

清华大学

计算机系列教材

徐 恪 徐明伟 编著
陈文龙 马东超

高级计算机网络

清华大学出版社



清华大学 计算机系列教材

徐 恪 徐明伟 编著
陈文龙 马东超

高级计算机网络

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书全面介绍了计算机网络技术领域中主要的理论和实践问题,主要内容围绕网络体系结构中的核心机制和算法展开,具体包括单播路由、组播路由、拥塞控制、QoS 控制、路由器设计和网络安全等计算机网络工程领域的核心内容,还特别介绍了 P2P 和物联网等新型网络形态,对新一代互联网的研究进展也进行了简要介绍。

本书全面反映了近几年来网络领域的最新发展,并尽可能提供了较详尽的参考文献。在介绍最新进展的同时,在每一章的最后都力图指出进一步的研究方向供读者参考。

本书主要面向通信和计算机网络技术领域的研究生,也可供广大网络工程技术人员参考。本书对想了解 and 掌握计算机网络体系结构的基本架构、核心设计思想和基本协议机制的读者也很有参考价值。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

高级计算机网络/徐恪,徐明伟等编著.--北京:清华大学出版社,2012.10

清华大学计算机系列教材

ISBN 978-7-302-28826-8

I. ①高… II. ①徐… ②徐… III. ①计算机网络 IV. ①TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 101693 号

责任编辑:龙启铭 战晓雷

封面设计:常雪影

责任校对:时翠兰

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>,010-62795954

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:32

字 数:779千字

版 次:2012年10月第1版

印 次:2012年10月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:49.50元

产品编号:041335-01

前 言

人类社会正全面迈向信息社会,信息已经成为人们改造世界和推动世界发展的直接媒体和推动力。以 Internet 为代表的计算机网络是现代社会最重要的信息基础设施之一,它已渗透到社会的各个领域,成为国家进步和社会发展的重要支柱,是知识经济的基础载体和支撑环境。可以预见,超高速的光通信技术、高速无线通信技术、云计算和物联网等技术的研究进展会使网络技术在未来 10 年内产生新的飞跃,朝着以“更大、更快、更及时、更方便、更安全、更可管理和更有效”为标志的新一代互联网发展。

充分认识和研究新一代互联网发展中的基础性问题,使新一代互联网能够更好地满足国家和社会的需求,已经成为摆在我们面前的紧迫任务;而培养一批掌握新一代互联网的基础理论和关键技术的高水平人才更是高等院校责无旁贷的任务。

为了使计算机通信与网络等相关专业的研究生能够更加深入地掌握计算机网络的研究现状,理解目前网络体系结构、协议和应用研究领域的最新发展,笔者为清华大学信息学院的研究生开设了“计算机网络体系结构”课程。为了配合课程教学,我们着手编写了本教材。

教材的编写最难的就是内容取舍。在本书编写过程中,我们重点突出了对网络体系结构中核心机制和算法的介绍,除了介绍单播路由、组播路由、拥塞控制、QoS 控制、路由器设计和网络安全等计算机网络的核心内容之外,还特别介绍了 P2P、物联网等新型网络形态,对新一代互联网的研究进展也进行了简要介绍。希望本书能帮助计算机网络和通信专业研究生了解和掌握计算机网络体系结构的基本架构、核心设计思想和基本的协议机制。

需要指出的是,本书并不是一本计算机网络领域的入门书籍,如果读者对计算机网络的基本原理并不了解,建议先去阅读 Tanenbaum 教授编著的《计算机网络(第 5 版)》。如果读者在掌握了计算机网络的基础知识后,希望更深入地了解网络研究领域中的理论和实践问题,那么本书会是一个很好的选择。

我的研究生胡光武、林嵩、朱敏、沈蒙、赵玉东、姚龙、马振、李杰等在本书的编写过程中协助编者做了大量文字整理工作,在此一并表示感谢。

我要感谢我的家人和朋友,特别是我的妻子和儿子,本书是在和儿子不断争夺键盘的斗争中完成的,谨以本书献给他们。

感谢国家基础研究和国家自然科学基金委员会多年来对作者研究工作的支持(项目编号:2009CB320501,61170292,60970104)。

限于作者的水平,书中可能会有不足之处,希望得到广大读者的指正。计算机网络是一个飞速发展的领域,我们将在吸取大家的意见和建议的基础上,在适当的时候再做修订和补充。

徐恪

2012 年 9 月于清华园

目 录

第 1 章 计算机网络与 Internet	1
1.1 引言	1
1.2 Internet 发展历史	2
1.2.1 互联网发展的主要阶段	4
1.2.2 互联网在中国的发展	5
1.2.3 互联网主要创新	5
1.3 互联网边缘层与核心层	10
1.3.1 互联网边缘层	10
1.3.2 互联网核心层	11
1.4 互联网标准化组织	11
1.5 下一代互联网发展现状	12
1.5.1 新一代互联网与 IPv6	13
1.5.2 下一代互联网体系结构基础研究及探索	14
1.6 新兴网络形态介绍	16
1.6.1 物联网	16
1.6.2 云计算	19
1.6.3 数据中心网络	20
1.7 结论和进一步的研究工作	22
参考文献	23
第 2 章 Internet 单播路由	26
2.1 引言	26
2.2 Internet 路由体系结构与路由算法	26
2.2.1 Internet 结构特点	26
2.2.2 Internet 的路由结构	27
2.2.3 路由算法分类	30
2.3 Internet 域内路由协议	33
2.3.1 路由信息协议(RIP)	34
2.3.2 开放最短路径优先协议(OSPF)	40
2.4 Internet 域间路由协议 BGP	54
2.4.1 自治系统级网络拓扑	55
2.4.2 自治系统间连接关系	57
2.4.3 国内 ISP 互联情况	61
2.4.4 边界网关协议(BGP)简介	63
2.4.5 BGP 中的策略路由	71
2.4.6 BGP 路由收敛问题	75

2.4.7	BGP 稳定路径问题	81
2.4.8	BGP 路由安全问题	86
2.5	结论和进一步的研究工作	90
	参考文献	91
第 3 章	Internet 组播	95
3.1	引言	95
3.1.1	计算机网络中的通信方式	95
3.1.2	组播发展的历史、现状及挑战	97
3.1.3	IP 组播技术的优缺点	98
3.2	组播地址	100
3.2.1	IPv4 组播地址	100
3.2.2	组播 MAC 地址	101
3.3	Internet 组管理协议 IGMP	102
3.4	组播转发	103
3.4.1	源树	103
3.4.2	共享树	104
3.4.3	源树和共享树的比较	105
3.4.4	组播转发	105
3.5	组播路由协议	107
3.5.1	域内组播路由协议	109
3.5.2	域间组播路由协议	116
3.5.3	分析与比较	125
3.6	IPv6 组播	131
3.6.1	IPv6 组播地址	131
3.6.2	IPv6 组成员关系协议	132
3.6.3	IPv6 组播路由协议	132
3.6.4	CNGI 大规模可控组播	133
3.7	结论和进一步的研究工作	134
	参考文献	136
第 4 章	拥塞控制	139
4.1	引言	139
4.2	基本概念	140
4.2.1	拥塞和拥塞控制	140
4.2.2	Internet 中拥塞发生的原因	141
4.2.3	拥塞控制的目标	141
4.2.4	IP 组播中的拥塞控制	143
4.3	TCP 拥塞控制机制研究	143
4.3.1	Internet 的网络模型	143
4.3.2	线性拥塞控制机制	144

4.3.3	线性拥塞控制机制评价	145
4.4	端到端拥塞控制算法研究	147
4.4.1	端到端拥塞控制算法设计的困难	148
4.4.2	端到端拥塞控制算法的研究概况	148
4.4.3	拥塞控制的源算法	149
4.4.4	拥塞控制的链路算法	153
4.5	组播拥塞控制算法和协议	158
4.5.1	组播拥塞控制协议的目标	158
4.5.2	组播拥塞控制算法的分类	159
4.6	结论和进一步的研究工作	161
	参考文献	162
第5章	服务质量控制	166
5.1	引言	166
5.2	QoS的基本框架	168
5.2.1	流量分类与标记	168
5.2.2	流量监管与整形	168
5.2.3	队列调度	172
5.3	集成服务与区分服务	174
5.3.1	集成服务 IntServ	174
5.3.2	区分服务 DiffServ	180
5.3.3	集成服务与区分服务相结合的端到端 QoS 提供机制	188
5.3.4	各种服务机制的简单比较	192
5.4	分组调度算法	193
5.4.1	分组调度概述	193
5.4.2	常用的调度算法	193
5.5	动态分组状态	200
5.5.1	核心无状态网络体系结构 SCORE 概述	201
5.5.2	SCORE 中的保证型服务	207
5.6	结论和进一步的研究工作	210
	参考文献	211
第6章	高性能路由器体系结构与关键技术	216
6.1	引言	216
6.2	路由器的发展历史	216
6.3	路由器软硬件系统组成	217
6.3.1	路由器基本结构单元	217
6.3.2	路由器软件结构	219
6.4	路由器体系结构	220
6.4.1	为什么需要高性能路由器	221
6.4.2	单机集中式总线结构	221

6.4.3	单机分布式总线结构	223
6.4.4	单机分布式 Crossbar 结构	223
6.4.5	多机互连的集群结构	224
6.4.6	可扩展集群路由器产品简介	226
6.5	路由器关键技术	228
6.5.1	路由查找算法	228
6.5.2	IP 分组分类算法	251
6.5.3	路由器交换结构及调度算法	262
6.6	新型路由器体系结构研究进展	280
6.6.1	并行分组交换机 PPS	280
6.6.2	可编程路由器研究进展	283
6.6.3	可重构路由器	287
6.7	结论和进一步的研究工作	290
	参考文献	290
第 7 章	网络安全	300
7.1	引言	300
7.2	计算机网络安全基础	301
7.2.1	网络安全风险	301
7.2.2	网络安全目标、安全服务和安全机制	302
7.3	密码学基础及其应用	303
7.3.1	密码学历史	304
7.3.2	密码学基本概念	310
7.3.3	对称密钥算法简介	312
7.3.4	非对称密码算法简介	317
7.3.5	信息认证与单向散列函数	321
7.4	IP 层安全机制 IPSec	326
7.4.1	IPSec 协议族结构	326
7.4.2	小结	333
7.5	分布式拒绝服务攻击 DDoS 防范	333
7.5.1	DDoS 攻击的基本方式	335
7.5.2	现有 DDoS 攻击防范方案	339
7.5.3	小结	343
7.6	恶意软件和僵尸网络	343
7.6.1	传统计算机病毒	344
7.6.2	蠕虫	345
7.6.3	特洛伊木马	346
7.6.4	僵尸网络	348
7.6.5	小结	348
7.7	结论和进一步的研究工作	349
	参考文献	350

第 8 章 P2P 系统原理	354
8.1 引言	354
8.2 P2P 技术的发展历史	354
8.3 P2P 的组织结构	356
8.3.1 P2P 与应用层网络	357
8.3.2 无结构的 P2P 网络	358
8.3.3 有结构的 P2P 网络	362
8.4 P2P 应用以及典型 P2P 系统分析	371
8.4.1 BitTorrent	371
8.4.2 CoolStreaming	376
8.4.3 PPLive	378
8.4.4 PPVA	382
8.5 结论和进一步的研究工作	384
参考文献	385
第 9 章 物联网	388
9.1 引言	388
9.2 物联网的由来	388
9.2.1 物联网的起源及发展	388
9.2.2 射频识别技术	389
9.2.3 智慧的地球	391
9.2.4 感知中国	392
9.3 常见应用场景	392
9.3.1 智能生产线	392
9.3.2 智能家居	393
9.3.3 智能交通	393
9.3.4 智慧农业	395
9.3.5 医疗物联网	396
9.3.6 安防系统	396
9.3.7 路灯控制系统	397
9.3.8 世博会门票	397
9.4 无线传感器网络简介	398
9.4.1 无线传感器网络的概念与定义	398
9.4.2 无线传感器网络的技术特点	398
9.4.3 传感器网络的应用	402
9.5 物联网体系结构	405
9.5.1 物联网的特性	405
9.5.2 物联网发展面临的难点	406
9.5.3 物联网体系结构设计原则	406
9.5.4 一种物联网应用参考模型	407

9.5.5	一种层次化物联网体系结构	408
9.5.6	融合物联网的下一代互联网体系结构与协议栈	409
9.6	物联网典型协议	411
9.6.1	IEEE 802.15.4 标准	411
9.6.2	ZigBee	414
9.6.3	6LoWPAN	414
9.6.4	路由机制	419
9.6.5	TCP/IP 协议栈的简化	427
9.6.6	CoRE	428
9.7	硬件平台与操作系统	429
9.7.1	Crossbow 硬件平台	430
9.7.2	操作系统	430
9.8	物联网体系结构的主要研究问题	433
9.8.1	新型可扩展层次化路由	434
9.8.2	轻量级 IPv6 协议栈	434
9.8.3	物联网节点和互联网的互联互通问题	435
9.8.4	物联网安全问题	436
9.9	结论和进一步的研究工作	437
	参考文献	437
第 10 章	IPv6 与新一代互联网	441
10.1	引言	441
10.2	IPv6 简介	441
10.2.1	IETF	441
10.2.2	IPv6 协议的历史	442
10.2.3	IPv6 协议内容	443
10.2.4	IPv6 展望	446
10.3	下一代互联网的主要特征	447
10.3.1	下一代互联网基本特征	447
10.3.2	下一代互联网的主要技术挑战	448
10.3.3	下一代互联网研究中的几个重要问题	449
10.4	国内外新一代互联网的主要进展	451
10.4.1	基于改良式的新一代互联网体系结构研究	451
10.4.2	基于革命式的新一代互联网体系结构研究	454
10.4.3	我国下一代互联网研究实践	458
10.4.4	小结	461
10.5	结论和进一步的研究工作	463
	参考文献	463
附录 A	计算机网络实验系统 NetRiver 简介	467
A.1	滑动窗口协议实验	468

A.2 IPv4 协议收发实验	472
A.3 IPv4 协议转发实验	475
A.4 IPSec 协议实验	480
参考文献	490
附录 B NetFPGA 实验平台简介	491
B.1 NetFPGA 开发板简介	491
B.2 NetFPGA 硬件系统	491
B.3 NetFPGA 软件系统	492
B.4 NetFPGA 使用模型	493
参考文献	495
附录 C PlanetLab 简介	496
参考文献	500

第 1 章 计算机网络与 Internet

1.1 引言

人类社会已经进入基于网络的信息时代,现在我们通常谈到的网络一般指计算机网络,有时也指“三网”,即电信网络、有线电视网络和计算机网络。进入 20 世纪 90 年代以后,以 Internet 为代表的计算机网络发展迅速,从最初的教育科研网络逐步发展成为商业网络。Internet 给人类通信方式带来了巨大变革,已经成为当代社会最重要的信息基础设施。

在 Tanenbaum 教授编著的《计算机网络》一书中,把计算机网络定义为自治计算机 (autonomous computers) 的互联集合^[1]。这里自治计算机的含义是指在网络中,每台计算机的地位都是对等的,没有谁受谁控制的问题。计算机网络是计算机技术和通信技术相结合的产物,它是将分布在不同地理位置的多台具有独立功能的计算机通过外围设备和通信线路互联起来、在功能完善的管理软件的支持下实现资源共享的系统。在计算机网络中总会有一部分设备专门用来传递信息,我们称之为通信子网。除了通信功能之外,网络的另一个重要作用是提供各种和资源获取相关的服务,在网络中由资源子网完成这些功能。

计算机网络的发展已经有 40 多年的历史,发展到今天,最大的也是大家最熟悉的计算机网络就是 Internet。Internet 是指网际网,即由全球所有上网的计算机互联所形成最大的计算机网络。对于 Internet 的定义,TCP/IP 协议发明者之一、被誉为“互联网之父”的 Vinton Cerf 博士给出的解释是:世界上最大的网际网,它使用 TCP/IP 协议作为数据包交换技术,而底层可运行各种通信协议。

Internet 是人类历史发展中一个伟大的里程碑,它是未来信息高速公路的雏形,人类正由此进入一个前所未有的信息化社会。人们用各种名称来称呼 Internet,如国际互联网络、因特网、交互网络、网际网等,Internet 已经成为世界上覆盖面最广、规模最大、信息资源最丰富的计算机信息网络。Internet 目前已经连接了全球 240 多个国家和地区,联网主机超过 5 亿台。在 Internet 的发展过程中,研究人员和技术人员协作解决了无数的技术问题,使之可以成功运行。实际上,在 40 年前,没有人敢设想 Internet 能够发展到这样大的规模,并且还成功运行。当然,Internet 中仍然存在着许多还没有解决的问题,也不断有新的问题出现,这需要我们不断去研究,去尝试解决这些问题,去推动 Internet 的发展。

本章首先简要介绍 Internet 的发展历程及其在中国的发展历史,然后从互联网边缘层和核心层的角度介绍互联网的基本功能组成,之后简要介绍推动互联网发展的标准化组织。目前新一代互联网已经成为研究热点,本章也将对其做简要介绍,之后将简述目前新兴的网络和计算形态,如物联网、云计算和数据中心网络等,其中物联网的内容将在后续章节详细介绍,最后对本章进行总结。

1.2 Internet 发展历史

本节只是简要回顾 Internet 发展的历史,更详细的资料可以参考文献[33]和[36]。

从某种意义上,Internet 可以说是美苏冷战的产物。它的由来可以追溯到 1962 年。当时,美国国防部为了保证美国本土防卫力量和海外防御武装在受到前苏联第一次核打击以后仍然具有一定的生存和反击能力,认为有必要设计出一种分散的指挥系统:它由一个个分散的指挥点组成,当部分指挥点被摧毁后,其他点仍能正常工作,并且这些点之间能够绕过那些已被摧毁的指挥点而继续保持联系。为了对这一构思进行验证,1969 年美国国防部国防高级研究计划署(DoD/DARPA)委托 BBN 公司建立了一个名为 ARPANET 的网络,这个网络把加利福尼亚大学洛杉矶分校、加利福尼亚大学圣芭芭拉分校、斯坦福大学,以及位于盐湖城的犹他州州立大学的计算机主机联接起来,位于各个节点的大型计算机采用分组交换技术,通过专门的通信交换机(IMP)和专门的通信线路相互连接。这个 APRANET 就是 Internet 最早的雏形。这里提到的 BBN 公司值得关注,它在 Internet 历史上发挥了重要的作用,不仅参与创建了最初的 ARPANET 网络,而且研制了历史上第一台路由器和第一台 G 比特路由器,近年来还在美国的新一代互联网研究计划 GENI 计划^[5]中承担了重要的任务^[44]。

到 1972 年,ARPANET 网上的主机数已经达到 40 台,这 40 台主机彼此之间可以发送电子邮件和利用文件传输协议发送大文本文件,包括数据文件(即现在 Internet 中的 FTP),同时也设计和实现了通过把一台计算机模拟成另一台远程计算机的一个终端而使用远程计算机上的资源的方法,这种方法被称为 Telnet。

1972 年,全世界计算机业和通信业的专家学者在美国华盛顿举行了第一届国际计算机通信会议,研究如何在不同的计算机网络之间进行通信,会议决定成立 Internet 工作组,负责建立一种能保证计算机之间进行通信的标准规范(即“通信协议”)。1973 年,美国国防部也开始研究如何实现各种不同网络之间的互联。

1974 年,IP(Internet 协议)和 TCP(传输控制协议)问世,合称 TCP/IP 协议^[45]。这两个协议定义了一种在计算机网络间传送报文(文件或命令)的方法。随后,美国国防部决定向全世界无条件地免费提供 TCP/IP,即向全世界公布解决计算机网络之间通信的核心技术,TCP/IP 协议核心技术的公开最终导致了 Internet 的大发展。

到 1980 年,世界上既有使用 TCP/IP 协议的美国军方的 ARPANET,也有很多使用其他通信协议的各种网络。为了将这些网络连接起来,Vinton Cerf 提出一个想法:在每个网络内部各自使用自己的通信协议,在和其他网络通信时使用 TCP/IP 协议。这个设想最终导致了 Internet 的诞生,并确立了 TCP/IP 协议在网络互联方面不可动摇的地位。

20 世纪 70 年代末到 80 年代初,各种各样的网络应运而生。

20 世纪 80 年代初,DARPANET(ARPANET 的另一个名称)取得了巨大成功,但没有获得美国联邦机构合同的学校仍不能使用。为解决这一问题,美国国家科学基金会(NSF)开始着手建立提供给各大学计算机系使用的计算机科学网(CSNet)。CSNet 是在其他基础网络之上增加统一的协议层,形成逻辑上的网络,它使用其他网络提供的通信能力,在用户看来它就是一个独立的网络。CSNet 采用集中控制方式,所有信息交换都经过 CSNet-

Relay(一台中继计算机)进行。

1982年,美国北卡罗莱纳州立大学的 Steve Bellovin 创立了著名的网络新闻组 (Usenet),它允许该网络中任何用户把信息(消息或文章)发送给网上的其他用户,大家可以在网络上就自己所关心的问题和其他人进行讨论;1983年在纽约城市大学也出现了一个以讨论问题为目的的网络——BITNet,在这个网络中,不同的话题被分为不同的组,用户可以根据自己的需求,通过计算机订阅,这个网络后来被称为电子邮件群(Mailing List);1983年,在美国旧金山还诞生了另一个网络 FidoNet(费多网或 Fido BBS)即公告牌系统。它的优点在于用户只要有一台计算机、一个调制解调器和一根电话线就可以互相发送电子邮件并讨论问题,这就是后来的 Internet BBS。

以上这些网络都相继并入 Internet 而成为它的一个组成部分,Internet 逐渐成为全世界各种网络的大集合。

1986年 NSF 投资在美国普林斯顿大学、匹兹堡大学、加州大学圣地亚哥分校、伊利诺伊大学和康奈尔大学建立 5 个超级计算中心,并通过 56Kb/s 的通信线路连接形成 NSFNET 的雏形。1987年 NSF 公开招标对于 NSFNET 的升级、营运和管理,结果 IBM、MCI 和由多家大学组成的非盈利性机构 Merit 获得 NSF 的合同。1989年 7 月,NSFNET 的通信线路速度升级到 T1(1.5Mb/s),连接了 13 个骨干节点,采用 MCI 提供的通信线路和 IBM 提供的路由设备,Merit 则负责 NSFNET 的营运和管理。由于 NSF 的鼓励和资助,很多大学、政府资助甚至私营的研究机构纷纷把自己的局域网接入 NSFNET 中,从 1986 年至 1991 年,NSFNET 的子网从 100 个迅速增加到 3000 多个。NSFNET 的正式营运以及实现与其他已有和新建网络的连接等真正成为 Internet 的基础。

Internet 在 20 世纪 80 年代的扩张不仅带来量的改变,同时也带来某些质的变化。由于多种学术团体、企业研究机构甚至个人用户的进入,Internet 的使用者不再限于纯计算机专业人员。新的使用者发觉计算机相互间的通信对他们来讲更有吸引力。于是,他们逐步把 Internet 当做一种交流与通信的工具,而不仅仅只是共享大型计算机的运算能力。

进入 20 世纪 90 年代初期,Internet 事实上已成为一个“网际网”:各个子网分别负责自己的架设和运营费用,而这些子网又通过 NSFNET 互联起来。NSFNET 连接全美上千万台计算机,拥有几千万用户,是 Internet 最主要的成员网。随着计算机网络在全球的拓展和扩散,美洲以外的网络也逐渐接入 NSFNET 主干或其子网。

1991年 9 月瑞士 CERN 研究中心的 Tim Berners-Lee 发明了万维网(World Wide Web,WWW)。WWW 技术的出现带来了 Internet 的大发展,从此 Internet 进入了高速增长时期。

1998年,第一个 P2P 程序 Napster 的出现,宣告互联网诞生了新的应用模式,那就是 Peer-to-Peer 模式,这种模式下,广大互联网用户可以通过对等协作,共享磁盘、网络带宽和 CPU 运算能力等一切可以共享的资源,从此互联网的发展掀开了新的一页。

互联网早期的发展历程如图 1.1 所示^[2]。据 ITU 的统计,截至 2010 年底,全球互联网用户数已达 20 亿,而中国的互联网用户数已超过 4.5 亿。

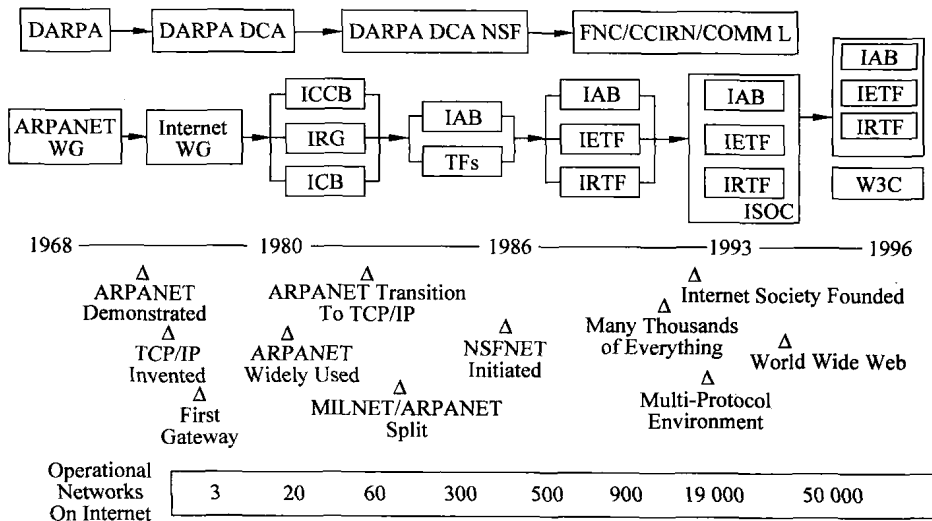


图 1.1 互联网发展时间表

1.2.1 互联网发展的主要阶段

互联网的基础结构大体上经历了 3 个发展阶段。这 3 个阶段在时间划分上并非截然分开而是有部分重叠,这是因为网络总是在渐进发展。

1. 互联网发展的第一阶段

第一个分组交换网 ARPANET 最初只是一个单个的分组交换网,后来 DARPA 研究多种网络互联的技术。在 1983 年 TCP/IP 协议成为标准协议,同年,ARPANET 分解成两个网络:ARPANET(实验研究用的科研网)和 MILNET(军用计算机网络)。1983—1984 年形成了 Internet。1990 年 ARPANET 正式宣布关闭。

2. 互联网发展的第二阶段

1986 年,NSF 建立了国家科学基金网 NSFNET,它是一个三级结构计算机网络,分为主干网、地区网和校园网,这一结构至今仍被很多运营商采用。1991 年,美国政府决定将 Internet 的主干网转交给私人公司来经营,并开始对接入 Internet 的单位收费。1993 年 Internet 主干网的速率提高到 45Mb/s(T3 速率),各网络之间需要使用路由器来连接,主机到主机的通信可能要经过多个网络。

3. 互联网发展的第三阶段

从 1993 年开始,由美国政府资助的 NSFNET 逐渐被若干个商用的 ISP 网络所代替。1994 年开始创建了 4 个网络接入点(Network Access Point, NAP),分别由 4 个电信公司经营。NAP 是专门用于交换 Internet 流量的节点。在 NAP 中安装有高性能的交换设备。到 21 世纪初,美国的 NAP 的数量已达到十几个。从 1994 年到现在,Internet 逐渐演变成多级结构网络。主机到主机的通信可能经过多种 ISP。

今天的 Internet 是多级结构,大致上可分为以下 5 个接入级:国家主干网(主干 ISP)、地区 ISP、本地 ISP、校园网、企业网或个人上网用户。

1.2.2 互联网在中国的发展

互联网在中国的发展历程也可以大致划分为3个阶段^[3]。

第一阶段是研究试验阶段,从1986年6月到1994年。在此期间中国一些科研部门和高等院校开始研究 Internet 联网技术,并开展了科研课题和科技合作工作。这个阶段的网络应用仅限于小范围内的电子邮件服务,而且仅为少数高等院校和研究机构提供电子邮件服务。

第二阶段是起步阶段,从1994年4月至1996年。1994年4月,中关村地区教育与科研示范网络工程接入互联网,实现和 Internet 的 TCP/IP 连接,从而开通了 Internet 全功能服务。从此,中国被国际上正式承认为有互联网的国家。之后,ChinaNet、CERNET、CSTnet、ChinaGBnet 等多个互联网项目在全国范围相继启动,互联网开始进入公众生活,并在中国得到了迅速的发展。1998年底,中国互联网用户数已达210万,利用互联网开展的业务与应用逐步增多。

第三阶段是快速增长阶段,从1997年至今。国内互联网用户数基本保持每半年翻一番的增长速度。增长到今天,上网用户已超过4.5亿。据中国互联网络信息中心(CNNIC)公布的2011年1月的第27次中国互联网络发展状况统计报告,截至2010年12月,我国网民规模达到4.57亿,较2009年底增加7330万人;互联网普及率攀升至34.3%,较2009年提高5.4个百分点。

1.2.3 互联网主要创新

在40余年的发展历程中,互联网取得了众多的创新与发明,这些创新极大地推动了互联网的进步,并为互联网的未来发展奠定了坚实的基础。下面对此进行简要的回顾^[4]。

1. 分组交换理论、ARPANET 以及 TCP/IP 协议

2001年美国工程院把被认为是工程界诺贝尔奖的 Draper 奖授予了 Vinton Cerf、Robert Kahn、Leonard Kleinrock 和 Lawrence Roberts 4人,以表彰他们在互联网发展过程中所做的突出贡献。他们分别在各自的领域取得了重要的成就。

分组交换理论创始人 Leonard Kleinrock 于1934年出生于纽约,在 MIT 读博士期间,很多同学选择热门的信息理论做博士论文,1959年 Kleinrock 选择了当时刚刚起步的数据网作为研究方向,并在1962年完成了《大通信网的信息流》论文,特别是他在1964年出版的“Communication Nets: Stochastic Message Flow and Delay”一书,奠定了分组交换的基础。1963年他进入 UCLA 工作。20世纪60年代中,分组交换网被冷落,直到 ARPA 项目开始。ARPA 需要众多的分布在各地的科学家工作,但又无法为每一位科学家提供计算机,ARPA 提出开发数据网 ARPANET 使少量计算机互连并共享使用的要求,1968年 ARPA 邀请 Kleinrock 参加这一项目。1969年 Kleinrock 所在的 UCLA 运行了 ARPANET 的第一个节点。Kleinrock 领导 ARPANET 测量中心负责 ARPANET 的运行维护。1965年他在 MIT 的两个计算机间开展在拨号电话网上传送数据分组的实验,证明了在电路交换网上传送分组慢且不可靠,并且需要较高的成本。

ARPANET 之父 Lawrence Roberts 于1937年出生于美国康涅狄格州,他在 MIT 取得博士学位后到林肯实验室工作。1967年他29岁时就被指定为 ARPANET 项目负责人和

网络体系总设计师,他提出了“分时共享计算机的合作网络”计划。在 Kleinrock 排队理论的基础上,Roberts 提议 ARPANET 采用分组交换网,通过实验确定分组结构和计算机接口,至 1973 年他离开时,ARPANET 已经发展到 23 个节点。Roberts 认为 ARPANET 项目是政府经费支持的,因此他没有就此项工作申请任何专利。

TCP/IP 发明人 Vinton G. Cerf 和 Robert E. Kahn 同时也是 2004 年图灵奖得主。Vinton Cerf 在 1943 年出生于康涅狄格州,于 1965 年在斯坦福大学获得了数学学士学位。在 IBM 工作两年后,考入了加州大学洛杉矶分校,取得计算机科学博士学位,目前是 Google 副总裁。1972 年,Cerf 博士作为助理教授回到斯坦福大学,他面临如何设计一台“网关”计算机互联具有不同协议的网络的难题,他与 Robert Kahn 一道,在 1974 年 5 月提出了命名为 TCP 的分组网互通协议^[45]。1978 年他们进一步将 TCP 分为 TCP/IP 两种协议。

Robert E. Kahn 出生于 1938 年 12 月,1960 年从纽约城市学院获得学士学位,1962 年和 1964 年分别从普林斯顿大学获得硕士和博士学位。在贝尔实验室工作一段时间后,Kahn 到 MIT 电子工程系任教。1969 年,他负责 ARPANET 的“接口信息处理机”(IMP)系统设计,IMP 就是今天路由器的前身。1972 年,Kahn 加入了 DARPA,并且成为 IPTO 的部门主管。Kahn 与 Cerf 一起合作提出了 TCP/IP 协议。1986 年,Kahn 离开 DARPA,创办了非营利的国家研究促进公司 CNRI 并担任董事长和 CEO。

Cerf 和 Kahn 提出的网络互联原则确定了互联网的体系结构:

- (1) 最小自治: 不因为网络互联而改变各网络的内部结构;
- (2) 尽力而为(best effort)的服务模式: 网络只实现最简单的功能,这就是最大努力的分组转发,但是不保证分组一定被送达;
- (3) 无状态的路由器: 路由器不保存端系统间的连接状态,只保存路由表用于分组转发;
- (4) 分散控制: 没有集中的网络管理与控制。

他们提出的设计原则确定了互联网“核心简单,边缘复杂”的基本体系结构,后人也称之为“边缘论”或者“端到端原则”。这里稍作解释,边缘论的含义是“核心简单,边缘复杂”,也就是互联网中网络层只实现最简单的功能,就是最大努力的分组转发,而更多的复杂功能,包括可靠性保证、流控、拥塞控制等都由端系统来实现。换一个说法就是凡是能够在端系统实现的功能就不要在网络中实现。这样做的好处是网络实现简单,而且很容易在各种不同的网络传输技术上实现。实际上,边缘论的思想极大促进了互联网的发展,是互联网成功的最重要原因。

2. 万维网(WWW)

WWW 之父 Berners-Lee 1955 年出生于伦敦,1976 年从英国牛津大学毕业,1980 年在欧洲粒子物理研究实验室 CERN 找到为期半年的软件咨询员的工作。因该实验室的研究人员分布在全球各地,他编写了一段称为 Enquire 的程序,使用随机关联方法存储信息,帮助他记住实验室的人和项目的关联,这奠定了 WWW 的概念基础。1984 年当 Berners-Lee 作为长期雇员回到 CERN 实验室时,他注意到,分布在全球的 CERN 研究人员如果想共享文件,必须使文件与 CERN 主机兼容,但问题是很多研究人员并不愿意花更多的努力去这样做的事。1989 年他向 CERN 提出了开发一个信息 Web 的提议,该 Web 是分布式系统,