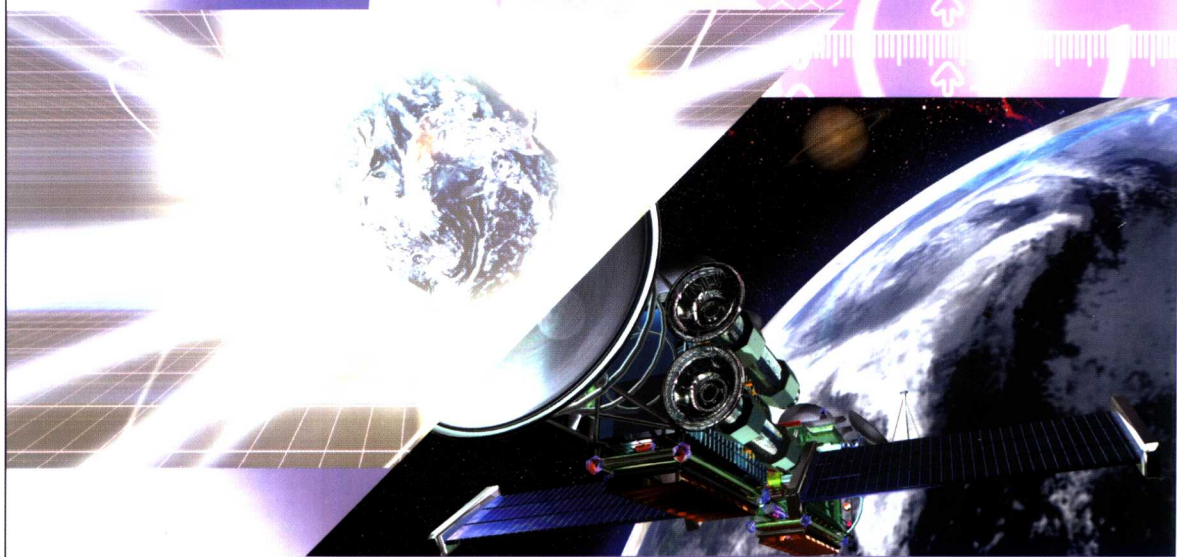




普通高等教育“十五”国家级规划教材

通信网络基础

李建东 盛敏 编著



高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

通信网络基础

李建东 盛 敏 编著

高等教育出版社

内容提要

《通信网络基础》是普通高等教育“十五”国家级规划教材,主要介绍通信网络的基本原理。

全书共分7章。第1章主要讨论通信网络的基本构成和协议体系、本书所需的数学基础及通信网络的基本理论问题;第2章详细讨论了链路层、网络层和传输层的端到端传输协议:包括组帧、差错检测、自动请求重发(ARQ)、协议的初始化、差错控制和流量控制等;第3章首先描述了单个排队系统的基本时延性能,接着描述了多个排队队列组成的网络的时延性能,给出的分析模型是常用的网络时延模型;第4章分析了多个用户共享一个信道的问题——多址技术,重点研究随机多址的基本特征(时延、通过量和稳定性)及其改进的方法;第5章研究如何为数据分组选定合适的传输路径问题——路由算法,给出了常用的最短路由算法,并讨论了路由信息的广播;第6章讨论了维持网络正常运行的基本手段——流量和拥塞控制,重点研究了窗口式和漏斗式流量和拥塞控制方法。第7章简要讨论了通信网的拓扑设计。本书文字流畅、内容取材恰当,难度适宜,说理清楚,体现了作者丰富的教学和科研经验,适合教学。

本书可供普通高等学校工科电子信息工程、通信工程、信息工程专业及理科电子信息科学专业本科学生作为教材使用,也可供相关专业硕士研究生、工程技术人员作为参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

通信网络基础/李建东,盛敏编著. —北京:高等教育出版社,2004.8

ISBN 7-04-014568-5

I.通... II.①李...②盛... III.通信网-高等学校-教材 IV.TN915

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第053909号

策划编辑	刘激扬	责任编辑	刘激扬	封面设计	刘晓翔
责任绘图	朱静	版式设计	张岚	责任校对	金辉
责任印制	陈伟光				

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100011
总机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经销 新华书店北京发行所
印刷 北京奥隆印刷厂

开本 787×960 1/16
印张 15
字数 270 000

版次 2004年8月第1版
印次 2004年8月第1次印刷
定价 19.10元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

近年来,通信网络在传统的电话交换网、分组交换网、计算机通信网的基础上得到了飞速发展,出现了多种新型的网络和技术,例如,宽带综合业务网(B-ISDN)、Internet、帧中继、千兆以太网、第三代移动通信系统(IMT-2000)等等。目前正在向下一代 Internet、全光网络、第4代移动通信等方向发展。尽管这些网络在形式上千差万别,但它们许多基本的原理都是相同的。本书的主要目的就是讨论这些网络的共性原理。希望通过本课程的学习,使读者能够理解当今各种新型通信网络的设计原理和依据,同时为读者设计和构思其他新型的通信网络打下理论基础。

本书共分七章。第1章主要讨论通信网络的基本构成和协议体系、本书所需的数学基础及通信网络的基本理论问题;第2章详细讨论了链路层、网络层和传输层的端到端传输协议:包括组帧、差错检测、自动请求重发(ARQ)、协议的初始化、差错控制和流量控制等;第3章首先描述了单个排队系统的基本时延性能,接着描述了多个排队队列组成的网络的时延性能,给出的分析模型是常用的网络时延模型;第4章分析了多个用户共享一个信道的问题——多址技术,重点研究随机多址的基本特征(时延、通过量和稳定性)及其改进的方法;第5章研究如何为数据分组选定合适的传输路径问题——路由算法,给出了常用的最短路由算法,并讨论了路由信息的广播;第6章讨论了维持网络正常运行的基本手段——流量和拥塞控制,重点研究了窗口式和漏斗式流量和拥塞控制方法。第7章简要讨论了通信网的拓扑设计。

本书在参照国外“Data Network”(第二版,作者 D. Bertsekas 和 R. Gallager)等多本教材的基础上,根据当前通信网络的最新发展动态,结合作者教案和教学经验、在原研究生教材《信息网络理论基础》基础上修改和撰写而成。其中部分内容曾在西安电子科技大学通信工程、电子信息工程本科班和信息与通信系统研究生班试用。本书可安排56个学时(全部内容)或46个学时(仅前五章)进行讲授,可根据具体情况调整,书中部分理论性较强的内容可作为选学(如排队网络等)。

本书第1~第3章由李建东同志撰写,第4~第7章由盛敏同志撰写,李建东同志对全书进行了统稿。本书得到了国家自然科学基金(60372048和60390540)和教育部优秀青年教师科研教学奖励计划的资助。同时得到了西安电子科技大学综合业务理论及关键技术国家重点实验室和信息科学研究所的

资助。

感谢西安电子科技大学信息科学研究所宽带无线通信实验室的支持,感谢刘增基教授给予的指导和帮助。感谢杨家玮、陈彦辉、徐展琦等同志提供的支持和帮助。特别感谢西安交通大学朱世华教授审阅了全书;并提出了许多宝贵的修改意见。

由于水平有限,书中难免有缺点和错误,敬请读者来信(jdli@mail.xidian.edu.cn 或 msheng@mail.xidian.edu.cn)批评指正。

作 者

2004年6月于西安

目 录

第1章 通信网络概论及数学基础	1
1.1 通信网络的基本构成	1
1.1.1 数据传输链路	4
1.1.2 数据传输网络	5
1.1.3 网络的互连	9
1.2 协议体系及分层的概念	10
1.2.1 分层的概念	12
1.2.2 OSI 协议的体系结构	13
1.2.3 TCP/IP 协议的体系结构	16
1.2.4 混合的分层协议体系	17
1.3 通信网络中的数学基础	17
1.3.1 随机过程的基本概念	18
1.3.2 Poisson 过程	20
1.3.3 马尔可夫链	23
1.3.4 图论基础	27
1.4 通信网络的基本理论问题	32
习 题	33
第2章 端到端的传输协议	35
2.1 组帧技术	35
2.1.1 面向字符的组帧技术	35
2.1.2 面向比特的组帧技术	37
2.1.3 采用长度计数的组帧技术	38
2.2 链路层的差错控制技术	38
2.2.1 差错检测	38
2.2.2 ARQ 协议	41
2.2.3 最佳帧长	54
2.3 标准数据链路控制协议及其初始化	57
2.3.1 标准的数据链路控制协议	57
2.3.2 数据链路层协议的初始化	61
2.4 网络层和运输层的点对点传输协议	65

2.4.1	网络层(子网层)的点对点传输协议	65
2.4.2	网际层(互连层)的传输协议——IP 协议	72
2.4.3	运输层的点对点传输协议	75
	小 结	79
	习 题	80
第3章	网络的时延分析	84
3.1	Little 定理	84
3.1.1	Little 定理	85
3.1.2	Little 定理的应用	87
3.2	M/M/m 型排队系统	88
3.2.1	M/M/1 排队系统	89
3.2.2	M/M/m 排队系统	92
3.3	M/G/1 型排队系统	97
3.3.1	M/G/1 排队系统	97
3.3.2	服务员有休假的 M/G/1 排队系统	101
3.3.3	采用不同服务规则的 M/G/1 排队系统	103
3.4	排队网络	112
3.4.1	Kleinrock 独立性近似	113
3.4.2	Burke 定理	115
3.4.3	Jackson 定理	117
	小 结	119
	习 题	120
第4章	多址技术	124
4.1	多址协议概述	124
4.1.1	MAC 层在通信协议中的位置	125
4.1.2	多址协议的分类	125
4.1.3	系统模型	125
4.2	固定多址接入协议	127
4.2.1	频分多址接入	127
4.2.2	时分多址接入	128
4.2.3	固定多址接入协议的性能分析	128
4.3	随机多址接入协议	131
4.3.1	ALOHA 协议	131
4.3.2	载波侦听型多址协议	140
4.4	冲突分解算法	148

4.4.1 树形分裂算法	149
4.4.2 FCFS 分裂算法	150
4.5 预约多址接入协议	151
4.5.1 时隙预约多址协议	153
4.6 分组无线网络	156
4.6.1 时分复用(TDM)在 PRNET 中的应用	157
小 结	157
习 题	158
第5章 路由算法	160
5.1 路由算法概述	160
5.1.1 路由选择算法的分类	161
5.1.2 对路由选择算法的要求	163
5.1.3 路由算法的实现 路由表	164
5.1.4 路由算法与流量控制的关系	165
5.2 常用的路由算法	165
5.2.1 广域网中的路由算法	166
5.2.2 互连网中的路由算法	168
5.2.3 Ad Hoc 网络中的路由算法	169
5.3 最短路由算法	171
5.3.1 集中式最短路径算法	172
5.3.2 分布式最短路径算法	177
5.4 自适应最短路由的稳定性分析	184
5.4.1 数据报网络的稳定性	184
5.5 路由信息的广播	186
5.5.1 ARPANET 的泛洪算法	188
小 结	189
习 题	190
第6章 流量和拥塞控制	191
6.1 流量和拥塞控制概论	191
6.1.1 网络数据流的控制技术分类	192
6.1.2 拥塞控制的基本原理	197
6.1.3 流控和拥塞控制所经历的层次	197
6.2 流量和拥塞控制技术	198
6.2.1 窗口式流量和拥塞控制	198
6.2.2 漏斗式速率控制算法	202

6.3 实际系统中流量和拥塞控制算法	208
6.3.1 ARPANET 中的流量和拥塞控制	208
6.3.2 SNA 网络中的流量和拥塞控制	209
6.3.3 PARIS 网络中的流量和拥塞控制	209
小 结	209
习 题	210
第7章 网络结构设计	212
7.1 常用的网络拓扑结构	212
7.2 网络拓扑结构的基本问题	214
7.3 接入网的拓扑设计	215
7.3.1 接入网的分类	215
7.3.2 有线接入网的设计	216
7.3.3 无线接入网的设计	217
7.4 骨干网的拓扑设计	222
小 结	224
习 题	224
附 录	225

在通信原理中已清楚地了解了任意两个节点(终端或用户)之间通过一个给定的信道进行信息传输的过程。可以通过适当的信源编码方式来表示信源和降低信源的信息速率,通过适当的信道编码来消除或减轻信道错误的影响,通过适当的调制方式来运载信息,以适应信道的特征。

在现实生活中,如果在任意两个用户之间都建立一条物理传输通道,就可以解决相互通信问题。但共需要 N^2 条物理传输通道(N 为通信的用户数)。这种方式的缺点是成本昂贵,且极难扩展,每条物理传输通道的利用率极低。由此可以想像:通信网络的基本问题就是如何以尽可能低的成本有效地解决处于任何地理位置的任意两个用户之间即时信息传递问题。它完全类似于当今的交通运输系统解决人和物资流动的问题。

随着通信网络和计算机网络技术的飞速发展,人们现在不仅可以享用传统的电信业务,如电话、传真等,还可以享用多种信息服务,如电子邮件(E-mail)、网上浏览、信息搜索、电子商务、网上娱乐等。如果希望在任何时间、任何地点都可以享用自己所需的信息服务,就必须要有个通信网络作支撑。该网络能使用户通过多种传输手段连接到网络之中,并以高速骨干网为基础,实现多种类型网络的互连、互通,为不同要求的用户提供不同速率、不同服务质量、不同类型的信息传输通道。

本章首先讨论通信网络的基本构成,接着讨论网络的分层结构,最后讨论通信网络应解决的基本理论问题。

1.1 通信网络的基本构成

一个基本的通信网络通常由物理传输链路(通道)和链路的汇聚点(网络节点)组成,如图 1-1 所示。在该网络中,网络节点可以是交换设备也可以是路由器,其主要功能是将多个用户的信息复接到骨干链路上或从骨干链路上分离出用户的信息。通过网络节点的汇聚作用,使得用户可以低成本地共享骨干链路,进而低成本地实现任意用户之间的信息交换。

根据用户类型(移动或固定),业务的种类(电话、计算机数据),传输媒介(有线、无线),节点采用的技术体制(ATM 交换体制、电路交换体制、分组转发体制)或作用等可以将已有的通信网络分类,如固定电话网、移动通信网、ATM 网络、

局域网等。

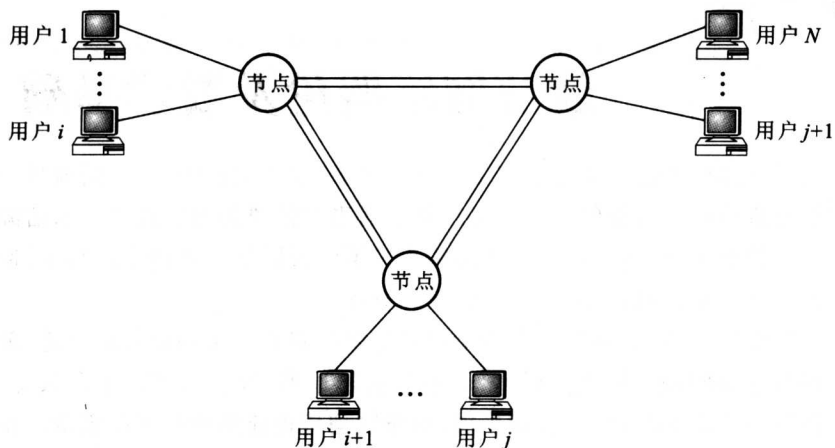


图 1-1 一个基本的通信网络示意图

当前实用的覆盖全国乃至全球的通信网中,通常由多种不同类型的网络互连互通而构成。一个可能的网络如图 1-2 所示。它包括的网络(通常称为子网)有:ATM(Asynchronous Transfer Mode,异步转移模式)网络、X.25 分组数据网、PSTN(Public Switched Telephone Network,公用电话交换网)/ISDN(Integrated Service Digital Network,综合业务数字网)、移动通信网/卫星通信网、FDDI(Fiber Distributed Data Interface,光纤分布式数据接口)环网、局域网及高速骨干核心网等。整个网络通过以 WDM(Wavelength Division Multiplexing,波分复用)链路作为核心路由器的高速通道,形成高速信息传输平台,将上述各子网互连互通,可形成一个无缝覆盖的网络。

路由器是网络互连的核心设备,它负责分组(分组是由若干数据比特组成的可进行独立传输的数据块,其长度为几十个字节到几千个字节)的转发和为各个分组选择适当的传输路径。正是由于路由器的存在,任一用户(用户 A)的分组可以通过一个最优的路由(用户 A→路由器 R13→路由器 R1→路由器 R3→ATM 网络→路由器 R14→用户 G)转发给任一目的用户(用户 G)。

在上述网络中,以分组作为载体来运载不同类型的业务。这些业务可以是话音、图像、视频,也可以是电子邮件、Web 业务等等。为了向用户提供不同的服务,除通信网络本身以外,网络中还挂有不同类型的服务器,如 S1、S2、S3 等。因此在通信网中,通信的双方可以是人与人、机器与机器、人与机器等,通信的形式既可以是一个用户对一个用户,也可以是一个用户对多个用户或多个用户对多个用户。

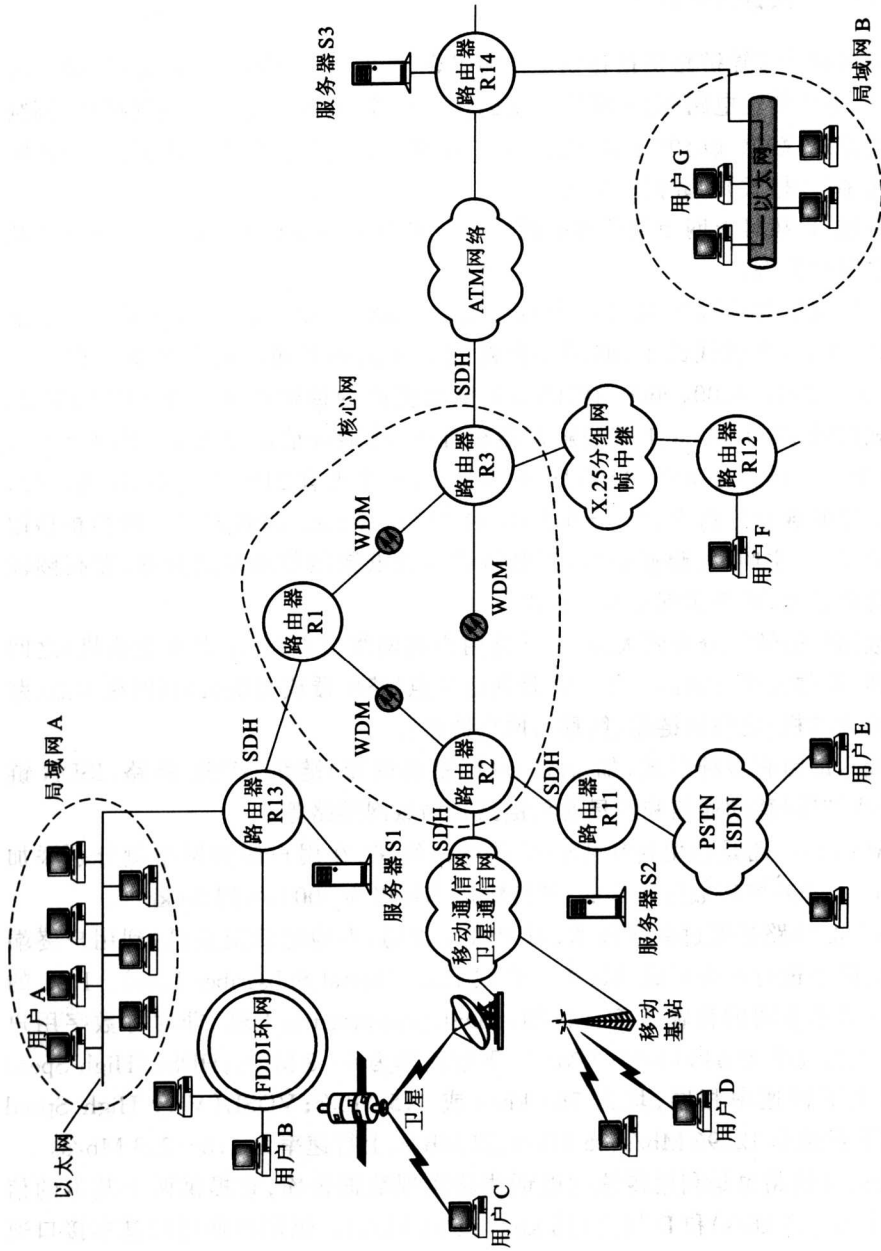


图 1-2 通信网络示意图

1.1.1 数据传输链路

所谓数据传输链路是指在物理传输媒介(如双绞线、同轴电缆、光纤、微波传输系统、卫星传输电路等)上利用一定的传输标准(它通常规定了电气接口、调制解调的方式、数据编码的方式、比特同步、帧格式和复分接的方式等)形成的传输规定速率(和格式)的数据比特通道。

例如:以拨号上网使用的在电话线路上利用 Modem(调制解调器)构成的数据传输链路为例。

它规定了计算机与 Modem 的电器接口为 RS-232C 接口,传输媒介为电话线(双绞线)。在该线路上,利用不同的频带分割和不同的调制方式可以实现 300、1200、2400、4800、9600、19200 b/s 以及更高的传输速率。在 CCITT V.22 标准规定的 1200 b/s 双工调制解调器标准中,将话音信道分为上、下两个子信道,一个子信道占有 900~1500 Hz 的频带,另一个占有 2100~2700 Hz 的频带,已调信号的载频分别为 1200 ± 0.5 Hz 和 2400 ± 1 Hz。调制方式为四相相移键控(QPSK)。主叫(发起通信方)调制解调器在低频段信道发送数据,在高频段信道接收数据,从而实现全双工操作。

数据传输链路分为两大类:一类是用户到网络节点(路由器或交换机)之间的链路(简称为接入链路),另一类是网络节点(路由器或交换机)到网络节点(路由器或交换机)之间的链路(简称为网络链路)。

接入链路有多种形式,如 Modem(调制解调器)链路、xDSL 链路、ISDN 链路、无线链路(移动通信和卫星通信链路)、局域网链路等。

Modem 链路是利用传统 PSTN 的电话线路,在用户侧和网络侧分别添加 Modem 设备来实现数据传输的,其传输速率可以为 300 b/s 到 56 kb/s。

xDSL 链路是通过数字技术,对 PSTN 端局(本地电话交换机)到用户终端之间的线路进行改造而成的数字用户线 DSL(Digital Subscriber Line)。DSL 的前缀 x 表示不同的传输方案。例如:ADSL(Asymmetric DSL,非对称数字用户线)的上行速率为 640 kb/s~1 Mb/s,下行速率为 6~8 Mb/s;HDSL(High Speed DSL)上下行速率相同,均为 768 kb/s 或 1.5 Mb/s;VDSL(Very High Speed DSL)下行速率 12.96 Mb/s、25 Mb/s、52 Mb/s,上行速率为 1.6~2.3 Mb/s。

ISDN 链路也是利用传统的电话线路实现数据传输,它提供两个基本的信道:B 信道(64 kb/s)和 D 信道(16 kb/s 或 64 kb/s)。供用户使用的基本接口速度为 2B+D(144 kb/s),一次群速率接口为 23B+D(1544 kb/s)或 30B+D(2048 kb/s)。

无线链路中最典型的链路就是数字蜂窝移动通信的链路,根据使用的空中接口标准(如:GSM、IS-95、IMT-2000 等)的不同,支持的数据传输速率为十

几 kb/s 到 2 Mb/s。对于卫星链路,根据其星座结构(低轨道、中轨道和静止轨道)和卫星数目几百颗(如 Teledesic 系统 288 颗),几十颗(如 Iridium 系统 66 颗)几颗或单颗(Spaceway)的不同,支持的数据传输速率从几 kb/s 到几百 kb/s。如果采用固定的无线接入技术(如 LMDS 或近距离的无线接入技术,如无线局域网)其速率可达几 Mb/s 至几十 Mb/s。

局域网链路中最典型的是以太网,链路在双绞线上可传输的峰值数据速率为 10 Mb/s、100 Mb/s、1000 Mb/s。这是在办公室环境下,最常用的接入方式。

网络链路也有多种形式,如:帧中继、SDH、WDM 等。

SDH(Synchronous Digital Hierachy,同步数字系统)是在美国贝尔实验室提出的 SONET(Synchronous Optical Network,光同步数字网)的基础上制定的技术标准,它具有一套标准化的结构等级 STM - N ($N = 1, 4, 16, 64$),它们的传输速率分别为 STM - 1(155.520 Mb/s), STM - 4(622.080 Mb/s), STM - 16(2 488.320 Mb/s), STM - 64(9 953.280 Mb/s)。

光波分复用(WDM, Wave Length Divison Multiplexing)技术是在一根光纤中能同时传输多个波长光信号的一种技术。在发端将不同波长的光信号组合(复用)起来。在接收端又将组合的光信号分开(解复用)并送到不同的终端。目前在一根光纤上可提供的数据速率为 4×2.5 Gb/s(第一个数字 4 为波长数,第二个数字 2.5 为每一波长上的速率,后同)、 16×10 Gb/s、 160×2.5 Gb/s、 128×10 Gb/s 等,理论上可达 5 Tb/s 的传输速率。

根据上面的知识,对照图 1-2 可以看出:通信网中的任意两个用户根据他们在网络中所处的位置不同,他们之间的信息传输所经过的传输链路是多种多样的。例如,局域网 B 中的任意两个用户之间是相同特性的链路,而用户 D 与用户 F 之间要经过多种不同特性的链路,即无线链路、SDH 链路、WDM 链路和 X.25 链路等。

1.1.2 数据传输网络

数据传输网络的基本功能是通过网络中的交换机(或路由设备)为运载用户业务的分组,选择合适的传输链路,从而使这些分组迅速可靠地传送到目的用户。(一个分组经过的所有传输链路的集合称为一条路径)。

在数据传输网络中,要传送的基本内容称为消息(message)。根据不同的应用场合,消息可有不同的含义。比如,消息可以是一份电子邮件(E-mail),一份文件,一幅图像等。在要进行交互操作的场合,如:A 可以发一个消息给 B,B 可以发一个应答给 A,双方需要交互多次才可完成信息交换的过程,或者说,双方需要按一定的顺序交换大量的消息。这样一个消息的序列称为一个会话过程(session)。数据传输网络必须保证每一个会话过程可靠、及时、高效地完成。典

型的数据传输网络有分组交换网和 ATM 网等。

1. 分组交换网

在分组交换网中,将消息分成许多比较短的、格式化的数据块称为分组(packet)进行传输和交换。每一个分组由若干比特的数据组成。每一个分组通常包括一个附加的分组头。分组头指明该分组的目的节点及其他网络控制信息。在每一个网络节点中采用存储转发的工作方式来将输入的分组送到选定的输出链路上。这种按照一定的规则(路由算法)将输入分组送到选定的输出链路上的过程称为交换。分组交换网如图 1-3 所示。

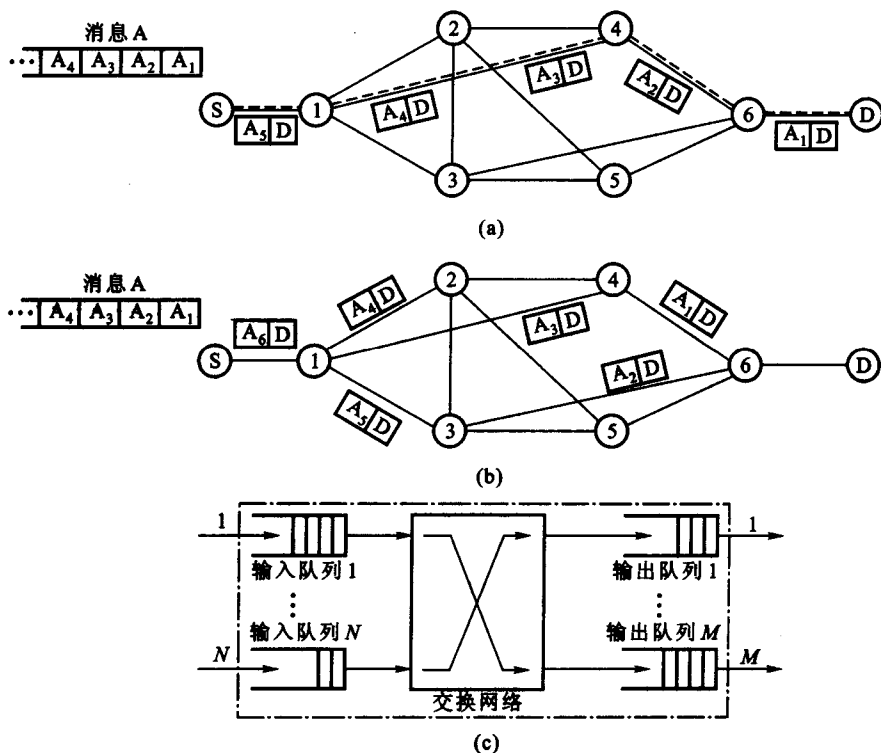


图 1-3 分组交换网

对于图 1-3 所示的分组交换网而言,需要完成三个基本的过程:

(1) 分段和重装的过程。在发端需将一条消息分成规定长度的分组,在收端需要将分组重新装配,恢复原始的消息。

(2) 选择传输路径(确定路由)的过程。在图 1-3 中,节点 S→D 之间可有多种选择,如:路径 A: S→1→4→6→D, 路径 B: S→1→2→4→6→D, 路径 C: S→1→3→6→D 等。如果路径 A 具有最短的时延和最少的中转次数(或满足其他最佳准则),则选择路径 A。在实际分组传输过程中,有两种最基本的选择路由的

方式:一种是虚电路方式,另一种是数据报方式。在虚电路方式中,在一个会话过程开始时,确定 $S \rightarrow D$ 的一条逻辑通路(即实际分组传输时才占用物理链路,无分组传输时不占用物理链路。此时物理链路可用于其他用户分组的传输)。会话过程中所有的分组都沿此逻辑通道进行。例如图 1-3(a)的 $S \rightarrow D$ 之间经过路径 A 建立了一条逻辑通路。每一条逻辑通路中的逻辑链路可用一个虚电路号(VC_n)来表示。在数据报方式中,为会话过程中的每一个分组独立地选择路由,也就是 $S \rightarrow D$ 之间一次会话过程中的分组可以独立地选择路径 A,路径 B 或路径 C 或其他路径。因而,到达目的节点 D 的分组所经过的链路可能各不相同,如图 1-3(b)所示。

(3) 各网络节点的交换过程,该交换过程如图 1-3(c)所示。每个交换节点有 N 条输入链路和 M 条输出链路,每一条输入输出链路可以配置相应的缓冲区,来存储未及时处理的分组的。交换网络的作用是根据选定的路由将输入队列的分组送到指定的输出队列中。

2. ATM 网络

ATM(Asynchronous Transfer Mode)是在传统电话网使用的电路交换* 以及分组交换网基础上发展起来的一种交换技术,可以较好地支持不同速率、不同种类的宽带信息交换。它与分组交换的差别是采用一个全网统一的固定长度的分组(称之为信元)进行传输和交换。ATM 网络中,信元的长度为 53 个字节,其中 5 个字节为信元头,48 个字节用来运载信息。由于信元长度和格式固定,可用硬件电路对信元进行处理,因而缩短了每一个信元的处理时间。它采用面向连接(即虚电路)方式,以提高信息传送的实时性。ATM 设计是以光纤传输为基础,因此在传输链路上采用了非常简单的差错控制和流量控制等措施,提高了信元在网络中的传输速率。

ATM 网络的接口、信元格式和信元交换的过程如图 1-4 所示。

ATM 用户(终端)到 ATM 交换机(网络)之间的接口称为 UNI(User Network Interface,用户网络接口)。交换机(网络节点)之间的接口称为 NNI(Network Node Interface,网络节点接口)。接口 UNI 和 NNI 如图 1-4(a)所示。

ATM 的信元格式如图 1-4(b)所示。UNI 接口和 NNI 接口的信元格式除前 12 个比特格式不同外,其余格式完全相同。GFC(Generic Flow Control)是流

* 电路交换(或称线路交换)是指根据用户的呼叫请求,将输入物理电路直接与输出物理电路相连接的一种交换技术。电路交换机在功能上等效为一个开关矩阵,当某一输入电路要与某一输出电路相连时,则将对应的开关闭合,形成直接的通路。在电路交换网中,在双方通信之前,需要在双方建立一条直接的物理通路,在通信结束后,要拆除该物理通路。在通信过程中,收发双方独占该物理通路。在电路交换方式中,信息的传输具有很短的时延,且可以保持收发双方严格的同步关系。但与分组交换相比,链路使用效率相对较低。

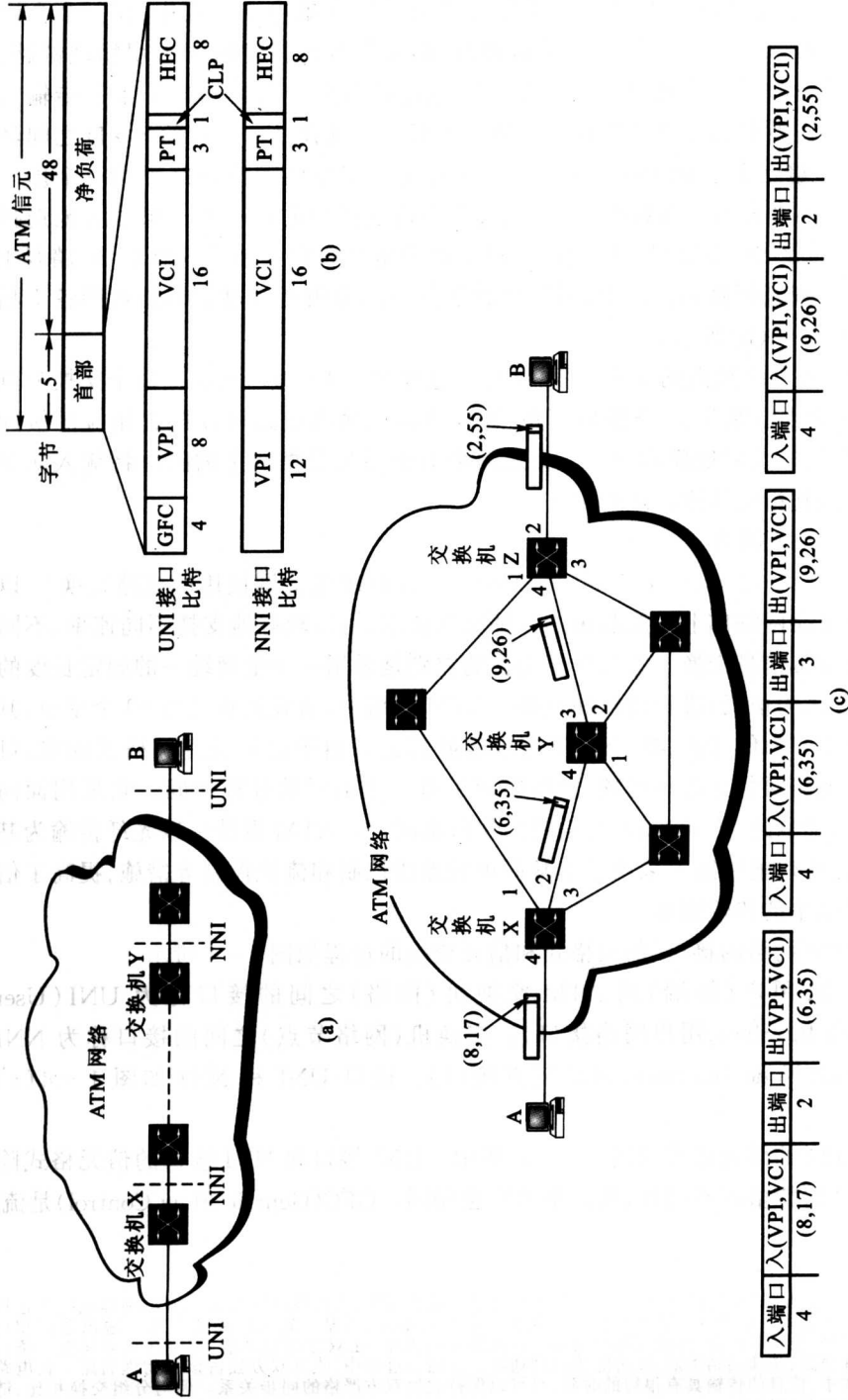


图 1-4 ATM 网络