算机网络体系结构

随着计算机网络技术的发展，计算机网络体系结构的描述也发生了变化，目前，计算机网络体系结构的层次划分一般采用 5 层结构，自顶向下依次为应用层、运输层、网络层、数据链路层、物理层，对应的 PDU 分别称为报文 (message)、报文段 (segment)、分组 (packet)、帧 (frame)、位流 (bits)。5 层计算机网络体系结构的层次如图 1-2 所示。

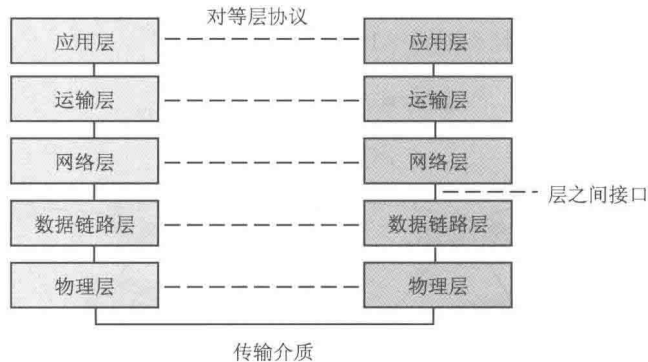


图 1-2 当代计算机网络体系结构

计算机网络体系结构描述了计算机网络设计时应该遵循的层次功能划分，每一层协议的标识和格式，并涉及层与层之间的联系，层与层之间接口的实现方法，以及层与层之间服务的概念和对等层的概念。

计算机网络中的体系结构有时也称为“洋葱头”式的体系结构，在发送方，需要传输的应用数据，自顶向下依次经过应用层、传输层、网络层、数据链路层和物理层，在经过每一层时，都要加上该层的协议首部信息，在数据链路层上不仅要加上协议首部，还要加上协议尾部，组成数据链路层的协议数据单元 (PDU) 帧。自顶向下构成每一层的协议数据单元，这一过程称为协议封装，也称为协议打包。

网络中传输的协议数据单元，在经过网络中的路由器和交换机的中间结点时，需要根据中间结点的层次结构，进行协议拆封和再封装。到达接收方后，在接收方自底向上依次经过物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层进行拆封 (也称为拆包)，最后把应用数据交给应用进程。

这里说的协议首部就是每一层要实现的网络控制协议，也是每一层协议数据单元 (PDU) 中的控制部分，每一层通过协议实现该层的功能。有时协议首部也称为协议头。不同系统中的同一层称为对等层，在打包和拆包过程中实现了对等层之间的通信，用虚线标识，说明好像是两个对等层之间在通信一样，而实际的信号通路在发送端系统垂直向下、经过网络传输介质连接到通信的另一端，用实线标识。对等协议的打包、拆包通信过程如图 1-3 所示。