

◎ 第二届全国优秀教材

◎ 2002全国普通高等学校优秀教材

21世纪高等学校信息类规划教材



# 计算机网络

(第三版)

编著◎谢希仁

大连理工大学出版社

DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS



21 世纪高等学校信息类规划教材

# 计 算 机 网 络

(第三版)

谢希仁 编著

大连理工大学出版社

## 内 容 提 要

本书为1989年出版的、获第二届全国优秀教材奖的《计算机网络》的第三版。在内容和结构方面都做了很大的修改。

全书分为12章,以TCP/IP体系的核心协议,比较全面系统地介绍了计算机网络的发展和原理体系结构、物理层、数据链路层、信道共享技术、局域网、广域网、网络互连、运输层、计算机网络的安全、应用层协议、ATM技术、多媒体信息在计算机网络上的传送和计算机网络的安全等内容。各章均附有习题。此外,还有三个附录,即英文缩写词、参考文献与一些有参考价值的网点以及部分习题的答案。

本书的特点是概念准确、论述严谨、内容新颖、图文并茂。既重视基本原理和基本概念的阐述,又力图反映出计算机网络的一些最新发展,同时也重视必要的理论分析。本科生和研究生可根据情况在教材中分别选取有关章节学习。本书也可供从事计算机网络工作的工程技术人员学习参考。

© 谢希仁 2000

### 图书在版编目(CIP)数据

计算机网络 / 谢希仁编著. — 3版. — 大连:大连理工大学出版社,2000.6(2003.8重印)

(21世纪高等学校信息类规划教材)

ISBN 7-5611-0188-0

I. 计… II. 谢… III. 计算机网络—高等学校—教材  
IV. TP383

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第23243号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市凌水河 邮政编码:116024

电话:0411-4708842 传真:0411-4701466 邮购:0411-4707961

E-mail: dudp@mail.dlptt.ln.cn URL: http://www.dudp.cn

大连理工印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:185mm×260mm 印张:21.75 字数:498千字

印数:250 001 ~ 260 000

1989年11月第1版

2000年6月第3版

2003年8月第30次印刷

责任编辑:吕志军

责任校对:达理

封面设计:孙宝福

定 价:22.00元

# 出版说明

1989年,根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,按照原电子工业部教材办公室的安排,我社承担了全国高等学校工科电子类专业教材的出版工作,出版了《计算机网络》、《数据结构》、《数字电路逻辑设计》和《程序设计语言编译方法》四本电子类专业教材。这些教材来自于教学实践,又经编审委员会小组择优评选出来,所以质量较高。十多年来,这些教材经过大范围的推广发行,得到了广大读者的认可,受到各个学校的广大师生的一致好评,其中《计算机网络》第一版获得第二届全国优秀教材奖。

近年来,我社在计算机图书的运作方面投入很大,每年都有大批计算机方面的图书问世,其中不乏各个层次的教材,可以说,我们的计算机教材出版发行工作已有了一个非常厚实的积累。在此基础上,借世纪之交计算机专业教学计划调整的机会,我们组织编写了这套《21世纪高等学校信息类规划教材》。

本套教材的编写宗旨是不求大而全,而求简而精。由于教学时数的限制,教材要做到面面俱到不现实,也没有必要,我们主要从先进性、实用性和可操作性角度把握,使本套教材能简捷精炼,重点突出。

本套教材的使用对象是普通高等学校的本、专科生。我们针对这一定位,结合普通高等学校的具体情况,对每本教材的具体内容进行了认真的研究,使其能紧密结合各个学校的教学实际。

为了保证这套教材的质量,我们精心组织了国内多所大学的知名专家学者作为我们的顾问和编者,他们是清华大学、解放军理工大学、北京联合大学、哈尔滨工业大学、东北大学、大连理工大学等学校的教授,其中有的在本专业有很深的造诣,是国内相应领域的知名专家,有的多年工作在教学和科研第一线,有着丰富的教学经验。强大的编者队伍给本套教材提供了强有力的技术支持和保证。

本套教材的特点是:

简洁——避开了高深的理论,简明扼要地介绍学生最需要的基础知识和技术;

通俗——通过通俗易懂的语言讲授计算机专业技术知识;

先进——在内容上吸收新技术、新动向,保持一定的前沿性。

实用——本套书能既适合于教,更适合于学,对普通高等学校计算机专业的教学具有较强的适用性。

真心希望本套教材能成为老师的助手,学生的良师益友。

大连理工大学出版社

2000年6月

# 前 言

本教材的第一版(1989年版)获第二届全国优秀教材奖。1996年再版一次。由于计算机网络技术发展迅速,上一版的内容已显得陈旧了。

第三版的参考学时数为60学时左右。与第二版相比,这一版改动较大。全书共分12章,以TCP/IP协议族为线索,以原理参考模型(共5层)为基础,突出因特网上的应用,增加了对许多新技术的介绍。例如:因特网服务提供者ISP、56 kb/s调制解调器、码分复用CDMA、光信号的波分复用DWDM、高速局域网(包括100BASE-T、100VG-AnyLAN、HIPPI和吉比以太网等)、无线局域网、帧中继技术、IPv6、电子邮件使用的SMTP和POP3协议以及MIME协议、万维网WWW(包括URL、HTTP、HTML等)、ATM通信量管理、MPLS等。增加了一章专门讨论有关多媒体信息在计算机网络上传送的问题,包括一些重要协议的介绍,如RTP、RTCP、H.323、RSVP、IntServ和DiffServ以及IP电话、居民接入网RAN(包括xDSL、HFC以及FTTx等等)。在计算机网络安全一章中,增加了报文鉴别MD5、电子邮件加密协议PGP、因特网商务中的加密(SSL和SET)、因特网的网络层安全协议族IPsec以及防火墙等。附录A是一些重要的英文缩写词,附录B是参考文献与一些有参考价值的网点,便于读者能够更方便地从因特网上找到所需的较新的资料。附录C是部分习题的解答。

编写教材最难处理的就是内容的取舍。网络技术的飞速发展使得新的网络技术和标准不断问世。在非常有限的篇幅中,应当将哪些最为重要的内容教给学生呢?经验证明,最重要的就是要在教材中把基本原理讲清楚。增添新内容的同时要相应地删除一些陈旧的或在初学时可暂缓的内容,否则教材就会过于膨胀。理论联系实际是十分必要的,但显然不应将教材写成工程实践中的使用手册。教材固然要反映新技术,而新的但还不够成熟的内容也不宜写入教材。教科书也不应写成标准文档的缩写。实际上,若想精通书中所述的任何一种协议,只靠学习本书中的这一点入门材料是远远不够的。读者可按照书中各种问题相关的RFC文档号(这些RFC文档号未编入附录)进行查找和学习。鉴于不少学校已专门开设了排队论课程,因此在第三版中取消了有关排队论的附录。

陈鸣、胡谷雨教授和张兴元、高素青、齐望东副教授对本书的再版提出了很多宝贵的意见。已毕业并工作多年的研究生赵刚也提出了许多很好的建议。赵小凡高工以及林波、黄振荧副教授曾对本书的第二版提出了许多建设性的意见。吴自珠副教授一直对本教材的出版给予全力支持和鼓励。对这些,编者均表示诚挚的谢意。由于编者水平所限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正,编者的电子邮件地址是xiexr@public1.ppt.js.cn。

谢希仁

2000年4月于解放军理工大学

# 目 录

<b>第一章 概述</b> .....	1
1.1 计算机网络在信息时代中的作用 .....	1
1.2 计算机网络的发展过程 .....	2
1.2.1 通信与计算机的结合——计算机网络的产生 .....	2
1.2.2 因特网时代 .....	6
1.3 协议与体系结构 .....	8
1.3.1 计算机网络体系结构的形成 .....	8
1.3.2 划分层次的重要性 .....	10
1.3.3 计算机网络的原理体系结构 .....	11
1.3.4 OSI的体系结构 .....	15
1.4 计算机网络的分类 .....	16
1.5 关于计算机网络的若干术语 .....	18
1.6 计算机网络在我国的发展 .....	18
习 题 .....	20
<b>第二章 物理层</b> .....	22
2.1 物理层的基本概念 .....	22
2.2 信道的极限容量 .....	23
2.2.1 有关信道的几个基本概念 .....	23
2.2.2 信道上的最高码元传输速率 .....	24
2.2.3 信道的极限信息传输速率 .....	24
2.3 物理层下面的传输媒体 .....	25
2.3.1 导向传输媒体 .....	26
2.3.2 非导向传输媒体 .....	31
2.4 模拟传输与数字传输 .....	33
2.4.1 模拟传输系统 .....	34
2.4.2 调制解调器 .....	35
2.4.3 数字传输系统 .....	38
2.5 物理层标准举例 .....	40
2.5.1 EIA-232-E 接口标准 .....	40
2.5.2 RS-449 接口标准 .....	43

习 题 .....	44
<b>第三章 数据链路层</b> .....	<b>45</b>
3.1 数据链路层的基本概念 .....	45
3.2 停止等待协议 .....	46
3.2.1 不需要数据链路层协议的数据传输 .....	46
3.2.2 具有最简单流量控制的数据链路层协议 .....	47
3.2.3 实用的停止等待协议 .....	48
3.2.4 停止等待协议的算法 .....	51
3.2.5 停止等待协议的定量分析 .....	52
3.3 连续 ARQ 协议 .....	53
3.3.1 连续 ARQ 协议的工作原理 .....	53
3.3.2 连续 ARQ 协议的吞吐量 .....	54
3.3.3 滑动窗口的概念 .....	55
3.3.4 信道利用率与最佳帧长 .....	58
3.4 选择重传 ARQ 协议 .....	59
3.5 面向比特的链路控制规程 HDLC .....	59
3.5.1 HDLC 概述 .....	59
3.5.2 HDLC 的帧结构 .....	60
3.6 因特网的点对点协议 PPP .....	63
习 题 .....	66
<b>第四章 信道共享技术</b> .....	<b>68</b>
4.1 随机接入:ALOHA .....	68
4.1.1 纯 ALOHA .....	68
4.1.2 时隙 ALOHA (S-ALOHA) .....	72
4.2 随机接入:CSMA 和 CSMA/CD .....	75
4.2.1 CSMA 的几种类型 .....	75
4.2.2 CSMA/CD 的工作原理 .....	78
4.3 受控接入 .....	82
4.4 信道复用 .....	83
4.4.1 频分复用、时分复用和统计时分复用 .....	83
4.4.2 波分复用 .....	85
4.4.3 码分复用 .....	86
习 题 .....	87
<b>第五章 局域网</b> .....	<b>89</b>
5.1 局域网概述 .....	89
5.2 局域网的体系结构 .....	90
5.2.1 IEEE 802 参考模型 .....	90
5.2.2 逻辑链路控制 LLC 子层 .....	91

5.2.3	媒体接入控制 MAC 子层 .....	94
5.3	IEEE 802.3 标准:CSMA/CD .....	95
5.3.1	802.3 局域网概述 .....	95
5.3.2	802.3 局域网的 MAC 子层 .....	100
5.4	非主流的局域网 .....	102
5.4.1	IEEE 802.5 标准:令牌环 .....	102
5.4.2	IEEE 802.4 标准:令牌总线局域网 .....	104
5.4.3	三种局域网的比较 .....	105
5.5	局域网的扩展 .....	105
5.5.1	用集线器扩展局域网 .....	106
5.5.2	用以太网交换机扩展局域网 .....	106
5.5.3	用网桥扩展局域网 .....	108
5.6	高速局域网 .....	112
5.6.1	100BASE-T 技术 .....	112
5.6.2	100VG-AnyLAN 技术 .....	113
5.6.3	光纤分布式数据接口 FDDI .....	114
5.6.4	其他种类的高速局域网 .....	116
5.6.5	吉比以太网 .....	117
5.7	无线局域网 .....	118
5.7.1	无线局域网的组成 .....	118
5.7.2	802.11 标准中的物理层 .....	119
5.7.3	802.11 标准中的 MAC 子层 .....	119
5.8	局域网的网络操作系统 .....	122
5.8.1	网络操作系统概述 .....	122
5.8.2	Novell 网络操作系统 NetWare .....	123
	习    题 .....	125
<b>第六章</b>	<b>广域网</b> .....	<b>127</b>
6.1	广域网的基本概念 .....	127
6.1.1	广域网的构成 .....	127
6.1.2	网络层所提供的两种服务 .....	128
6.2	广域网中的路由选择机制 .....	130
6.2.1	结点交换机中的路由表 .....	130
6.2.2	用图表示广域网 .....	131
6.3	路由选择的一般原理 .....	133
6.3.1	理想的路由算法 .....	133
6.3.2	非自适应路由选择 .....	134
6.3.3	自适应路由选择 .....	137
6.4	拥塞控制 .....	140



6.4.1	拥塞控制的意义 .....	140
6.4.2	拥塞控制的一般原理 .....	143
6.5	X.25 建议书 .....	144
6.5.1	X.25 简介 .....	144
6.5.2	X.25 网络与字符方式终端的连接 .....	146
6.6	帧中继(FR) .....	147
6.6.1	帧中继概述 .....	147
6.6.2	帧中继的体系结构 .....	150
6.6.3	帧中继的帧格式 .....	151
6.6.4	帧中继的拥塞控制 .....	153
6.6.5	帧中继的应用 .....	155
习    题	.....	156
<b>第七章</b>	<b>网络互连</b> .....	<b>158</b>
7.1	互连网的概念 .....	158
7.2	因特网的网际协议 IP .....	159
7.2.1	IP 地址及其转换 .....	160
7.2.2	IP 数据报的格式 .....	167
7.2.3	因特网控制报文协议 ICMP .....	169
7.2.4	IP 层处理数据报的流程 .....	171
7.3	因特网的路由选择协议 .....	173
7.3.1	分层次的路由选择协议 .....	173
7.3.2	内部网关协议 .....	175
7.3.3	外部网关协议 .....	182
7.4	因特网组管理协议 IGMP .....	184
7.5	下一代的网际协议 IPv6 (IPng) .....	186
7.5.1	IPv6 概述 .....	186
7.5.2	IPv6 基本首部格式 .....	187
7.5.3	IPv6 的地址空间 .....	189
7.5.4	过渡到 IPv6 的问题 .....	190
7.6	因特网控制报文协议 ICMPv6 .....	191
习    题	.....	192
<b>第八章</b>	<b>运输层</b> .....	<b>195</b>
8.1	运输协议概述 .....	195
8.2	TCP/IP 体系中的运输层 .....	197
8.2.1	运输层中的两个协议 .....	197
8.2.2	端口的概念 .....	198
8.3	用户数据报协议 UDP .....	200
8.4	传输控制协议 TCP .....	201

8.4.1	TCP 的编号与确认 .....	201
8.4.2	TCP 的流量控制 .....	202
8.4.3	TCP 的重传机制 .....	204
8.4.4	TCP 报文段的格式 .....	206
8.4.5	TCP 的运输连接管理 .....	208
8.4.6	TCP 的有限状态机 .....	210
	习 题 .....	212
<b>第九章</b>	<b>应用层协议 .....</b>	<b>214</b>
9.1	应用层概述 .....	214
9.2	域名系统 DNS .....	215
9.2.1	域名系统概述 .....	215
9.2.2	因特网的域名结构 .....	216
9.2.3	用域名服务器进行域名转换 .....	218
9.3	文件传送协议(FTP 和 NFS) .....	221
9.3.1	概述 .....	221
9.3.2	FTP 的主要工作原理 .....	221
9.3.3	网络文件系统 NFS .....	223
9.4	远程登录 TELNET .....	225
9.5	电子邮件 .....	226
9.5.1	概述 .....	226
9.5.2	简单邮件传送协议 SMTP .....	228
9.5.3	电子邮件的信息格式 .....	230
9.5.4	邮件转发、电子邮件网关及邮件读取协议 .....	230
9.5.5	通用因特网邮件扩充 MIME .....	232
9.6	万维网 WWW .....	235
9.6.1	概述 .....	235
9.6.2	统一资源定位符 URL .....	236
9.6.3	超文本传送协议 HTTP .....	238
9.6.4	超文本置标语言 HTML .....	243
9.6.5	万维网页面中的超链 .....	246
9.6.6	动态万维网文档与活动万维网文档 .....	250
9.6.7	万维网上的信息检索系统 .....	251
9.7	网络管理 .....	253
9.7.1	网络管理的基本概念 .....	253
9.7.2	简单网络管理协议 SNMP 概述 .....	256
9.7.3	管理信息库 MIB .....	256
9.7.4	SNMP 的 5 种协议数据单元 .....	258
9.7.5	SNMPv2 和 SNMPv3 .....	259

9.8 引导程序协议 BOOTP 与动态主机配置协议 DHCP .....	260
9.8.1 协议配置 .....	260
9.8.2 引导程序协议 BOOTP .....	260
9.8.3 动态主机配置协议 DHCP .....	261
习    题 .....	262
<b>第十章 ATM 技术</b> .....	<b>264</b>
10.1 综合业务数字网 ISDN .....	264
10.1.1 窄带综合业务数字网 N-ISDN .....	264
10.1.2 宽带综合业务数字网 B-ISDN .....	265
10.1.3 同步光纤网 SONET 和同步数字系列 SDH .....	266
10.2 ATM 的基本概念 .....	267
10.2.1 ATM 概述 .....	267
10.2.2 ATM 的协议参考模型 .....	269
10.2.3 ATM 的逻辑连接机制 .....	272
10.2.4 ATM 信元的结构 .....	274
10.3 ATM 通信量管理 .....	275
10.3.1 ATM 通信量的特点 .....	275
10.3.2 ATM 通信量管理中的一些重要参数 .....	276
10.3.3 ATM 服务的五个种类 .....	277
10.4 ATM 与 IP 相结合 .....	279
10.4.1 覆盖模型 .....	279
10.4.2 多协议标记交换 MPLS .....	281
10.5 关于 ATM 前途的争论 .....	284
习    题 .....	285
<b>第十一章 多媒体信息在计算机网络上的传送</b> .....	<b>286</b>
11.1 概述 .....	286
11.2 IP 电话 .....	286
11.2.1 IP 电话的网络配置 .....	286
11.2.2 IP 电话的话音质量 .....	288
11.3 因特网的多媒体体系结构 .....	289
11.4 改进“尽最大努力交付”的服务 .....	291
11.4.1 综合服务 IntServ .....	291
11.4.2 区分服务 DiffServ .....	292
11.5 居民接入网 RAN .....	293
11.5.1 xDSL 技术 .....	293
11.5.2 光纤同轴混合网(HFC 网) .....	295
11.5.3 FTTx 技术 .....	298
11.6 关于“三网融合” .....	299

习 题	300
<b>第十二章 计算机网络的安全</b>	<b>301</b>
12.1 网络安全问题概述	301
12.1.1 计算机网络面临的安全性威胁	301
12.1.2 计算机网络安全的内容	302
12.1.3 一般的数据加密模型	303
12.2 常规密钥密码体制	304
12.2.1 替代密码与置换密码	304
12.2.2 分组密码算法——数据加密标准 DES	305
12.3 公开密钥密码体制	308
12.3.1 公开密钥密码体制的特点	308
12.3.2 RSA 公开密钥密码体制	309
12.3.3 数字签名	311
12.4 报文鉴别	312
12.5 密钥分配	313
12.6 应用层的加密——电子邮件的加密	314
12.7 因特网商务中的加密	315
12.8 因特网的网络层安全协议族 IPsec	316
12.9 防火墙	318
习 题	320
附录 A 一些重要的英文缩写词	321
附录 B 参考文献与一些有参考价值的网点	327
附录 C 部分习题的解答	330

# 第一章 概述

## 1.1 计算机网络在信息时代中的作用

21 世纪的特征就是数字化、网络化和信息化，它是一个以网络为核心的信息时代。

当前世界经济正在从工业经济向知识经济(knowledge-based economy)转变。知识经济是相对于农业经济、工业经济而出现的一种正在形成中的崭新的经济形态。知识经济就是指以知识为基础的经济，并且经济的发展在很大程度上取决于对知识的发掘和积累。知识经济的诞生不仅对人们的工作、学习、交往等各个方面起着非常大的作用，而且也影响了整个社会的发展。知识经济已成为推动生产力发展的巨大动力。

知识经济中的两个重要特点就是**信息化和全球化**。要实现信息化和全球化，就必须依靠完善的网络。因此网络现在已经成为信息社会的命脉和发展知识经济的重要基础。网络对社会生活的很多方面以及对社会经济的发展已经产生了不可逆转的影响。

这里所说的网络应当是指“三网”，即**电信网络**（主要的业务是电话，但也有其他业务，如传真、数据等）、**有线电视网络**（即单向电视节目的传送网络）和**计算机网络**。虽然这三种网络在信息化过程中都起到重要的作用，但其中发展最快的并起到核心作用的是计算机网络，而这正是本书所要讨论的内容。

进入 20 世纪 90 年代以后，以**因特网(Internet)**为代表的计算机网络得到了飞速的发展，已从最初的教育科研网络逐步发展成为商业网络，并已成为仅次于全球电话网的世界第二大网络。不少人认为现在已经是因特网的时代，这是因为因特网正在改变着我们工作和生活的各个方面，它已经给很多国家（尤其是因特网的发源地美国）带来了巨大的好处，并加速了全球信息革命的进程。可以毫不夸大地说，因特网是自印刷术以来人类通信方面最大的变革。现在人们的生活、工作、学习和交往都已离不开因特网。

1993 年 9 月 15 日，美国政府发布一个在全世界引起很大反响的文件，其标题是“**国家信息基础结构(NII)行动计划**”。NII 即 National Information Infrastructure 的缩写，也可译为**国家信息基础设施**。这个文件提出，高速信息网是国家信息基础结构的一个重要组成部分。为了更加生动而形象地说明这个“NII 行动计划”，人们常用“**信息高速公路**”这个名词作为“国家信息基础结构”的通俗名称。

1994 年 9 月美国又提出建立**全球信息基础结构 GII**，建议将各国的 NII 互连起来组成世界范围的信息基础结构。当前的因特网就是这种全球性的信息基础结构的雏形。

现在全世界所有的工业发达国家和很多的发展中国家都纷纷研究和制定本国建设信息基础结构的计划。这就使得计算机网络的发展进入了一个新的历史阶段，并变成了几乎人人都知道而且都十分关心的热门学科。

## 1.2 计算机网络的发展过程

### 1.2.1 通信与计算机的结合——计算机网络的产生

计算机网络涉及到通信与计算机两个领域。计算机与通信日益紧密地结合，已对人类社会的进步做出了极大的贡献。

计算机与通信的相互结合主要有两个方面。一方面，通信网络为计算机之间的数据传递和交换提供了必要的手段；另一方面，数字计算技术的发展渗透到通信技术中，又提高了通信网络的各种性能。当然，这两个方面的进展都离不开人们在半导体技术(主要是超大规模集成电路 VLSI 技术)上取得的辉煌成就。

现代计算机网络实际上是 20 世纪 60 年代美苏冷战的产物。在 60 年代初，美国提出要研制一种崭新的、能够适应现代战争的、残存性很强的网络。传统的电路交换(circuit switching)的电信网虽然已经四通八达，但在战争期间，一旦正在通信的电路中有一个交换机或有一条链路被炸毁，整个通信电路就必然要中断。如要立即改用其他迂回电路通信，必须重新拨号建立连接。这很可能要延误一些时间(也许只有十几秒钟)，因而可能造成很大的损失。

针对电路交换的电信网的这一重大缺点，一种灵活的分组交换(packet switching)的计算机网络问世了。为了掌握分组交换的概念，我们先简单地回顾一下电路交换的特点。

从通信资源的分配角度来看，“交换”就是按照某种方式动态地分配传输线路的资源。电路交换是基于位置(position-based)的，即在某一位置的比特经交换后变更到另一个位置上。电路交换有多种形式。空分交换是交换比特流所经过的端口号，时分交换是交换比特所在的时隙，而波分交换则是交换荷载比特的光的波长。使用电路交换时，在通话之前，必须先呼叫(即拨号)。用户若呼叫成功，则从主叫端到被叫端就建立了一条物理通路。此后双方才能互相通话。通话完毕挂机后即自动释放这条物理通路。这种“建立连接→通信→释放连接”的联网方式称为面向连接的(connection-oriented)。电路交换必定是面向连接的。但面向连接的却不一定是电路交换。图 1-1 为电路交换的示意图。为简单起见，图中对市话和长途交换机没有区分。应当注意的是，用户线归电话用户专用，而对交换机之间拥有大量话路的中继线则是许多用户共享的，正在通话的用户只占用了其中的一个话路，而在通话的全部时间内用户始终占用端到端的固定传输带宽。

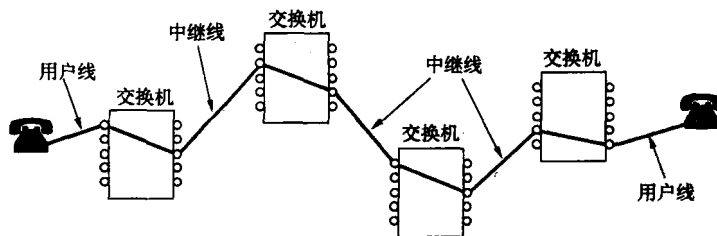


图 1-1 电路交换的示意图

当使用电路交换来传送计算机数据时，还有一个效率很低的问题。由于计算机数据是

突发式地出现在传输线路上,因此线路上真正用来传送数据的时间往往不到 10%甚至 1%。在绝大部分时间里,通信线路实际上是空闲的(但对电信公司来说,通信线路已被用户占用因而要收费)。例如,当用户阅读终端屏幕上的信息或用键盘输入和编辑一份文件时,或计算机正在进行处理而结果尚未得出时,宝贵的通信线路资源实际上并未被利用而是白白被浪费了。

分组交换则采用存储转发技术<sup>①</sup>。图 1-2 画的是分组的概念。通常我们将欲发送的整块数据称为一个报文(message)。在发送报文之前,先将较长的报文划分成为一个个更小的等长数据段,例如,每个数据段为 1024 bit<sup>②</sup>。在每一个数据段前面,加上首部(header)后,就构成了一个分组(packet)。分组又称为“包”,而分组的首部也可称为“包头”。分组是在计算机网络中传送的数据单元。在一个分组中,“首部”是非常重要的,因为正是分组的首部才包含了诸如目的地址和源地址等重要控制信息,每一个分组才能在分组交换网中独立地选择路由。因此,分组交换是基于标记的(label-based)。上述的首部就是一种标记。使用分组交换时,在通信时不必先建立一条连接。这种不先建立连接而随时可发送数据的联网方式,称为无连接的(connectionless)。

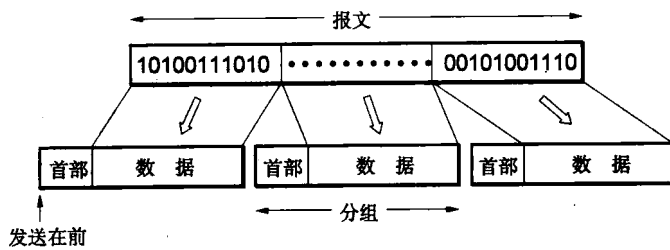


图 1-2 分组的概念

分组交换网由若干个节点交换机(node switch)和连接这些交换机的链路组成。图 1-3(a)是其示意图。用圆圈表示的节点交换机是网络的核心部件。从概念上讲,一个节点交换机就是一个小型计算机。图 1-3(b)和图 1-3(a)的表示方法是一样的,但强调了节点交换机具有多个端口的概念。这里用一个方框表示节点交换机。我们应注意到,每一个节点交换机都有两组端口。一些小半圆表示的一组端口用来和计算机相连,其速率较低。而一些小方框表示的一组端口则用来和网络的高速链路相连,其速率较高。图中  $H_1 \sim H_6$  都是一些可进行通信的计算机,即所谓的主机(host)。在 ARPANET 建网初期,分组交换网中的节点交换机曾被称为接口报文处理机 IMP (Interface Message Processor)。但 IMP 这一名词现已不再使用。连接在网络之间的节点交换机现在都称之为路由器(router)。

① 存储转发的概念最初是在 1964 年 8 月由巴兰(Baran)在美国兰德(Rand)公司的“论分布式通信”的研究报告中提出的。在 1962 ~ 1965 年,美国国防部远景研究规划局 DARPA (Defense Advanced Research Project Agency)和英国的国家物理实验室 NPL 都在对新型的计算机通信网进行研究。1966 年 6 月, NPL 的戴维斯(Davies)首次提出“分组”(packet)这一名词[参见 DAVI86]。1969 年 12 月,美国的分组交换网 ARPANET (当时仅 4 个节点)投入运行。从此,计算机网络的发展就进入了一个崭新的纪元。1973 年英国的 NPL 也开通了分组交换试验网。现在大家都公认 ARPANET 为分组交换网之父,并将分组交换网的出现作为现代电信时代的开始。除英美两国外,法国也在 1973 年开通其分组交换网 CYCLADES。

② 在本书中, bit 和 b 都表示“比特”。比特是信息量的度量单位。

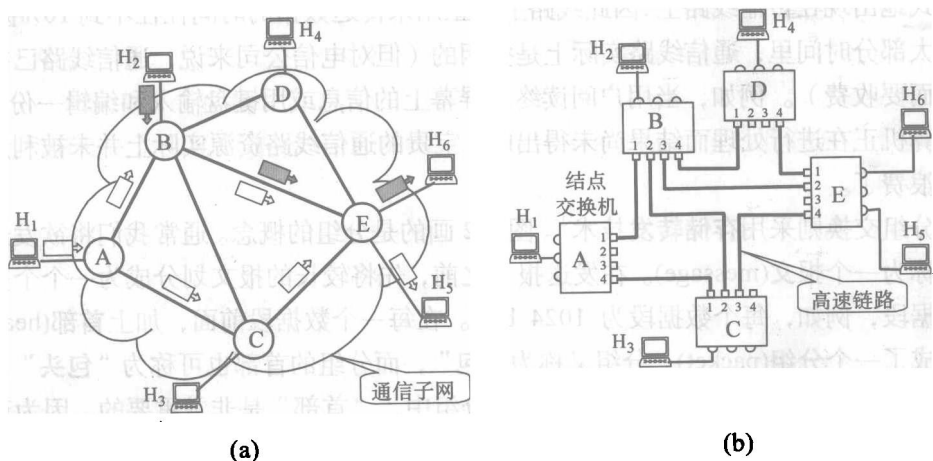


图 1-3 分组交换网的示意图：(a) 通信子网和主机；(b) 结点交换机的两组端口

这里特别要强调的是，在结点交换机中的输入和输出端口之间是没有直接连线的。结点交换机处理分组的过程是：将收到的分组先放入缓存，再查找路由表（路由表中写有到何目的地址应从何端口转发的信息），然后确定将该分组交给某个端口转发出去。

现在假定主机  $H_1$  向主机  $H_5$  发送数据。主机  $H_1$  先将分组一个个地发往与它直接相连的结点交换机 A。此时，除链路  $H_1-A$  外，网内其他通信链路并不被目前通信的双方所占用。需要注意的是，即使是链路  $H_1-A$ ，也只是当分组正在此链路上传送时才被占用。在各分组传送之间的空闲时间，链路  $H_1-A$  仍可为其他主机发送的分组使用。

结点交换机 A 将主机  $H_1$  发来的分组放入缓存。假定从路由表中查出应将该分组送到结点交换机的端口 4。于是分组就经链路 A-C 到达结点交换机 C。当分组正在链路 A-C 传送时，该分组并不占用网络其他部分的资源。

结点交换机 C 继续按上述方式查找路由表，假定查出应从端口 3 进行转发。于是分组又经端口 3 向结点交换机 E 转发。当分组到达结点交换机 E 时，就将分组交给主机  $H_5$ 。

假定在某一个分组的传送过程中，链路 A-C 的通信量太大并产生了拥塞，那么结点交换机 A 可以将分组转发端口改为端口 1。于是分组就沿另一个路由到达结点交换机 B。交换机 B 再通过其端口 3 将分组转发到结点交换机 E，最后将分组送到主机  $H_5$ 。图 1-3(a) 还画出了在网络中可同时有其他主机也在进行通信，如主机  $H_2$  经过结点交换机 B 和 E 与主机  $H_6$  通信。

这里要注意，结点交换机暂时存储的是一个短小的分组，而不是整个的长报文。短分组是暂存在交换机的存储器中而不是存储在磁盘中。这就保证了较高的交换速率。

在图中只画了两对主机( $H_1$  和  $H_5$ ,  $H_2$  和  $H_6$ )在进行通信。实际上，一个分组交换网可以容许很多主机同时进行通信，而一个主机中的多个进程(即正在运行中的多道程序)也可以各自和不同主机中的不同进程进行通信。

在传送分组的过程中，由于采取了专门的措施，因而保证了数据的传送具有非常高的可靠性。这些将在今后各章讨论网络协议(protocol)时进行研究。

从以上所述可知，采用存储转发的分组交换，实质上是采用了在数据通信的过程中中断(或动态)分配传输带宽的策略。这对传送突发式的计算机数据非常合适，使得通信线路



的利用率大大提高了。

为了提高分组交换网的可靠性，常采用网状拓扑结构，使得当发生网络拥塞或少数结点、链路出现故障时，可灵活地改变路由而不致引起通信的中断或全网的瘫痪。此外，通信网络的主干线路往往由一些高速链路构成，这样就能迅速地传送大量的计算机数据。

综上所述，分组交换网的主要优点可归纳如表 1-1 所示。

优点	所采用的手段
高效	在分组传输的过程中动态分配传输带宽，对通信链路是逐段占用
灵活	每个结点均有智能，为每一个分组独立地选择转发的路由
迅速	以分组作为传送单位，通信之前可以不先建立连接就能发送分组；网络使用高速链路
可靠	完善的网络协议；分布式多路由的通信子网

分组交换也带来一些新的问题。例如，分组在各结点存储转发时因要排队总会造成一定的时延。当网络通信量过大时，这种时延也可能很大。此外，各分组必须携带的控制信息也造成了一定的开销。整个分组交换网还需要专门的管理和控制机制。

应当指出，从本质上讲，这种断续分配传输带宽的存储转发原理并非完全新的概念。古代就有的邮政通信，就其本质来说也是属于存储转发方式。而在 20 世纪 40 年代，电报通信也采用了基于存储转发原理的报文交换(message switching)。在报文交换中心，一份份电报被接收下来，并穿成纸带。操作员以每份报文为单位，撕下纸带，根据报文的目的地地址，拿到相应的发报机转发出去。这种报文交换的时延较长，从几分钟到几小时不等。分组交换虽然也采用存储转发原理，但由于在交换结点上使用了电子计算机，且分组为定长，其长度不大，完全可放在交换结点计算机的存储器中进行处理，这就使分组的转发非常迅速。例如 ARPANET 的经验表明，在正常的网络负荷下，横跨美国东西海岸的端到端平均时延小于 0.1 秒。这样，分组交换虽然采用了某些古老的交换原理，但实际上已变成了一种崭新的交换技术。

图 1-4 表示电路交换、报文交换和分组交换的主要区别。图中的 A 和 D 分别是源结点和目的结点，而 B 和 C 是在 A 和 B 之间的中间结点。

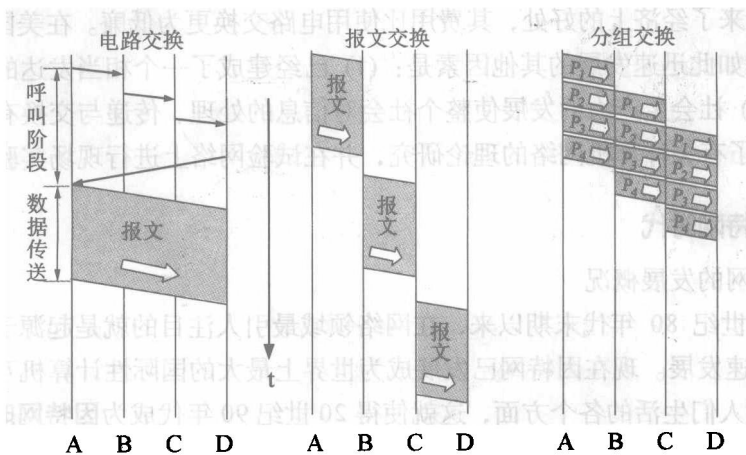


图 1-4 三种交换的比较 (P<sub>1</sub>~P<sub>4</sub>表示 4 个分组)