

清华大学

计算机系列教材

徐恪 任丰原 刘红英 编著
林闯 主审

计算机网络体系结构

设计、建模、分析与优化



清华大学出版社



清华大学 **计算机系列教材**

徐恪 任丰原 刘红英 编著

计算机网络体系结构

设计、建模、分析与优化

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书全面总结了当前新一代互联网的主要研究项目,分析了新一代互联网主要的技术发展思路,介绍了网络体系结构设计中常用的基础理论,书中涉及的基础理论包括微分方程、优化理论、博弈论、控制理论和随机过程。本书不仅对这些相关理论进行了简要介绍,还提供了应用这些理论解决计算机网络和协议设计问题的实例(大部分实例来自本课题组的研究工作),希望通过这种理论结合应用的方式,读者能较快地熟悉这些常用理论,并能对理论在计算机网络研究中的应用有更直观的体会。

本书主要面向计算机网络和通信领域的研究生,也可供广大网络工程技术人员参考。

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

计算机网络体系结构:设计、建模、分析与优化/徐恪,任丰原,刘红英编著.--北京:清华大学出版社,2014

清华大学计算机系列教材

ISBN 978-7-302-34039-3

I. ①计… II. ①徐… ②任… ③刘… III. ①计算机网络—网络结构—高等学校—教材
IV. ①TP393.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 234296 号

责任编辑:龙启铭 战晓雷

封面设计:傅瑞学

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

印 装 者:三河市中晟雅豪印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:27.75

字 数:671千字

版 次:2014年2月第1版

印 次:2014年2月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:49.00元

产品编号:050205-01

序

“清华大学计算机系列教材”已经出版发行了 30 余种,包括计算机科学与技术专业的基础数学、专业技术基础和专业等课程的教材,覆盖了计算机科学与技术专业本科生和研究生的主要教学内容。这是一批至今发行数量很大并赢得广大读者赞誉的书籍,是近年来出版的大学计算机专业教材中影响比较大的一批精品。

本系列教材的作者都是我熟悉的教授与同事,他们长期在第一线担任相关课程的教学工作,是一批很受本科生和研究生欢迎的任课教师。编写高质量的计算机专业本科生(和研究生)教材,不仅需要作者具备丰富的教学经验和科研实践,还需要对相关领域科技发展前沿的正确把握和了解。正因为本系列教材的作者们具备了这些条件,才有了这批高质量优秀教材的产生。可以说,教材是他们长期辛勤工作的结晶。本系列教材出版发行以来,从其发行的数量、读者的反映、已经获得的国家级与省部级的奖励,以及在各个高等院校教学中所发挥的作用上,都可以看出本系列教材所产生的社会影响与效益。

计算机学科发展异常迅速,内容更新很快。作为教材,一方面要反映本领域基础性、普遍性的知识,保持内容的相对稳定性;另一方面,又需要紧跟科技的发展,及时地调整和更新内容。本系列教材都能按照自身的需要及时地做到这一点。如王爱英教授等编著的《计算机组成与结构》、戴梅萼教授等编著的《微型计算机技术及应用》都已经出版了第四版,严蔚敏教授的《数据结构》也出版了三版,使教材既保持了稳定性,又达到了先进性的要求。

本系列教材内容丰富,体系结构严谨,概念清晰,易学易懂,符合学生的认知规律,适合教学与自学,深受广大读者的欢迎。系列教材中多数配有丰富的习题集、习题解答、上机及实验指导和电子教案,便于学生理论联系实际地学习相关课程。

随着我国进一步的开放,我们需要扩大国际交流,加强学习国外的先进经验。在大学教材建设上,我们也应该注意学习和引进国外的先进教材。但是,“清华大学计算机系列教材”的出版发行实践以及它所取得的效果告诉我们,在当前形势下,编写符合国情的具有自主版权的高质量教材仍具有重大意义和价值。它与国外原版教材不仅不矛盾,而且是相辅相成的。本系列教材的出版还表明,针对某一学科培养的要求,在教育部等上级部门的指导下,有计划地组织任课教师编写系列教材,还能促进对该学科科学、合理的教学体系和内容的研究。

我希望今后有更多、更好的我国优秀教材出版。

清华大学计算机系教授,中国科学院院士

张钹

前 言

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。可以预见,超高速光通信技术、高速无线通信技术、云计算、物联网和移动互联网等技术的新进展会使网络技术在未来几年内产生新的飞跃,向着“更大、更快、更及时、更方便、更安全、更可管理和更有效”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。

为了使计算机网络与通信等相关专业的研究生,特别是博士研究生能够更加深入地掌握计算机网络和协议的研究现状,理解目前网络体系结构、协议和应用研究领域的最新发展,掌握计算机网络领域的基本研究方法和必要的基础理论,笔者从 2002 年起就为清华大学信息学院的研究生开设了“计算机网络前沿研究”课程。课程的内容在教学过程中不断发展,逐渐形成了由经典论文回顾、基础理论简介和前沿论文讨论组成的授课模式。主要内容围绕计算机网络的设计、建模、分析与优化展开。由于课程内容基本确定,为了更好地配合课程教学,我们着手编写了本书。

计算机网络和新一代互联网一直处于飞速发展之中,为了使学生对当前网络研究的现状有所了解,我们全面介绍了当前新一代互联网的主要研究项目,特别是从技术路线角度进行了分类总结。当前新一代互联网的发展主要可以分为革命式路线和改良式路线两大类,我们认为革命式路线在一个完全没有限制的环境下进行设计,并不一定有利于网络研究人员设计出合适的网络体系结构,也不利于互联网体系结构的稳定过渡。而单纯依赖打补丁式的改良也不能很好地满足互联网体系结构扩展性的各项需求。鉴于此,我们提出了可演进的互联网体系结构发展路线,认为互联网体系结构应该在保持现有体系结构基本核心原则不变的前提下,将革命式和改良式两种思路的优点结合起来共同解决互联网发展中面临的问题。

新一代互联网的建模、分析和优化越来越依赖于相关的基础理论,目前比较常用的理论包括微分方程、优化理论、博弈论、控制理论和随机过程。微分方程可以分析网络的动态演化,在新一代互联网体系结构设计中有重要的应用。优化理论是设计协议的重要数学工具,基于用户效用的最优化模型已经成为新型协议设计的标准模型。博弈论可以分析有冲突的实体之间的合作与冲突,在计算机网络中应用日益广泛。计算机网络可以看成是一个巨型的反馈控制系统,基于控制理论可以设计和分析计算机网络流量控制和拥塞控制算法。随机过程是网络协议分析和设计的基本理论,随机 Petri 网作为一种易于建模和分析的形式化理论,在网络设计中有着广泛的应用。

本书对这些相关理论进行了简要介绍,特别是提供了应用这些理论解决计算机网络和协议设计问题的实例(大部分实例来自本课题组的研究工作),希望通过这种理论结合应用的方式能使读者较快地熟悉这些常用理论并能够对理论在计算机网络研究中的应用有更直

观的体会。限于篇幅,本书对这些理论的介绍只能是较为粗浅的,对于感兴趣的读者或者希望用这些理论开展研究工作的读者,建议进一步阅读相关的专门著作。

有一点需要指出,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,建议读者先去阅读 Tanenbaum 教授编著的《计算机网络(第5版)》和拙作《高级计算机网络》。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体系结构的设计、建模、分析与优化,那么本书会是一个很好的选择。

我的研究生胡光武、朱敏、赵玉东、姚龙、钟宜峰、苏辉、李彤、张宇超等参与了本书的编写,协助作者做了大量文字整理工作,在此表示感谢。书中的部分研究实例来自朱敏、钟宜峰和我的共同研究成果,也包括了我已经毕业的研究生林嵩、何欢的研究成果。我要感谢我的全体研究生,能够成为他们的导师是我的荣幸。我还要感谢所有上过我的课的学生,课后同学们的掌声让我觉得一切付出都是值得的。在教学过程中同学们提出了大量的意见和建议,这促使我不断完善课程内容。

我要特别感谢任丰原和刘红英两位教授,在本书编写过程中,我深感自己在控制理论和优化理论方面的基础薄弱,向两位老师求援后,他们均欣然允诺。任丰原教授是网络控制和优化方面的专家,他编写了本书的第7章,刘红英教授在优化理论方面有非常深厚的造诣,她编写了本书的第5章。

我要感谢我所在课题组的学术带头人吴建平教授,他始终把握着我们课题组的研究方向,带领我们在新一代互联网领域努力前行。特别感谢林闯教授,林老师的批评和鼓励提升了我们的研究水平。还要感谢我的同事徐明伟、赵有健、尹霞、崔勇、张小平、刘莹、李丹、裴丹,我们就像一个大家庭一样互相支持。

我要感谢我的家人和朋友,特别是我的妻子、儿子和父母,写作本书的过程中,儿子经常会过来打断我,让我抱着他看一集《巴布工程师》,这对我何尝不是一种放松和休息!谨以本书献给他们。

感谢国家基础研究计划、国家自然科学基金委员会和国家科技重大专项多年来对作者研究工作的支持(项目编号:2009CB320501、2012CB315803、61170292、60970104、2012ZX03005001)。

虽然任丰原和刘红英两位教授参与了部分编写工作,但是本书的文责当由我一人承担。书中的错误和不足之处希望得到广大读者的指正。计算机网络领域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

2014年1月于清华园

目 录

第 1 章 计算机网络体系结构概述	1
1.1 引言	1
1.2 网络的基本概念	2
1.2.1 网络的基本组成.....	2
1.2.2 通信网络的分类.....	2
1.3 Internet 简介	4
1.3.1 Internet 发展历史	4
1.3.2 互联网发展的主要阶段.....	6
1.3.3 互联网在中国的发展.....	7
1.3.4 互联网标准化组织.....	7
1.3.5 互联网主要架构.....	8
1.3.6 互联网主要接入方式.....	9
1.4 互联网体系结构及设计	9
1.4.1 协议分层	10
1.4.2 边缘论(End-to-End Argument)	13
1.5 互联网的主要创新.....	14
1.6 新一代互联网发展现状.....	19
1.6.1 新一代互联网与 IPv6	19
1.6.2 新一代互联网体系结构基础研究及探索	21
1.7 本章小结.....	23
参考文献	24
第 2 章 互联网体系结构研究进展	26
2.1 引言.....	26
2.2 互联网体系结构发展概述.....	27
2.2.1 互联网体系结构面临的主要技术挑战	27
2.2.2 互联网体系结构发展的三种思路	31
2.3 基于改良式路线的互联网体系结构研究进展.....	33
2.3.1 位置/身份分离的 LISP 协议	33
2.3.2 安全协议 IPSec	38
2.3.3 内容分发网络	42
2.3.4 身份与位置分离的新型路由体系结构	46
2.3.5 小结	55
2.4 基于革命式路线的互联网体系结构研究进展.....	55
2.4.1 基于革命式路线的互联网体系结构研究计划	55

2.4.2	基于革命式路线的新一代互联网体系结构	59
2.4.3	小结	75
2.5	基于可演进式路线的互联网体系结构研究进展	75
2.5.1	互联网体系结构发展的两个关键问题	75
2.5.2	基于可演进式路线的互联网体系结构早期研究	78
2.5.3	可演进互联网体系结构定义	81
2.5.4	可演进互联网体系结构设计原则	82
2.5.5	可演进互联网体系结构设计路线	83
2.5.6	可演进式的互联网体系结构试验网络	85
2.6	本章小结	87
	参考文献	88
第 3 章	互联网体系结构评估模型	94
3.1	引言	94
3.2	互联网体系结构评估工作现状	95
3.2.1	基于定性分析和比较的互联网体系结构评估	95
3.2.2	基于模型的互联网体系结构评估	96
3.2.3	互联网体系结构评估工作特点总结	99
3.3	基于模型的互联网体系结构评估	99
3.3.1	互联网体系结构可服务性评估模型	100
3.3.2	互联网体系结构可扩展性评估模型	101
3.3.3	互联网体系结构可部署性评估模型	106
3.3.4	互联网体系结构可演化性评估模型	107
3.3.5	互联网体系结构可信性评估模型	108
3.3.6	小结	110
3.4	效用机制在互联网体系结构评估工作中的应用	111
3.4.1	效用的相关理论介绍	111
3.4.2	基于 ISP 的效用模型	111
3.4.3	基于用户的基本效用模型	113
3.4.4	小结	114
3.5	多学科融合的互联网体系结构评估方法	114
3.5.1	基于博弈论的互联网体系结构可部署性评估	115
3.5.2	基于最优化理论的互联网体系结构评估	116
3.5.3	小结	117
3.6	互联网体系结构可演进性评估框架	117
3.6.1	互联网体系结构可演进性评估框架	118
3.6.2	互联网体系结构可演进性评估原理	118
3.7	面向应用适应能力的互联网体系结构评估模型及应用分析	119
3.7.1	互联网体系结构应用适应能力评估模型	119
3.7.2	基于 2ACT 模型的 in-network 内容缓存机制分析	125

3.7.3 基于 2ACT 模型的组播协议评估	129
3.8 本章小结	132
参考文献	133
第 4 章 基于微分方程的互联网体系结构演化评估与实例分析	140
4.1 引言	140
4.2 微分方程在数学建模中的应用	142
4.2.1 微分方程简介	142
4.2.2 微分方程建模	143
4.3 互联网体系结构评估应用实例	146
4.3.1 互联网体系结构可部署性评估	146
4.3.2 三网融合问题建模与评估	153
4.3.3 P2P 网络的性能模型与分析	162
4.3.4 互联网点到多点传输机制的演进性评估	167
4.4 本章小结	175
参考文献	176
第 5 章 数学最优化与网络体系结构及协议设计	180
5.1 引言	180
5.2 数学最优化简介	181
5.2.1 数学最优化的描述	181
5.2.2 最优性条件	183
5.2.3 凸优化	185
5.2.4 Lagrange 对偶	188
5.2.5 梯度/次梯度投影法	190
5.2.6 最优化分解	191
5.3 分层是最优化分解	194
5.3.1 网络效用最大化	194
5.3.2 水平分解的 TCP 拥塞控制	196
5.3.3 垂直分解的协议栈设计	202
5.4 两个应用实例	209
5.4.1 LBMP: 基于对数障碍法的多径流量管理协议	210
5.4.2 基于 OSPF 的最优流量工程	214
5.5 随机和非凸网络效用最大化	224
5.5.1 随机网络效用最大化	225
5.5.2 非凸网络效用最大化	228
5.6 本章小结	228
参考文献	229
第 6 章 博弈论及其在计算机网络中的应用	234
6.1 引言	234
6.2 博弈论简介	235

6.2.1	博弈论基本概念	235
6.2.2	博弈的发展历史	242
6.2.3	博弈的表述方法	244
6.2.4	纳什均衡	246
6.3	博弈分类	248
6.3.1	静态博弈与动态博弈	248
6.3.2	完全信息博弈与不完全信息博弈	250
6.3.3	非合作博弈与合作博弈	251
6.3.4	交叉分类	252
6.4	完全信息动态博弈	252
6.4.1	子博弈精炼纳什均衡	252
6.4.2	斯塔尔伯格博弈	254
6.4.3	重复博弈	254
6.5	不完全信息静态博弈	257
6.5.1	古诺模型	257
6.5.2	贝叶斯纳什均衡	259
6.6	合作博弈	260
6.6.1	简介	260
6.6.2	纳什讨价还价解	264
6.6.3	核	267
6.6.4	支付配置的稳定集	271
6.6.5	Shapley 值	272
6.6.6	核仁	275
6.7	博弈论在计算机网络中的应用	279
6.7.1	概述	279
6.7.2	应用层组播中节点自私性防止策略研究	280
6.7.3	互联网演进中的经济适应性分析	285
6.8	本章小结	304
	参考文献	305
第 7 章	控制理论与网络系统性能优化	308
7.1	引言	308
7.2	控制理论简介	309
7.2.1	控制理论的发展历史	309
7.2.2	控制系统的组成与分类	310
7.2.3	控制系统模型	312
7.2.4	控制系统的性能分析	316
7.3	基于控制理论的网络系统性能分析与优化	324
7.3.1	网络系统中典型的闭环反馈系统	324
7.3.2	流量控制算法设计	329

7.3.3	TCP/AQM 系统的分析与设计	335
7.3.4	Web 服务器的服务质量保证	352
7.4	本章小结	355
	参考文献	356
第 8 章	随机模型与网络随机化设计原则	358
8.1	引言	358
8.2	随机过程简介和建模实例	359
8.2.1	随机过程简介	359
8.2.2	随机过程建模	362
8.3	随机 Petri 网	370
8.3.1	Petri 网模型概述	371
8.3.2	时间变迁	372
8.3.3	随机 Petri 网 (SPN)	373
8.3.4	随机 Petri 网的仿真工具	375
8.4	基于随机 Petri 网的网络系统和网络协议性能分析	375
8.4.1	分布式路由器的性能模型与分析	376
8.4.2	OSPF 协议的随机 Petri 网模型与性能分析	382
8.4.3	PIM-SM 协议的随机 Petri 网模型分析与协议改进	387
8.4.4	计算机系统与计算机网络中的动态优化	398
8.5	随机性设计原则	403
8.5.1	以太网多路访问协议	403
8.5.2	去除路由器同步	405
8.5.3	可靠组播和 IGMP	408
8.5.4	队列管理	410
8.5.5	负载均衡	412
8.6	本章小结	414
	参考文献	414
附录 A	MATLAB 简介	418
A.1	MATLAB 功能简介	418
A.2	MATLAB 的安装	418
A.3	MATLAB R2013a 操作界面简介	420
A.4	MATLAB 简单实例分析	421
A.5	MATLAB 复杂实例分析	422
	参考文献	429

第 1 章 计算机网络体系结构概述

1.1 引言

人类社会已经进入网络无处不在的信息时代,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网络设置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。一般来说,在计算机网络中总会有一部分设备专门用来传递信息,称为通信子网。除了通信功能之外,网络的另一个重要功能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。

计算机网络已经有了 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 又称网际网,是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。(The largest network of networks in the world. Uses TCP/IP protocols and packet switching. Runs on any communications substrate.)

Internet 是人类历史发展中一座伟大的里程碑,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,DNS 系统中登记的联网主机超过 9 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,使之可以成功运行并不断发展。事实上,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,也不断地有新的问题出现,这也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。

本章首先简要介绍网络的基本概念,然后,介绍 Internet 的发展历程及其在中国的发展历史以及互联网标准化组织、互联网主要组成架构和主要的接入方式,并通过对比 ISO/OSI 和 TCP/IP 两种参考模型,简要介绍互联网体系结构中最重要分层机制和端到端设计原则,之后提炼了互联网发展历史中的主要创新技术,最后对本章进行总结。

1.2 网络的基本概念

计算机网络,究竟是如何组成的,又是用什么机制进行通信的?下面简要说明网络的基本构成以及通信网络的分类。

1.2.1 网络的基本组成

对于网络的基本组成,存在若干种分类方法,在这里从逻辑的角度将网络分为边缘层和核心层,分别对应之前提到的资源子网和通信子网,当然还包括连接二者的通信链路,如光纤、铜轴电缆和无线通信信道等。网络中用来进行信息传递的部分被称为通信子网或核心层,而用于请求或提供各种服务的部分被称为资源子网或边缘层,如图 1.1 所示。

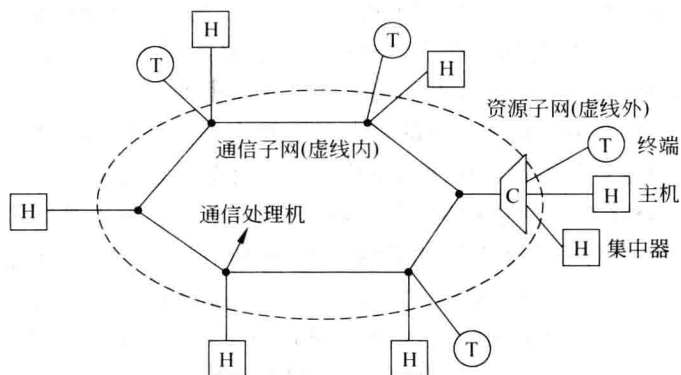


图 1.1 网络基本组成示意图

资源子网由主机和各种应用组成,资源子网通过各种媒介接入到通信子网中。终端系统处于网络的边缘,运行各种应用程序(如 Web、E-mail 等)。它们之间一般采用 C/S (Client/Server)或 P2P(Peer-to-Peer)模式进行通信。

互联网核心层由网状连接的路由器(早期称为通信处理机)等网络设备所组成,除运行路由协议外,路由器的主要功能是转发来自边缘层终端系统的数据。电路交换和数据包交换是两种主要的转发方式。

与人类的沟通方式类似,计算机网络中的协议是计算机沟通的标准,所有的计算机之间的通信都由网络协议规定。网络协议定义了计算机间通信报文的格式、报文顺序、收发实体以及收发报文后应采取的行为等。

1.2.2 通信网络的分类

根据通信方式的不同,可以将通信网络划分成基于交换的通信网络和基于广播的通信网络两类。前者又可细分为电路交换网络和数据包交换网络,而数据包交换网络又可以再继续分为数据报和虚电路通信方式,如图 1.2 所示。

1. 广播通信网络

在广播通信网络中(如以太网),采用共享的广播介质进行通信,因此任意节点间都可以互相收发消息,存在的问题是当多个节点同时使用信道时会产生竞争,需要设计协调机制。

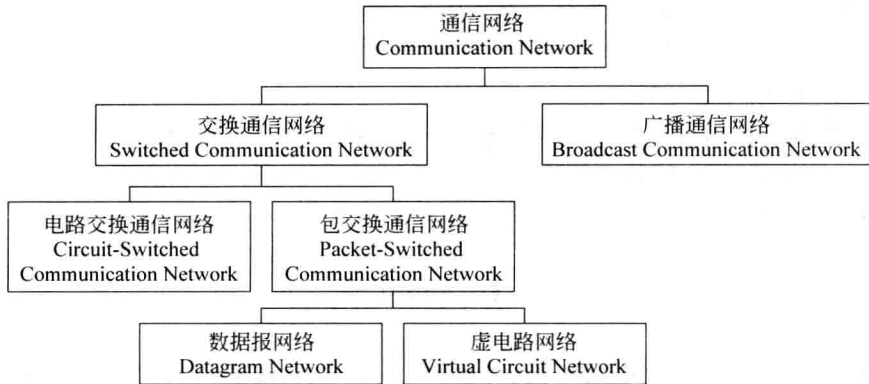


图 1.2 通信网络分类示意图

2. 交换通信网络

与广播通信网络不同,交换通信网络中有特定的设备(例如路由器)完成数据转发,需要解决的问题是如何将数据转发至目标节点。

3. 电路交换通信网络

端系统进行数据传输之前,必须首先进行链路的申请和预留,在传输过程中该链路一直被占用,直至传输完成并释放,其他端系统不得使用。它将链路带宽分成若干小块,通过频分复用和时分复用技术提高链路使用效率。电话网络和 ISDN 网络就是两种典型的电路交换网络。

4. 包交换通信网络

与电路交换无法共享链路不同,数据包交换技术将数据分成若干数据包(packet),无须通过申请和预留,每个包都可以使用整个链路带宽,通过存储转发机制从一跳传输到下一跳,直至目的地。通过排队和拥塞控制防止链路和路由器负载过高。通过统计时分复用技术和波分复用技术提高带宽利用效率。数据包交换从具体应用来说,又可以分为面向连接的虚电路和无连接纯数据报交换两种交换方式。

5. 虚电路网络

虚电路(virtual circuit)交换与电路交换类似,数据传输是面向连接的,在数据传输时必须预先建立一个连接,但这种连接是基于共享线路的,而不像电路交换中的连接需要独占线路。虚电路交换也分成 3 个阶段:建立连接、数据传输和拆除连接。虚电路网络的数据传输仍然采用数据包转发的方式。

虚电路是一种面向连接的数据交换方式,它既不像电路交换那样需要独占线路,而是采用共享线路方式来建立连接,通过存储-转发方法实现数据交换;又不同于数据报方式,只是在建立虚电路时选择一次路由,后续的各个数据包只要使用该路由传送即可,无须重新选择路由。

6. 数据报网络

数据报(datagram)交换在数据传输时不需要预先建立连接,当发送端有一个较长的报文要发送时,首先将报文分解成若干个较小的数据单元,每个数据单元都附加一个分组头并封装成分组(或称数据报,和数据包含义相同),然后将各个分组发送出去。每个分组都独立

传输,中间节点可能为不同分组选择不同的路由,因此这些分组到达目的端的顺序可能与发送的顺序不同,目的端必须负责重新排序分组,组装成一个完整的原始报文。IP 网络就是一种典型的数据报交换网络。

电路交换方式和包交换方式的延时构成有很大区别,电路交换主要包括传输延时(由接口速率决定)和传播延时(由传输距离决定),而包交换方式除了上述延时之外,还增加了排队延时。在很多情况下,排队延时会占总延时的较大比例。

1.3 Internet 简介

Internet 是一个全球性的、通用的、异构的、使用 IP 协议进行通信的公共计算机网络。Internet 自 20 世纪 70 年代诞生以来,已经历 40 多年的历史,不断发展壮大,目前已经成为人类社会最重要的信息基础设施。下面简要介绍其发展历史。

1.3.1 Internet 发展历史

本节简要回顾 Internet 的发展历史,更详细的资料可以参考文献[2]、[14]和[17]。

从某种意义上说,Internet 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,其他指挥点仍能正常工作,并且这些指挥点之间能够绕过那些已被摧毁的指挥点继续保持联系。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/ARPA)委托 BBN 公司建立了一个名为 ARPANET 的网络,这个网络把加州大学洛杉矶分校、加州大学圣芭芭拉分校、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,通过专门的通信处理机(IMP)和专门的通信线路相互连接。这个 ARPANET 就是 Internet 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。

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,这种方法就是人们熟悉的 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。

至 1974 年,IP(Internet 协议)和 TCP(传输控制协议)问世,合称 TCP/IP 协议^[25]。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推动了 Internet 迅速发展。

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, ARPANET 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 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), 它允许该网络中的任何用户把信息(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 Mailing List(电子邮件群); 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 56kbps 的通信线路连接形成 NSFNET 的雏形。1987 年 NSF 就 NSFNET 的升级、营运和管理公开招标, 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(1.5Mbps), 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广泛连接等真正成为 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 当作一种交流与通信的工具, 而不仅仅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 World Wide Web(WWW)。

WWW 技术的出现带来了 Internet 的大发展,从此 Internet 进入了高速增长的时期。

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 1.3 所示^[2]。据 ITU 的统计,截至 2012 年 6 月,全球互联网用户数已达 24 亿,而中国的互联网用户数已超 4.5 亿。

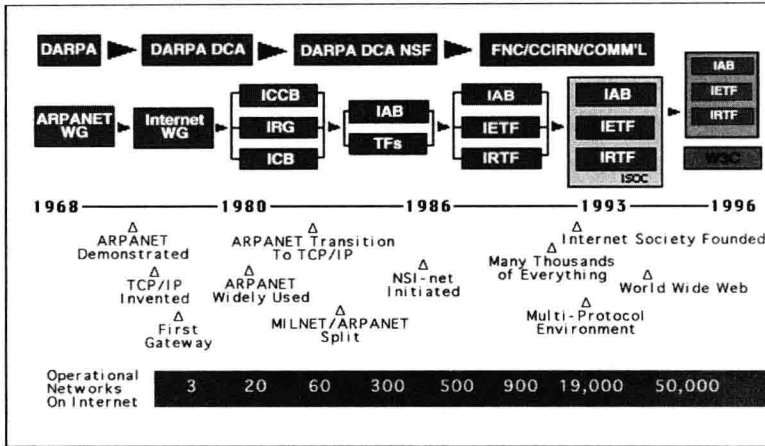


图 1.3 互联网发展时间表

1.3.2 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 最初只是一个单一的分组交换网,后来 ARPA 研究多种网络互连的技术,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。

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,它是一个三级结构的计算机网络,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 的机构收费。1993 年 Internet 主干网的速率提高到 45Mbps(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(Internet Service Provider,互联网服务提供商)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