

计 算 机 科 学 丛 书

 Harcourt

(原书第2版)

高性能 通信网络

High-Performance
Communication
Networks
Second Edition

(美) Jean Walrand 著
Pravin Varaiya

加州大学伯克利分校

张艳 孙瑞志 姜进磊 等译
史美林 校



机械工业出版社
China Machine Press



MORGAN
KAUFMANN

计算机科学丛书

高性能通信网络

(原书第2版)

(美) Jean Walrand Pravin Varaiya 著
(加州大学伯克利分校)

张 艳 孙瑞志 姜进磊 等译
史美林 校



机械工业出版社
China Machine Press

Jean Walrand, Pravin Varaiya: High-Performance Communication Networks, Second Edition.
ISBN: 1-55860-574-6

Copyright © 2000 by Morgan Kaufmann. All rights reserved.

Copyright © 2000 by Harcourt Asia Pte Ltd. All rights reserved.

Printed in China by Harcourt Asia Pte Ltd. under special arrangement with China Machine Press. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体字版由 Harcourt Asia Pte Ltd. 授权机械工业出版社在中国大陆境内独家发行。本版仅限在中国境内（不包括香港特别行政区及台湾）出版及标价销售。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

Harcourt Asia Pte Ltd.

583 Orchard Road, # 09-01 Forum, Singapore 238884

Tel: (65) 737-3593 Fax: (65) 734-1874

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

本书任何部分之文字及图片，如未获得本公司之书面同意不得用任何方式抄袭、节录或翻印。

本书版权登记号：图字：01-2000-2821

图书在版编目（CIP）数据

高性能通信网络（原书第2版）/（美）沃兰德（Walrand, J.）,（美）瓦利亚（Varaiya, P.）著；张艳等译. —北京：机械工业出版社，2002.2

（计算机科学丛书）

书名原文：High-Performance Communication Networks, Second Edition

ISBN 7-111-09445-X

I. 高... II. ①沃... ②瓦... ③张... III. 计算机通信网 IV. TN915

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2001）第 084565 号

机械工业出版社（北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：温丹丹

北京市密云县印刷厂印刷 · 新华书店北京发行所发行

2002 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16 · 30 印张

印数：0 001-5 000 册

定价：55.00 元

凡购本书，如有倒页、脱页、缺页，由本社发行部调换

出版者的话

文艺复兴以降，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域中取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，计算机学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭橥了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的计算机产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对计算机教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短、从业人员较少的现状下，美国等发达国家在其计算机科学发展的几十年间积淀的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀计算机教材将对我国计算机教育事业的发展起积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章图文信息有限公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年始，华章公司就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过几年的不懈努力，我们与Prentice Hall, Addison-Wesley, McGraw-Hill, Morgan Kaufmann等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从它们现有的数百种教材中甄选出Tanenbaum, Stroustrup, Kernighan, Jim Gray等大师名家的一批经典作品，以“计算机科学丛书”为总称出版，供读者学习、研究及度藏。大理石纹理的封面，也正体现了这套丛书的品位和格调。

“计算机科学丛书”的出版工作得到了国内外学者的鼎力襄助，国内的专家不仅提供了中肯的选题指导，还不辞劳苦地担任了翻译和审校的工作；而原书的作者也相当关注其作品在中国的传播，有的还专诚为其书的中译本作序。迄今，“计算机科学丛书”已经出版了近百个品种，这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍，为进一步推广与发展打下了坚实的基础。

随着学科建设的初步完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外计算机教材的需求和应用都步入一个新的阶段。为此，华章公司将加大引进教材的力度，在“华章教育”的总规划之下出版三个系列的计算机教材：针对本科生的核心课程，剔抉外版菁华而成“国外经典教材”系列；对影印版的教材，则单独开辟出“经典原版书库”；定位在高级教程和专业参考的“计算机科学丛书”还将保持原来的风格，继续出版新的品种。为了保证这三套丛书的权威性，同时也为了更好地为学校和老师服务，华章公司聘请了中国科学院、北京大学、清华大学、国防科技大学、复旦大学、上海交通大学、南京大学、浙江大学、中国科技大学、哈尔滨工业大学、西安交通大学、中国人民大学、北京航空航天大学、北京邮电大学、中山大学、解放军理工大学、郑州大学、湖北工学院、中国国家信息安全测评认证中心等国内重点大学和科研机构在计算机的各个领域的著名学者组成“专家指导委员会”，为我们提供选题意见和出版监督。

“计算机科学丛书”的出版工作得到了国内外学者的鼎力襄助，国内的专家不仅提供了中肯的选题指导，还不辞劳苦地担任了翻译和审校的工作；而原书的作者也相当关注其作品在中国

的传播，有的还专诚为其书的中译本作序。迄今，“计算机科学丛书”已经出版了近百个品种，这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍，为进一步推广与发展打下了坚实的基础。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证，但我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。教材的出版只是我们的后续服务的起点。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方法如下：

电子邮件: hzedu@hzbook.com

联系电话: (010) 68995265

联系地址: 北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码: 100037

专家指导委员会

(按姓氏笔画顺序)

尤晋元
石教英
张立昂
邵维忠
周克定
郑国梁
高传善
裘宗燕

王 珊
吕 建
李伟琴
陆丽娜
周傲英
施伯乐
梅 宏
戴 葵

冯博琴
孙玉芳
李师贤
陆鑫达
孟小峰
钟玉琢
程 旭

史忠植
吴世忠
李建中
陈向群
岳丽华
唐世渭
程时端

史美林
吴时霖
杨冬青
周伯生
范 明
袁崇义
谢希仁

译者序

20 世纪 90 年代以来，日新月异的信息技术给人类的工作、学习、生活的方方面面都带来了深刻的变革。可以说，它引发了人类社会的信息革命，而计算机技术与通信技术相融合形成的计算机网络技术更是大大推进了这一革命。似乎就在一夜之间，地球变小了，人们的距离拉近了。人们对网络的延伸能力叹为观止，因为它延伸的不仅仅是人的四肢，它还能够延伸人的沟通能力和思维能力。网络影响的不只是人们的物质生活，还影响人们的精神生活。

企业信息化、电子商务、远程教育、远程医疗的出现都离不开网络的发展，或者说，正是网络催生了这些新兴事物并为它们提供了底层的支撑平台。近几年来，网络技术发展十分迅猛。同目前已出版的很多网络方面的书籍相比，本书较为全面地介绍了网络技术，如网络的发展及网络发展的经济驱动，并且从通信科学、运筹学和经济学等学科的角度讨论网络中的相关问题，旨在帮助读者从多种角度把握网络中的诸多问题。

本书的作者从事网络方面的教学和研究工作已有 20 余年，他们既有深厚的理论功底，又有丰富的实践经验。早在 1995 年，他们就编写了本书的第 1 版，并获得了业内相关人士的一致好评。5 年后，网络技术又向前迈进了一大步，针对第 1 版的不足，作者及时进行了修订，重点增添了第 1 版中涉及较少或者未加论述的无线通信技术和光通信技术。

本书第 1、5 章由吴嫣翻译，第 2、4 章由孙瑞志翻译，第 3、12 章由周建涛翻译，第 6 章由苗春雨翻译，第 7 章由张凯捷翻译，第 8、13 章由杨武勇翻译，第 9、11 章由姜进磊翻译，第 10 章由张艳翻译，全书最后由史美林审校。史美林和张艳组织了全书的翻译工作。

由于本书涉及的技术很新且具有跨学科的特性，译者的水平也有限，所以难免有错误和不当之处，敬请读者见谅并给我们提出宝贵意见。

译者

2001 年 3 月

前言

自 1995 年我们编写本书第一版至今，网络世界已经发生了翻天覆地的变化。“在线”与“Web”成为互联网时代耳熟能详的词汇，蜂窝电话变得像固定电话一样普通。1998 年，以“快速”闻名的 56 Kbps 调制解调器很快被访问速率高达 Mbps 的家用有线电视网和 ADSL 超越。而在工作单位，100 Mbps 的以太网也已投入使用。

当今网络会聚的进程正在进行，有线电视运营商和提供数字网络的电话公司从中获利达数十亿美元。服务提供者与设备制造商将在服务质量（QoS）方面进行激烈的竞争，这将决定 ATM 网络和 IP 网络的未来。

无线通信技术的进步将很快把在任何时间、任何地点的通信变成现实。十年之内，光纤会使网络的带宽出现数量级的增长。这些技术上的进展将支撑网络在整个 20 世纪 90 年代的繁荣。它们带来的社会效应很难预测，但技术发展势不可挡。我们写第 2 版是为了阐释这些方面和相关的技术进展，其中有些是未曾预料到的，而另一些在 1995 年已出现。

本书的读者群

本书的独特之处在于它全面论述了主要的通信网络，包括数据网、电话网、有线电视网及无线网。我们描述了创建这些网络的技术，解释了运营这些网络所需的协议和控制机制，分析了控制其使用与发展的经济规律。本书主要针对希望对网络作如此全面了解的专业人员和学生。

业界的专业人员，对于网络在他们的组织中所扮演的广泛角色，必须评估自己的决策。他们中有的网络工程师、计算机专家及其管理人员；有的是公司网络的管理人员和行政主管；有的是从事网络设计和操作或升级网络基础设施的运筹学工程师和系统工程师。他们要做出决策，必须熟悉可供选择的多种技术并能对其性能做出评价，而且需要把握技术革新的进程和方向。我们相信本书能给予他们这样的帮助。

本科高年级的学生和研究生开始学习电子工程、计算机科学和运筹学，于是他们“触网”了。他们为网络所吸引，因为要考虑到今后求职，或是专业需要（如通信、软件工程及控制学等专业）。这部分学生至多上过一门网络方面的课程，但也可能没上过。本书能满足学生的不同要求，给他们提供一个比其他网络书籍更宽的视角、更深入的阐述。

这两类读者间的差异其实是很小的。今天的专业人士昨天曾在校园里读书，而日新月异的技术可能使他们明天又成为学生。要紧跟技术发展的步伐需要通观全局，我们相信本书能满足这一需要。

方法

我们从事网络方面的研究已有 20 年。在过去的 15 年里，我们开设了一门介绍网络的研究生课程，学生的专业主要是电子工程、计算机和运筹学。我们也连续 10 多年为电信行业

的专业人员及负责公司网络的管理人员开设短期培训班。在过去 5 年，我们同业界也有着十分紧密的联系，我们既担任顾问和技术顾问（PV，JW）也当了企业家（JW）。最后，研究、教学和行业实践中的经验促成了本书的完成。这三方面的经历都让我们体会到，对网络既需要有一个综合的把握，也需要从多个视角去看待和分析问题。

大多数书籍都仅用单一的观点去讲述网络，涉及的主题范围也比较狭窄。特别典型的就是那些通过描述相关协议论述 Internet 或 ATM 网络的书。有的书将网络视为队列模型，其运行就用一堆路由算法和队列分析来解释。有的书通过阐述形成网络的相关技术，如用无线通信、光纤、交换等来描述网络。

本书全面地介绍了网络，讨论了网络是通信工程、计算机科学、运筹学以及经济学等学科的综合产物，我们就其必然性进行了阐述。我们在论述中尽量避免使用这些学科的高级概念。我们希望读者能从这些多样性的观点中获得更大的收获和关于网络的诸多问题的更深理解，如怎样构成网络，怎样使用网络，谁会为之付费。我们以直观的方式讨论网络性能与控制方面的问题，同时也单独用一章给出了严格的数学论证。

第 2 版的增色之处

除了纠正了第 1 版的错误和更新部分内容以外，我们认为第 2 版主要在以下四方面得到了较大提高。第一，在第 1 版中，Internet 仅仅简单地被视为分组交换网络的一个实例。现在，关于 Internet 有了一个更为全面的认识，包括 TCP/IP 协议族、提高性能和保证、服务质量的相关技术进步等。

第二，对第 1 版中未予讨论的无线通信问题，进行了充分的探讨。无线电话接入日益增长的重要性及其用于数据传输的潜力决定了无线通信必将受到重视。

第三，最近 5 年在波分复用和波长选择交换方面的迅猛发展使得网络进入了光纤时代。这些进展将最终改变网络设计、运行及相关经济问题的基础。

最后，QoS 将成为服务提供者竞争的重要方面。在网络运行时，提供服务质量保证也是进行服务集成的一大关键。在第 2 版中，QoS 的经济学问题和保证 QoS 的相关机制得到了足够重视。

内容提要

我们按照章节逐一给出概要，指出新版中的改动。第 1 章简单回顾了网络的发展史，同时解释了一些网络原理，增添了近期对于电信产业的规模、发展及趋势的预测。第 2 章介绍了如何通过分层体系结构提供网络服务，新增了驱动网络需求的应用背景。

第 3 章讨论了使用 OSI 模型的分组交换网及其在局域网中的重要应用。100 Mbps 以太网的引入以及使用智能以太网交换机替代原来的以太网集线器，可以建立虚拟局域网（VLAN），并且使企业组网技术发生了巨大改变。本章新增部分讨论了这些技术创新和千兆以太网。

第 4 章集中讨论了统一看待 Internet 和 TCP/IP 网络的问题。该章还讨论了 Internet 技术的进展，包括寻址、快速交换、TCP/IP 协议族的改进以及为更好地控制而建议采用的新协议。

第 5 章的主题是电路交换网。SONET 正持续得到重视，而增加的部分中最为重要的是

对宽带网的讨论，包括有线电视和 ADSL 以及欧洲提议的推进无源光纤网的各种建议。这些技术的推广将促进宽带网业务的商业发展。

第 6 章结合近期的工作更新了对 ATM 的介绍，包括网络互联协议 MPOA 以及对 PNNI 路由和 UNI 信号控制的详述。这些工作重点在 ATM 网对 IP 的更为有效的支持。而 ATM 和 IP 如何通过竞争和协作来保证 QoS 仍有待解决。

在过去的 5 年中，无线网技术在全世界迅猛发展。起初，无线网技术还只应用于语音和短信息的传输，随后它开始被用来进行数据传输。第 7 章阐述了无线链路的特征及其对网络技术提出的挑战。同时还讨论了为什么无线网是分散的以及无线网技术被数据业务的广泛采用仍然是不确定的，这与有线网久为人知的集中性大相径庭。

围绕网络性能和网络控制问题，第 8 章进行了一般性讨论，第 9 章进行了数学推导，讨论涉及了电路交换网、分组交换网和 ATM 网。同时还讨论了为保证 QoS 而进行的资源分配（包括带宽和优先级分配）技术，采用的窗口和传输率控制算法也在这里做了介绍。其中有关拥塞控制的处理很有创新性。

第 10 章重点讨论经济学问题，现主要基于网络服务的需求进行阐述。要保证 QoS 需要对 QoS 分类并给出定价，这与当前网络接入的均价计费策略大不相同。本章还分析了用户对服务质量的评价及愿意支付的价格。这些分析数据来自对伯克利校园始于 1998 年 4 月的通信市场实验。

5 年前，波分多路复用技术（WDM）仅限于实验室演示。今天，主干网的光纤链路由于采用 WDM 技术而得以升级。具有 1 Tbps 速率的 WDM 链路（相当于当前 Internet 流量总和）将于明年投入市场。10 年内，光纤路由和交换方面的技术进展也会在所有的光纤网络中得到应用。这些技术的应用将导致网络传输速率达到更高的数量级，而成本的增加甚少。同时还会引发另一场通信领域的革命。WDM 技术和光纤交换在第 11 章进行讨论，第 1 版中对于光链路的讨论在此被缩减。

第 12 章更新了快速分组交换网的相关讨论，补充了有关组播和快速表搜索的近期工作。第 13 章改写了对未来网络技术做了新的展望。

如何使用本书

本书可被业界的专业人士使用，也可用来做本科生和研究生的教材。专业人员可通过参考有关章节而了解特定技术的进展。同时，本书的第 1~3 章或第 4、6 章可作为计算机系的本科生教材，第 5、7 章可作为电子工程系的学生教材。

参考资料

我们讲课时充分地利用了书中的图形。可从 <http://www.mkp.com> 获得这些插图的后script 格式的文件。

本书每一章的最后均有习题，用以测试读者对本章内容的理解情况，引导他们在实践中运用这些知识。我们将继续增加这种练习题，并在网站上公布。

目 录

出版者的话	
专家指导委员会	
译者序	
前言	
第1章 概述	1
1.1 通信网络发展史	3
1.1.1 电话网络	4
1.1.2 计算机网络	6
1.1.3 有线电视网络	11
1.1.4 无线网络	13
1.2 网络要素	14
1.2.1 数字化	14
1.2.2 规模经济	15
1.2.3 网络外部特性	16
1.2.4 业务集成	17
1.3 网络的发展前景	17
1.3.1 Internet	18
1.3.2 纯ATM网络	19
1.3.3 有线电视	19
1.3.4 无线网络	19
1.3.5 最后的获胜者	20
1.4 小结	20
1.5 注释	21
习题	22
第2章 网络服务与层次体系结构	25
2.1 应用	26
2.1.1 万维网	26
2.1.2 音频流和视频流	27
2.1.3 基于分组的语音以及视频会议	27
2.1.4 连网游戏	27
2.1.5 客户/服务器	27
2.2 通信量特性和服务质量	27
2.2.1 恒定比特率	28
2.2.2 可变比特率	29
2.2.3 报文	29
2.2.4 其他需求	29
2.3 网络服务	29
2.3.1 面向连接的服务	30
2.3.2 无连接服务	30
2.4 高性能网络	30
2.4.1 通信量增长	30
2.4.2 高性能	31
2.5 网络的各种元素	31
2.5.1 主要网络元素	32
2.5.2 网络元素与服务特性	33
2.5.3 举例	33
2.6 基本网络机制	35
2.6.1 多路复用	36
2.6.2 交换	39
2.6.3 差错控制	42
2.6.4 流控	48
2.6.5 拥塞控制	49
2.6.6 资源分配	49
2.7 分层体系结构	50
2.7.1 层次	50
2.7.2 层次的实现	51
2.8 开放数据网络模型	53
2.9 网络体系结构	56
2.10 网络瓶颈	57
2.11 小结	58
2.12 注释	59
习题	59
第3章 分组交换网	65
3.1 OSI模型和IP模型	65
3.1.1 第一层:物理层	65
3.1.2 第二层:数据链路层	66
3.1.3 第二层2a子层:介质访问控制	67
3.1.4 第二层2b子层:逻辑链路控制	68
3.1.5 第三层:网络层	69
3.1.6 第四层:传输层	70

3.1.7 第五层:会话层	71	4.8 注释	128
3.1.8 第六层:表示层	71	习题	128
3.1.9 第七层:应用层	72	第5章 电路交换网络	133
3.1.10 OSI模型和IP模型总结	72	5.1 电路交换网络的性能	134
3.2 以太网	73	5.2 SONET	137
3.2.1 物理层	73	5.3 密集波分复用	145
3.2.2 MAC	75	5.4 光纤到家庭	146
3.2.3 LLC	77	5.4.1 光纤环路载波系统	147
3.2.4 局域网互连	78	5.4.2 无源光网络	148
3.3 令牌环网	81	5.4.3 无源光子环	150
3.3.1 物理层	81	5.4.4 混合方案	150
3.3.2 MAC	82	5.5 数字用户线路	151
3.3.3 LLC	83	5.5.1 ISDN	151
3.4 FDDI	83	5.5.2 ADSL	153
3.5 DQDB	87	5.6 智能网络	156
3.6 帧中继	89	5.6.1 业务举例	156
3.7 SMDS	91	5.6.2 智能网络体系结构	158
3.8 小结	95	5.6.3 功能组件	159
3.9 注释	96	5.7 CATV	159
习题	96	5.7.1 布局	160
第4章 Internet与TCP/IP网络	100	5.7.2 CATV分层网络	161
4.1 Internet	100	5.7.3 CATV提供的业务	162
4.2 Internet协议概述	101	5.7.4 MPEG	163
4.3 Internet协议	103	5.8 小结	164
4.3.1 IPv4	103	5.9 注释	165
4.3.2 组播IP	112	习题	165
4.3.3 可靠组播	113	第6章 异步传输模式	168
4.3.4 移动IP	113	6.1 ATM的主要特征	169
4.3.5 IPv6	114	6.1.1 面向连接的服务	169
4.4 TCP与UDP	115	6.1.2 固定信元大小	171
4.4.1 应用	117	6.1.3 统计多路复用	174
4.4.2 FTP	118	6.1.4 资源分配	175
4.4.3 SMTP、rlogin、TFTP和 HTTP	118	6.2 寻址、信号发送和路由	176
4.5 Internet的成功和局限	119	6.2.1 ATM寻址	176
4.6 TCP/IP网络的性能	120	6.2.2 信号发送	177
4.6.1 TCP中的窗口尺寸调整	121	6.2.3 PNNI路由	178
4.6.2 对TCP的改进建议	122	6.3 ATM信元头部结构	181
4.6.3 对IP的改进建议	123	6.3.1 VCI和VPI	182
4.6.4 排队算法	123	6.3.2 其他字段	184
4.6.5 标号交换	124	6.3.3 保留的VCI/VPI	184
4.6.6 对其他协议的改进建议	125	6.4 ATM适配层	185
4.7 小结	127	6.4.1 类型1	186
		6.4.2 类型2	186

6.4.3 类型 3/4	186	7.5.4 网际互连	222
6.4.4 类型 5	187	7.5.5 安全	223
6.5 管理与控制	187	7.5.6 无线网络设计的新模式	223
6.5.1 容错管理	188	7.6 今天的无线网络	224
6.5.2 传输和拥塞控制	190	7.6.1 蜂窝电话系统	224
6.5.3 网络状态监视和配置	190	7.6.2 无绳电话	227
6.5.4 用户/网络信令	192	7.6.3 无线局域网	228
6.6 BISDN	192	7.6.4 广域无线数据服务	228
6.7 用 ATM 网络实现互连	193	7.6.5 寻呼系统	229
6.7.1 AAL5 上的多协议封装	194	7.6.6 卫星网络	229
6.7.2 在 ATM 上实现 LAN 仿真	194	7.6.7 其他无线系统和应用	230
6.7.3 ATM 上的 IP	195	7.7 未来的系统和标准	230
6.7.4 ATM 上的多协议	198	7.7.1 无线局域网	230
6.7.5 ATM 上的 FR 和 SMDS	198	7.7.2 无线自组网	231
6.8 小结	198	7.7.3 IMT-2000	231
6.9 注释	199	7.7.4 高速数字蜂窝	232
习题	199	7.7.5 固定无线访问	232
第 7 章 无线网络	201	7.7.6 HomeRF 与蓝牙	233
7.1 简介	201	7.8 小结	233
7.1.1 无线网络的历史	201	7.9 注释	233
7.1.2 无线通信的前景	203	习题	234
7.1.3 技术难点	206	第 8 章 网络控制	236
7.2 无线信道	207	8.1 控制目标和方法	237
7.2.1 通路损失	208	8.1.1 概述	237
7.2.2 屏蔽衰减	209	8.1.2 控制方法	237
7.2.3 多路平直衰减和符号间干涉	209	8.1.3 时间尺度	238
7.2.4 多普勒频移	211	8.1.4 举例	239
7.2.5 干涉	211	8.1.5 服务质量	240
7.2.6 红外与无线电比较	212	8.2 电路交换网络	241
7.2.7 无线信道的容量限制	212	8.2.1 阻塞	241
7.3 链路层设计	213	8.2.2 路由最优化	243
7.3.1 调制技术	213	8.3 数据报网络	245
7.3.2 信道编码和链路层重传	214	8.3.1 排队模型	245
7.3.3 平直衰减的解决措施	214	8.3.2 关键的排队结果	246
7.3.4 符号间干涉的消除方法	215	8.3.3 路由最优化	247
7.4 信道访问	217	8.3.4 拥塞控制	251
7.4.1 多路访问	217	8.4 ATM 网络	255
7.4.2 随机访问	218	8.4.1 控制问题	255
7.4.3 频谱规则	220	8.4.2 确定性的方法	256
7.5 网络设计	220	8.4.3 统计过程	263
7.5.1 体系结构	220	8.4.4 确定性的过程还是统计性的 过程	274
7.5.2 移动管理	221	8.5 小结	276
7.5.3 网络可靠性	222		

8.6 注释	277	10.4.4 INDEX 定价与服务供给的灵 活性	337
习题	277	10.5 对单一资源的定价	337
第 9 章 网络控制的数学基础	280	10.5.1 基于用量的计费	339
9.1 马尔可夫链	280	10.5.2 拥塞费	341
9.1.1 概述	280	10.5.3 成本回收及最佳链路容量	343
9.1.2 离散时间	280	10.6 ATM 服务的定价问题	344
9.1.3 连续时间	284	10.6.1 关于 ATM 的资源和服务的一个 模型	345
9.2 电路交换网络	288	10.6.2 收入最大化	348
9.2.1 单交换机	288	10.7 小结	349
9.2.2 网络	290	10.8 注释	350
9.3 数据报网络	293	习题	350
9.3.1 M/M/1 队列	293	第 11 章 光网络	352
9.3.2 离散时间队列	294	11.1 光链路	353
9.3.3 Jackson 网络	297	11.1.1 发射器	353
9.3.4 MMF 源的缓冲区占用	299	11.1.2 接收器	354
9.3.5 阻塞概率的不敏感性	302	11.1.3 光纤	355
9.4 ATM 网络	303	11.1.4 副载波复用	361
9.4.1 确定性方法	303	11.2 WDM 系统	362
9.4.2 独立同分布随机变量的大 偏差	306	11.3 光交叉连接	363
9.4.3 直线大偏差	309	11.4 光局域网	365
9.4.4 队列的大偏差	310	11.4.1 单跳局域网	365
9.4.5 Bahadur-Rao 定理	313	11.4.2 多跳局域网	367
9.5 小结	314	11.5 光通道与网络	368
9.6 注释	315	11.5.1 静态波长分配	368
习题	315	11.5.2 动态波长分配与阻塞	370
第 10 章 网络经济学	319	11.5.3 环网	370
10.1 网络服务派生的需求	320	11.5.4 层次网状网络	371
10.1.1 信息商品	321	11.5.5 光网络	372
10.1.2 区位地租	321	11.6 小结	372
10.2 Internet 服务提供者	322	11.7 注释	372
10.2.1 一个用户需求模型	323	习题	373
10.2.2 经验证据	326	第 12 章 交换	375
10.3 网络计费: 理论与实现	329	12.1 交换机的性能指标	375
10.3.1 一个资源模型	329	12.2 时分交换和空分交换	378
10.3.2 经济原理	330	12.3 模块化交换机设计	379
10.3.3 实际收费情况	331	12.4 分组交换	384
10.3.4 Internet 的脆弱性	332	12.5 分布式缓冲区	387
10.4 一套用于 Internet 连接的计费及供给 系统	333	12.5.1 热点的影响	390
10.4.1 用户体验	333	12.5.2 输入缓冲区	391
10.4.2 对不同质量的需求	334	12.5.3 热点竞争	394
10.4.3 INDEX 计费及供给系统	335	12.5.4 组播	396

12.6 共享缓冲区	396	13.2 技术领域	407
12.6.1 组播	397	13.2.1 体系结构	408
12.6.2 排队分析	398	13.2.2 连网	409
12.7 输出缓冲区	398	13.2.3 信号处理	409
12.7.1 组播	399	13.2.4 应用软件	409
12.7.2 淘汰式交换机	399	13.3 急待解决的问题	410
12.8 输入缓冲区	400	13.3.1 体系结构	410
12.8.1 HOL 阻塞	400	13.3.2 服务质量	411
12.8.2 克服 HOL 阻塞	402	13.3.3 可移动性	413
12.8.3 组播	403	13.3.4 异构性	415
12.9 小结	403	13.3.5 可伸缩性和可配置性	416
12.10 注释	404	13.3.6 可扩展性和复杂性管理	417
习题	404	13.3.7 安全性	418
第 13 章 展望全球多媒体网络	406	参考文献	419
13.1 全球网络的性质	406	索引	429

第 1 章 概 述

信息技术正在改变着世界经济、社会以及我们的日常生活。这种巨大的变化源于新技术的创新以及传统工业的发展和重组，应用新技术的各个行业也将发生变化。新的商业模式已经形成，而传统的经验将逐步被摒弃。商品组成、服务种类、投资方向和技术工人都发生着重大变化，政府以及其他组织尽量适应这些变化。我们大部分人的日常工作和娱乐方式以及我们和其他人交往的方式也在改变，比如我们有意识或者无意识地从 WWW 获取新机会。

电信行业 根据国际电信联盟（International Telecommunication Union, ITU）的统计，1998 年全球电信设备和服务的贸易总额达到了 1 万亿美元，贸易额每年增长 7%，是世界经济增长率的两倍。国际业务量在 1990 年至 1996 年之间翻了一番，达到了每分钟 700 亿个记录。

光纤通信技术的进步以及激烈的竞争大大降低了原始带宽的费用。根据英国电信的报告，每条跨太平洋的语音线路设备的安装费用从 1975 年的 73 000 美元降到 1996 年的 2 000 美元；而到了 1999 年大约只有 200 美元；到 2010 年可能仅为 5 美元左右。由美国到欧洲三分钟电话的平均费用在 5 年内从 4 美元跌到 1998 年的 1.5 美元，到 2000 年大约只需要 50 美分。通话量的需求不仅仅局限于此。1996 年安装了 4 800 万条新的固定线路，这样全球范围内已安装的通信线路达到了 74 100 万。蜂窝电话的使用者在 1997 年增加了 50%，1998 年达到了 2 亿。

通信量的组成正在发生着变化。网络上计算机的数量从 1993 年初的 100 万台增加到 1995 年的 500 万台，1997 年的 1 600 万台，到 1999 年已超过 5 000 万台。Internet 协会估计 Internet 用户的数量在 2000 年将达到 3 亿，这个数目相当于世界人口的 5%。在 2047 年，世界人口将达到 110 亿，如果 25% 的人接入 Internet，则网络用户将达到 30 亿人。跨越大西洋的业务量每年在成倍的增长，1997 年 9 月超过了语音电话的业务量。到了 2000 年，将占有所有业务量的 75%。有着 100 年历史的电话工业将随着时代的变化而变革。

来自用户、供应商及全球反垄断活动的压力，迫使电信的垄断时代宣告结束。1997 年世界贸易组织就电信服务达成协议，占全球 90% 以上通信业务的 69 个国家签署了协议，号召在 2000 年甚至更早的时候，开放所有的电信市场。1998 年 1 月，欧洲大部分电信市场的开放引入了更多的参与者和更多的投资。其实，早在 1996 年美国电信法案就已预测到这种发展。

1996 年的法案影响仍然在起作用。世界上最大的长途通信商 AT&T 收购了两个大型的有线电视公司 TCI 和 MediaOne 后，拓展了新的业务，这是 AT&T 成为电视、数据和电话综合业务提供商战略的一部分。一些在线服务提供商正在向 AT&T 挑战，督促国会和 FCC 修订法案，在新的法案中包括到有线电视网络的“开放接入”。AT&T 耗资 580 亿美元收购了 MediaOne，加上 500 万用户每个用户的 1 万美元，说明 AT&T 预期每年从每个用户身上至少收回 2 000 美元。区域性电话公司意识到他们的竞争对手——本地通信公司和 CLEC 以

及有线电视厂商正在削弱他们的垄断。因此,一些公司(NYNEX/Bell Atlantic、SBC/Pacific Bell/Ameritach)开始合并,目的是用本地市场的垄断地位做交换,进入长途通信市场。

目前不受关注但是非常重要的一个变化是 ATM 交换机正在代替电话网络中无处不在的庞大而又昂贵的时分复用交换机。ATM 交换机比较便宜,体积小,并且更加灵活,同时,ATM 支持多种形式的业务量。由于电话公司已经大面积安装了电路交换机,以及本身的垄断体制,在未来的几年内,很可能受到 ATM 服务通信商的威胁。这些通信商从一开始就注意到了这个充满机会和潜力的市场。

昨天具有潜力的电信市场明天就可能成为巨大的市场。移动通信的用户从 1990 年的 1 000 万增长到 1998 年的 2 亿。WWW 应用使得商业网络转变成为基于 IP 的企业网——内部公司网络。1994 年,这种技术还未受到重视;而到了 1997 年,50% 以上的大公司都有了自己的企业网。

经济和社会 电信的进步同样对经济也有重大的影响。许多经济学家长期以来怀疑信息技术能否带来生产力的增长,现在大多数人认为信息技术可以使生产力增长 1%。美国经济的 8.5 万亿美元中,信息技术每年增加 850 亿美元的收入。计算机和通信设备的投资在过去 10 年中增长了 4 倍,其中企业 53% 的投资用于设备。软件、咨询、技术支持和培训方面的投资也有类似的增长。

有些经济学家认为这种生产力增长率的估算过于保守,因为政府的统计数字中并没有详细的定义如何评定银行业、金融业、保健和教育这些行业中快速增长服务部分的产出。

Internet 的电子商务公司引起了媒体广泛关注,同时,现实世界中订货、购买、存货控制等商业活动也受到了企业网和 Internet 的影响。Internet 上 B2B 商务计划从 1998 年的 480 亿美元增长到 2003 年的 1.5 万亿美元。Forrester Research 认为,同期,Internet 上的销售额将从 39 亿美元增长到 1 080 亿美元。

有些人认为未来的公司将是虚拟的,即不是由固定的位置确定的,而是由他们获取知识的能力、组织信息的能力以及组织独立的全球性销售商和提供商的能力所确定的。在这个过程中,商业和专业的界限将消失。消费者不需要旅行社和其他零售中介,而是直接在线预定和购买。

全球范围内工作的性质正在发生着变化。如今美国四分之三以上的工人都是信息工人,信息管理和信息技术方面的人才非常短缺。由于本国劳动力的费用过高,很多公司开始在印度、东欧、俄罗斯雇佣程序员和工程师。这预示着我们z将进入一个新的阶段,在这个阶段中,投资商将在印度、以色列和其他任何地区寻找机会。同时,工作风险也增大了,因为公司由于竞争压力不断改变自己的运作方式,对技术工人的要求也在不断地改变。

在互联网上,每天大约增加 100 万网页,现在成了最大的信息公告板。Media Metrix 估计在 1999 年 4 月,每天有 6 100 万人访问美国 50 个最热的站点。同时,网络也在改变我们的习惯。美国在线的 1 400 万用户每天发送 1 500 万的电子信件,每个月平均上网 21 个小时。与之相比,美国平均每人每周看电视的时间是 25 小时。

问题和机遇 技术进步带来希望的同时也带来了问题,而问题也为技术的进一步发展提供了机遇和方向。目前全球有几百万个 Web 站点,为了更加有效地浏览公告板,搜索引擎出现了。搜索引擎不断的搜索站点,将包含某一个词的所有 Web 页面列成一个表。但是,结果并不令人满意。搜索“modem”一词将返回 200 万的网页。当搜索“DSL modem”这个