



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21 世纪

高等院校电子信息类规划教材

Jiaohuan Yuanli
Yu Jishu

交换原理 与技术

© 刘增基 鲍民权 邱智亮 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21 世纪高等院校电子信息类规划教材

交换原理与技术

刘增基 鲍民权 邱智亮 编著

人民邮电出版社
北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

交换原理与技术/刘增基, 鲍民权, 邱智亮编著. —北京: 人民邮电出版社, 2007. 9
21 世纪高等院校电子信息类规划教材. 普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-115-16333-2

I. 交... II. ①刘... ②鲍... ③邱... III. 通信交换—高等学校—教材 IV. TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 081149 号

内 容 提 要

通信网包含传输和交换两大工程。本书集中研究现代通信网 (包括电信网和计算机网) 中的交换技术, 重点讨论分组交换。

全书分为 10 章。主要介绍了交换机在通信网中的地位和作用; 概率论、随机过程及排队论方面的知识; 电路交换网络的工作原理和电路交换控制技术; 传统分组交换方式 (数据报和虚电路) 的基本原理及关键技术; 快速分组交换; 传统以太网和高速以太网的工作原理, 重点研究以太网交换的原理和虚拟局域网技术; 光交换, 将在讲述基于波分复用与波长选路的光网络的基本原理之后, 着重讨论常用光交换设备与器件的工作原理与关键技术; 最后简单介绍光的分组交换和突发交换。

本书可作为通信工程、电子信息工程等专业的大学本科教材, 计划学时数为 60 学时; 也可供信息与通信工程学科的研究生、网络与交换领域的科技人员参考。

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21 世纪高等院校电子信息类规划教材

交换原理与技术

-
- ◆ 编 著 刘增基 鲍民权 邱智亮
责任编辑 滑 玉
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京艺辉印刷有限公司印刷
新华书店总店北京发行所经销
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 19.75
字数: 477 千字
印数: 1-3 000 册
 - 2007 年 9 月第 1 版
2007 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-16333-2/TN

定价: 30.00 元

读者服务热线: (010) 67170985 印装质量热线: (010) 67129223

编者的话

本教材是根据西安电子科技大学通信工程专业教学计划修订的需要而编写的。该专业新的教学计划将原来设置的两门专业课“程控数字交换”和“计算机通信网”，合并为一门专业课，取名为“交换原理与技术”。

现代通信的主要方式是网络通信，即众多用户之间通过通信网络来交流信息。通信网，不论是电信网还是计算机通信网，都是由许多节点和链路按照一定的拓扑构成的。节点又分为端（结）点和中继节点。通信网包含两大工程：传输和交换。节点之间的连接链路的主要功能是传输；中继节点的主要功能是交换。没有交换，就不可能实现端到端（或用户到用户）的通信。因此，不懂交换也就不懂通信。

本教材集中讨论现代通信网，包括电信网和计算机通信网中所采用的交换机制。它们是：电路交换、传统分组交换、快速分组交换和光交换。交换技术是通信网的核心技术，涉及通信网的组织结构、编号制度、路由策略、通信协议和控制管理等方面，所以掌握了交换原理与技术，也就基本掌握了通信网的知识。

本书在第1章绪论中，说明了交换机在通信网中的地位和作用，概述了电路交换、传统分组交换、快速分组交换的基本原理和技术特点，介绍了交换机三大组成部分的基本功能，给出了衡量交换机性能的主要技术指标。为了加强理论基础和提高同学们的研究设计能力，本教材专门用一章（第2章交换理论基础）介绍概率论、随机过程及排队论方面的相关知识；同时在后续的几章中分别运用这些知识对电路交换、分组交换和ATM交换的性能进行了一定的分析。

第3章和第4章分别讨论电路交换网络的工作原理和电路交换控制技术，重点论述数字程控交换机中的数字时分交换网络、存储程序控制原理、实现呼叫连接控制的信令系统及呼叫处理过程。第5章介绍传统分组交换方式（数据报和虚电路）的基本原理及关键技术，主要是路由选择技术。第6、7、8章讲述快速分组交换。第6章以异步转移模式（ATM）为例，讨论面向连接的快速分组交换；在介绍ATM网络结构、工作原理和通信协议的基础上，着重讨论ATM交换的基本原理、交换网络结构及信元缓存策略。第7章以应用于互联网的高性能IP路由器为例，研究非连接型的快速分组交换；在介绍互联网的网际协议IPv4和IPv6及路由选择协议的基础上，着重讲述高速路由器的体系结构与关键技术，包括路由器内部交换网络的结构、线速缓存技术、路由表快速查找技术等。第8章介绍另一种快速分组交换——多协议标记交换（MPLS），说明基本工作原理、标记分配协议和标记交换路径的建立过程。第9章的中心内容是以以太网交换。首先介绍传统以太网和高速以太网的工作原理，然后重点研究以太网交换的原理和虚拟局域网技术。第10章介绍光交换，将在讲述基于波分复用与波长选路的光网络的基本原理之后，着重讨论常用光交换设备与器件的工作原

理与关键技术，最后简单介绍光的分组交换和突发交换。

本教材的第1章和第10章由刘增基执笔；第2、3、4章由鲍民权执笔；第5、6、7、8、9章由邱智亮执笔。全书由刘增基统一修改、定稿。本教材的编写得到西安电子科技大学通信工程学院领导和在综合业务网理论及关键技术国家重点实验室工作的师生们的关心和支持。在此表示衷心的感谢！

由于时间和作者水平的限制，书中错误和不妥之处一定不少，敬请读者批评指正。

编 者
2007年5月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 点对点通信与网络通信	1
1.2 交换机在通信网中的地位与作用	2
1.2.1 公共交换电信网中的电路交换	2
1.2.2 互联网中的分组交换	4
1.3 交换技术发展概述	5
1.3.1 电路交换	6
1.3.2 分组交换	6
1.3.3 快速分组交换	7
1.3.4 标记交换	8
1.4 交换机的一般组成与各部分的功能	9
1.5 交换机的主要性能指标	10
习题和思考题	11
第2章 交换理论基础	13
2.1 概率论与随机过程	13
2.1.1 概率论基础	14
2.1.2 随机过程及应用	19
2.2 通信业务量	24
2.2.1 话务量的概念	24
2.2.2 数据业务量	26
2.2.3 交换系统的服务质量和话务负荷能力	27
2.3 明显损失制电路交换系统的基本理论	28
2.3.1 呼损指标的分配	28
2.3.2 关于利用度的概念	29
2.3.3 服务设备占用概率分布	29
2.3.4 呼损率与设备利用率	32
2.4 等待制交换系统的基本理论	36
2.4.1 等待制电路交换	36
2.4.2 等待制分组交换	38
习题和思考题	39
第3章 电路交换网络结构及工作原理	41
3.1 空分交换网络	41
3.1.1 交叉接点与空分交换器	41
3.1.2 多级交换网络	42

3.1.3	网络阻塞率	44
3.1.4	交换网络举例	45
3.2	数字时分交换网络	47
3.2.1	话音信号的数字化及同步时分复用	47
3.2.2	时间(T型)交换器	50
3.2.3	空间(S型)交换器	54
3.2.4	多级数字时分交换网络	56
3.2.5	数字时分交换网络的时—空等效与阻塞计算	60
3.2.6	数字时分交换网络性能讨论	61
	习题和思考题	63
第4章	电路交换控制	65
4.1	电信网的组织	65
4.1.1	路由规划	65
4.1.2	编号制度	71
4.1.3	计费系统	72
4.1.4	交换机接口与传输系统	73
4.1.5	数字网的同步	78
4.2	信令系统	81
4.2.1	信令的基本概念	81
4.2.2	信令的设计	83
4.2.3	No. 7 信令系统	88
4.3	存储程序控制原理	96
4.3.1	基本功能要求	96
4.3.2	控制系统的结构与特点	97
4.3.3	多机控制系统	99
4.3.4	程序的调度管理	101
4.3.5	交换机软件结构与工具语言	104
4.4	呼叫处理	107
4.4.1	呼叫处理过程	107
4.4.2	输入处理	111
4.4.3	分析处理	114
4.4.4	任务执行和输出处理	117
	习题和思考题	119
第5章	分组交换	121
5.1	分组交换计算机网络概述	121
5.1.1	计算机网络的组成	121
5.1.2	计算机网络的体系结构原理	122
5.1.3	开放系统互连参考模型	127
5.1.4	TCP/IP 体系结构	128

5.2 分组交换原理	129
5.2.1 电路交换技术不适合计算机数据通信	129
5.2.2 异步时分复用	130
5.2.3 分组存储转发	131
5.2.4 分组交换方式(数据报和虚电路)	134
5.3 分组交换网的路由选择	136
5.3.1 路由问题概述	136
5.3.2 非自适应路由选择	140
5.3.3 自适应路由选择	142
5.4 分组交换性能分析	149
5.4.1 分组交换节点的分析模型	149
5.4.2 M/G/1 排队系统的分析	151
5.4.3 M/D/1 和 M/M/1 排队系统的分析	154
5.4.4 分组交换系统的时延和吞吐率	155
习题和思考题	156
第6章 面向连接的快速分组交换	159
6.1 快速分组交换与异步转移模式	159
6.1.1 快速分组交换	159
6.1.2 异步转移模式	160
6.1.3 ATM 网络组成	161
6.2 ATM 网工作原理	162
6.2.1 ATM 信元结构	162
6.2.2 ATM 逻辑连接的建立与释放	163
6.2.3 虚通路标识符和虚通道标识符的转换	165
6.3 ATM 协议参考模型	167
6.3.1 协议参考模型的层面结构	167
6.3.2 物理层	169
6.3.3 ATM 层	170
6.3.4 ATM 适配层	171
6.4 ATM 交换网络的结构及基本原理	172
6.4.1 交换网络的功能及分类	173
6.4.2 ATM 时分交换网络	175
6.4.3 基于 Crossbar 的交换结构	177
6.4.4 ATM 多级交换网络	178
6.4.5 ATM 交换网络的信元缓存策略	180
6.5 ATM 交换机的性能分析	183
习题和思考题	184
第7章 非连接型快速分组交换	186
7.1 互联网的 IP	186

7.1.1	IP 数据报的格式	187
7.1.2	分类的 IP 地址	191
7.1.3	IP 地址与硬件地址	194
7.1.4	地址解析协议 (ARP) 和逆地址解析协议 (RARP)	196
7.1.5	IP 层转发分组的流程	199
7.2	无分类编址与最长前缀匹配	201
7.2.1	无分类编址 (CIDR)	201
7.2.2	最长前缀匹配	204
7.3	互联网的路由协议	205
7.3.1	路由协议概述	205
7.3.2	自治系统内部路由协议 RIP	207
7.3.3	自治系统内部路由协议 OSPF	211
7.3.4	自治系统间的路由协议	217
7.4	下一代互联网的网际协议 IPv6	222
7.4.1	IPv6 分组的格式	222
7.4.2	IPv6 地址	225
7.4.3	从 IPv4 到 IPv6	227
7.5	高性能路由器体系结构及关键技术	228
7.5.1	路由器体系结构的发展	229
7.5.2	路由器的基本结构	232
7.5.3	高性能路由器关键技术概述	234
7.5.4	线速缓存技术	235
7.5.5	路由快速查找技术	239
7.5.6	高性能路由器内部交换网络的结构	245
7.5.7	路由器内部交换网络采用的交换机制	247
	习题和思考题	248
第 8 章	多协议标记交换	252
8.1	MPLS 工作原理	252
8.1.1	基本概念与术语	252
8.1.2	MPLS 的工作过程	254
8.1.3	标记交换路由器结构	254
8.2	MPLS 标记分配协议	255
8.2.1	标记分配协议的协议数据单元	255
8.2.2	标记分配协议	258
8.3	标记交换路径的建立	262
8.3.1	三种 LSP 建立方式	262
8.3.2	LSP 的建立过程	263
8.4	MPLS 性能优势	264
	习题和思考题	266

第9章 以太网交换	267
9.1 传统以太网和 IEEE802 标准	267
9.1.1 IEEE802 标准	268
9.1.2 以太网工作原理	268
9.2 以太网的演进	272
9.2.1 10Mbit/s 以太网	272
9.2.2 100Mbit/s 以太网	273
9.2.3 1Gbit/s 以太网	274
9.2.4 10Gbit/s 以太网	274
9.3 以太网交换	275
9.3.1 以太网交换的基本原理	275
9.3.2 地址自学习	277
9.4 虚拟局域网	278
9.4.1 虚拟局域网概述	278
9.4.2 虚拟局域网的标记方法	279
9.4.3 虚拟局域网的划分	280
9.4.4 VLAN 成员间通信	280
9.4.5 VLAN 间通信	281
习题和思考题	282
第10章 光交换	283
10.1 光波分复用原理	283
10.2 基于波分复用和波长选路的光承载网	285
10.3 光分插复用设备 (OADM)	286
10.4 光交叉连接设备 (OXC)	289
10.4.1 空分光交换	289
10.4.2 波分光交换	291
10.5 光的分组交换与突发交换	293
习题和思考题	295
英文缩写词及中文对照	296
主要参考文献	303

第 1 章 绪 论

本章首先从扩展通信系统规模的需求出发,说明采用交换技术的必要性。通过现有电信网和互联网的构成明确交换节点在通信网中的“交叉路口”地位;指出节点交换机是通信网的关键设备之一,它的主要作用是转发信息。然后,从科学技术发展的角度,概述电路交换、分组交换、快速分组交换、标记交换的基本原理和技术特点。最后,介绍交换机三大组成部分,内部交换网络、交换控制器和接口的基本功能,给出衡量交换机性能的主要技术指标。

1.1 点对点通信与网络通信

通信的基本原理告诉我们,通信系统的基本任务是将信息从它的发源地传送到它的目的地。最简单的通信系统就是如图 1-1 所示的点对点通信系统。通过信道(或称电路)连接起来的两点称为端点,其中配置有通信终端,包含信息的发送设备和接收设备。信道是以传输媒质为物理基础的信号通路,它可能是各种有线或无线电路。

点对点通信的工作方式有单工、半双工和(全)双工三种。由于大量的通信业务都是交互式的,故双工方式是应用最普遍的通信方式。为了支持双工通信,就需要利用双向信道。以下如不作特殊说明,两点之间的信道都是指双向信道。



图 1-1 点对点通信系统

实际上,这种点对点通信系统只在构成某些专用通信电路(如热线)时才被应用;而应用更普遍的是多点之间的通信。按照构成上述点对点通信系统的思路,一个多点通信系统的结构似乎应如图 1-2 所示。这种结构称为终端设备之间的全互连结构,其中任意两个端点之间都需要有一条信道;如果端点数为 N ,则共需 $N(N-1)/2$ 条信道;而且每个终端需要有 $(N-1)$ 个接口。所以这种结构所需的信道数将按 N 的平方律增加,当 N 很大时,其复杂度是不能接受的。另一方面,在每一对端点之间的业务量强度(即占用时间百分数)一般是较小的(小于 0.2)。因而没有必要在每一对端点之间设一条专用信道,换言之,全互连结构的信道利用率是较低的。

为了减小复杂度,最简单的办法是采用如图 1-3 所示的星型网络结构。每个终端通过一条信道连接到中心节点,在那里设有交换机。通过交换中心的转接作用,将需要进行通信的终端连接起来。图 1-3 中示出通过交换机提供的三条端到端连接通路。在这种最简单的网络

中，有三类网络元素，它们是：用户终端、交换机和用户环路（又称为用户线），后者是用户终端与交换机之间的连接信道（电路）。显然，在星型网络中每个终端只需要一个接口，全网只需 N 条信道。与全互连网络相比，复杂度大为降低。但是，一旦中心节点的交换机失效，全网就会瘫痪，也就是说，这种结构的可靠性是不高的。此外，其覆盖地域也受到限制。

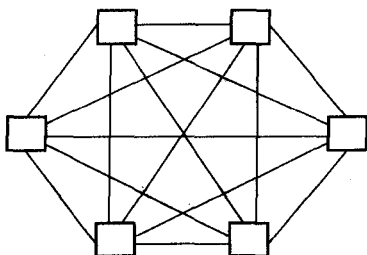


图 1-2 终端之间的全互连结构

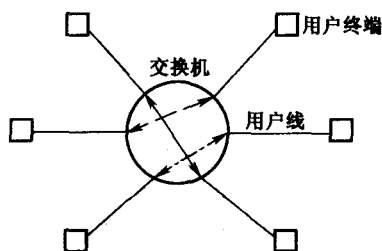


图 1-3 星型组网结构

为了扩大覆盖地域，可采用如图 1-4 所示的包含多个交换节点（SW—交换局）的网络结构。在这种网络中，除了用户终端、交换机和用户线以外，还有一类网络元素，那就是位于交换节点之间的中继线（又称为干线）。与用户线不同，它们不属于用户专用，而是归广大用户共享，按照用户的需求分配使用，因而信道利用率较高。

这样，组网带来的主要好处有：

- (1) 可覆盖更广大的地域，为更多的用户服务；
- (2) 在端到端之间可提供多条路径，从而提高了通信的可靠性；
- (3) 网络资源（交换机、中继线等）为众多的用户共享，因而提高了经济性。

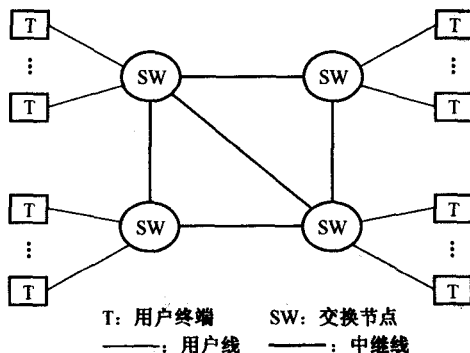


图 1-4 多交换节点一般组网结构

1.2 交换机在通信网中的地位与作用

1.2.1 公共交换电信网中的电路交换

传统的公共交换电信网（Public Switched Telecommunication Networks, PSTN，以下简称电信网）由用户终端、用户环路、交换机和中继线组成，包含本地网和长途网两大部分。它提供的主要业务是电话，所以又称公共电话网。

本地网（Local Network）如图 1-5 所示。用户终端（电话机、传真机或话带数据终端等）经用户环路或用户小交换机接入端局（End Office），俗称市话局。端局内设端局交换机；各端局之间及各端局与长途局之间通过中继线互连；在某些端局之间可能设汇接局，以

提供附加的路由。

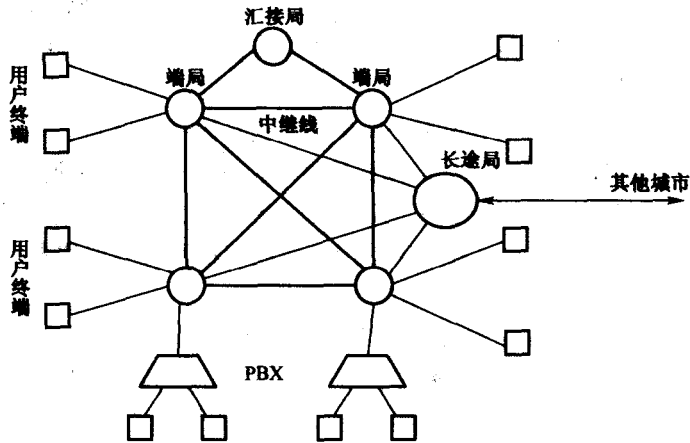


图 1-5 PSTN 的本地网

长途网（Long Distance Network）由长途中继线连接不同等级的长途交换局组成。长途局分若干级（国内分为四级：C1 ~ C4），采用高阶星型加直通电路汇接的结构，上级长途局与隶属于它的下一级局采用星型连接，而在某些业务量大的长途局之间设置直通电路。作为例子，图 1-6 示出两个大区间的长途网络。

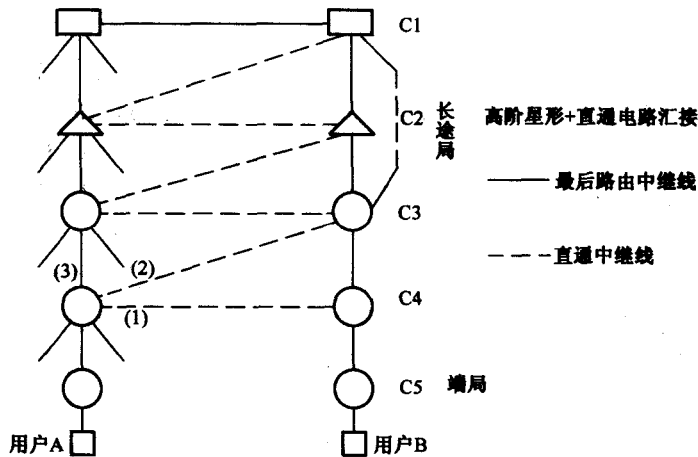


图 1-6 PSTN 的长途网结构

PSTN 有以下特点：

- (1) 这是一个转接式网络，端到端一般要经过交换机多次转接；
- (2) 采用的交换方式是电路交换，网络根据用户的请求提供端到端的连接通路；
- (3) 通信全过程分为建立连接、用户信息传送、拆除并释放连接三个阶段；
- (4) 呼叫连接控制依靠信令系统完成；永久性连接由网络管理系统配置。

在建立连接过程中，网络最重要的任务是寻址与选路。网络要根据主叫（用户终端）提供的被叫（用户终端）地址，选择一条通路。路由选择的基本原则是尽可能选择最短的路径，使呼叫尽快到达终点。所谓“最短路径”，在这里指的是转接次数（跳数）最少的路

径。如图 1-6 所示，为建立用户 A 与用户 B 之间的连接通路，左边的 C4 局应该首先选择标注为 (1) 的那组中继线，其次选择标注为 (2) 的那组中继线，最后选择标注为 (3) 的那组中继线（粗实线）。所以，图 1-6 中的粗实线被称为最后路由由中继线。从图中还可以看出，从一地的 C5 局（端局）到另一地的 C5 局，最多经过 8 次转接，即端局与端局之间串接的链路数最多为 9，或者说用户端到端之间串接的链路数最多为 11。

电信网是一个具有悠久历史的庞大的国际性网络。其中采用的各项技术是经过长期运行和使用的成熟技术，同时又随着科学技术的进步而不断向前发展。特别是光纤传输、程控数字交换、七号信令系统（SSNo. 7）、移动通信网、智能网和网络管理技术的普遍采用，使其趋于完善，工作十分可靠，可给用户提供优质的服务。

电信网的一个发展方向是简化网络结构，扩大本地网的覆盖地域，将长途网由四级减为两级甚至一级；进而将 PSTN 分为接入网和核心网两大部分，端局以上均属核心网。为了支持多种多样的接入网，端局交换机要提供多种接口，除了传统的模拟二线（电话）接口以外，还要有各种数字接口，如基群速率接口（E1）、高速数字用户线（HDSL）接口、不对称数字用户线（ADSL）接口等。

电信网的另一个发展方向是综合业务网，它不仅提供话音业务，而且支持（同时或交替的）数据、视频等多种业务。在这方面，相继出现了以电路交换为主的综合业务数字网（ISDN）和基于异步转移模式（ATM）的宽带综合业务数字网（B-ISDN）。

1.2.2 互联网中的分组交换

互联网（Internet），是一种通过路由器将多个物理网络互连起来的逻辑上统一的计算机网络。从通信业务的角度看，互联网是一种数据通信网，它可以支持 E-mail，FTP，WWW 等多种应用。被互连的网络，通常称为互联网的子网，它们既可以是同类的，也可以是异质的。

图 1-7 和图 1-8 分别示出互联网的原理结构。图 1-7 着重示出多个物理网络通过路由器互连成逻辑上统一的网络；图 1-8 主要示出路由器的地位与作用，而用专线代表物理网络。构成互联网的子网分为两类：一类是用于转发信息的中转网络；一类是信息源或信息宿所在的末端网络，如局域网、传感器网络等。

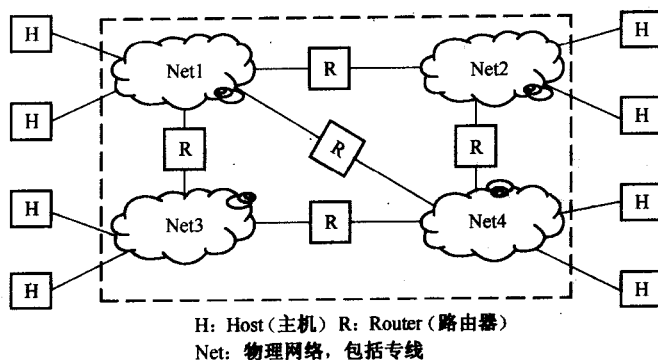


图 1-7 互联网的原理结构

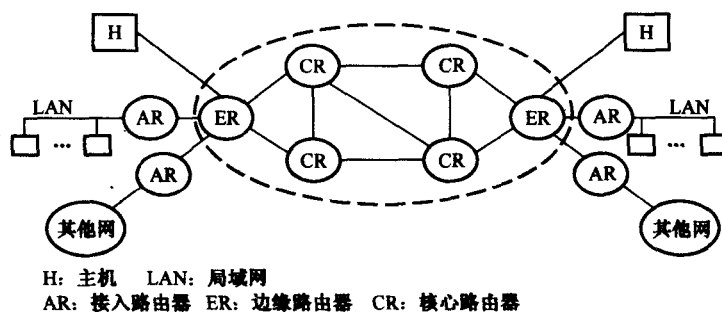


图 1-8 互联网的典型结构

互联网与电信网的主要区别之一是采用基于异步时分复用的分组交换。其中所有信息均以分组（Packet）为单位进行传送，分组长度和分组间隔均可变。路由器基本上是一种分组交换机，它的主要功能是实现分组的“存储转发”。每个路由器首先存储输入的分组，然后根据分组首部所含的地址信息选路，将分组转发到适当的输出端口，并通过相应的输出链路发送给下游的路由器。每个路由器都照此办理，就可实现信息的端到端（主机到主机）的传送。

路由器可分为三种：核心路由器、边缘路由器和接入路由器。前两者构成互联网的核心网（又称骨干网）；后者是各种接入网（如局域网）与核心网的接口。在核心网内连接各路由器的中继线路，称为链路。这些链路可能是专用线，也可能是由物理承载网络（如光网络）提供的传输通道。互联网采用统一的网络层协议工作，这就是著名的 IP（Internet Protocol）。所以各种路由器都要运行 IP，实现 IP 分组的存储转发。

互联网支持的业务是计算机数据，从前只需提供尽力而为（Best Effort）的服务。随着互联网应用范围的不断扩大，它不仅要支持传统的数据业务，而且要支持分组语音、视频及多媒体业务。于是人们对互联网提出了更高的要求，要求它提供服务质量（QoS）的保证。此外，互联网的业务量也在不断地急剧增长。因此，互联网的发展方向是宽带化（高速化），并采取多种措施保证 QoS。

光纤波分复用（WDM）技术的成熟解决了宽带传输的问题。于是路由器成为网络宽带化的瓶颈。近年来高速路由器成为网络发展的热点，继吉比特/秒（Gbit/s）级路由器之后，太比特/秒（Tbit/s）级路由器也已问世。这些高速路由器的共同特点是采用了快速分组交换技术。所以，今天的互联网已经是一个巨大的采用宽带传输和快速分组交换的国际性网络。

1.3 交换技术发展概述

作为人类社会信息基础设施的电信网、互联网和广播电视网都是社会发展过程中的产物。这些网络适应人们的需求而产生，随着科学技术的进步而发展。同样，作为通信网核心技术的交换，一百多年来有了长足的进步。交换的信号从模拟到数字，交换的机制从电路模式到分组模式，交换的控制从人工到自动，交换技术这些具有里程碑意义的发展和变化构成

了现代通信网络的基础。

1.3.1 电路交换

如前所述,基于电路交换的电信网可根据用户的请求提供端到端的连接通路。但这是依靠一系列交换机协同动作来实现的。就某一台交换机而言,它的任务只是按照要求将指定的输入端口与输出端口接通。交换机是一个多输入多输出设备。为了使每一个输入端口都能与任何一个输出端口连接,就需要大量的开关。这些开关需要编织成一定的结构,通常称为交换机的内部交换网络(Switching Fabrics),又称为“接续网络”,其中各开关的状态是由交换控制器设置的。

1876年贝尔发明电话以后,首先出现的是人工交换机。塞绳可以看作这种交换机的内部交换网络,而控制器的任务则由接线员完成。1892年开通了世界上第一部步进制自动交换机,它的接续网络由电磁继电器的接点组成,它的控制器包含许多上升旋转型选择器,由用户话机发出的拨号脉冲信号直接控制。1940年前后,出现了纵横制交换机,其接续网络采用了机电纵横接线器(Crossbar),实际上是一个由继电器控制的开关矩阵,它的控制方式是共同控制,由布线逻辑实现。纵横制交换机曾得到广泛应用,一直延续到20世纪80年代才被更先进的程控交换机所取代。

程控交换机是由计算机存储的程序进行共同控制的交换机,其内部交换网络不再由机电开关构成,而由电子开关构成。交换网络又有模拟空分和数字时分之别。现在得到广泛应用的是数字时分程控交换机。作为电话交换机,它提供的连接通路所支持的基本速率是64kbit/s(即一个PCM话路);作为ISDN交换机,它可支持 $N \times 64\text{kbit/s}$ ($N=1 \sim 30$)的速率;作为宽带电路交换机,它可支持准同步数字序列(PDH)和同步数字序列(SDH)各个等级的速率,如E1(2.048Mbit/s),E3(34.368Mbit/s),STM-1(155.52Mbit/s),STM-16(2.5Gbit/s)以及STM-64(10Gbit/s)等。

由此可见,电路交换是一项既古老又在不断发展和更新的技术。迄今为止,它仍然得到广泛的应用。这是因为它具有以下优点:它能根据用户的需求提供端到端的临时专用通路,在建立连接之后端到端的传送时延是恒定的,基本上等于路径的电波传播时延。这一特点使得它能很好地支持恒定比特率的电话和视频业务。但是,正因为它提供的是临时专用通路,当占用该通路的用户不发任何信息时,该通路的容量也不可能被其他用户所用,所以其信道利用率是不高的。当用户发送的业务具有很强的突发性时,信道利用率就会很低。另外,它支持的传输速率是固定的,因而是不灵活的。

1.3.2 分组交换

如前所述,现代的电路交换是一种数字时分程控交换,它的技术基础是同步时分复用。它利用周期性出现的传输帧来承载用户信息,不同的信息通路是根据时隙在周期性帧内的位置来区分的,由此带来了信道利用率低、速率不灵活等缺点。分组交换是根据数据业务的特征设计的,它的技术基础是异步时分复用(又称统计时分复用)。它利用分组来承载用户信息,分组之间的间隔时间是可变的。因而发送速率是灵活可变的,而且当用户无信息发送

时,就可以不发分组,即不占用信道资源。

分组交换是伴随计算机网络诞生的。1969年,出现了第一个计算机网络 ARPANET,同时也验证了分组交换及相应的一整套通信协议。ARPANET 最初只有四个交换节点,节点间链路的传输速率仅为 56kbit/s。1972年, E-mail 的发明引起了该网络的大发展,用户数和节点数大大增加。1982~1983年, ARPANET 采用 TCP/IP 协议集,从而可以将多个异质的网络互联起来,构成更大的网络。

1986年,美国国家科学基金委员会 (NSF),用 NSFNET 的骨干网将其国内的多个区域网络互连起来,从而开始了互联网的发展。1990年, ARPANET 被关闭。1991年, WWW (World Wide Web) 的发明,1995年,取消互联网只能应用于教育、科研和政府部门的限制,这两者推动了网络业务量和用户数的猛增。

几乎与此同时,采用分组交换的公共数据网 (Packet Switched Public Data Network, PSPDN) 也得到发展。这些公用数据网均基于 ITU-T (原 CCITT) 的 X.25 协议。

于是,出现了两种分组交换。一种是面向连接型的分组交换,又称为虚电路分组交换;另一种是非连接型的分组交换,又称为数据报分组交换。前者的典型协议是 X.25;后者的典型协议是 IP。经过多年的平行发展之后,实践证明, IP 成为主流的分组交换技术。

1.3.3 快速分组交换

分组交换克服了电路交换信道利用率低、速率不灵活的缺点,但它的存储转发机制又带来新的问题。在每个交换节点,对于到达的每个分组都需要作比较复杂的处理,如识别分组首部的协议控制信息 (包括目的地址、源点地址、业务类型等)、选择路由、排队等待、调度输出等,加上分组到达的随机性,流量难于控制,输出速率有限等因素,使得分组在节点内部的排队等待时间有很大的随机性。这就是说,分组的端到端传送时延和时延的抖动难于确保。为了解决这一问题,在 1983 年前后,人们提出了快速分组交换的概念。

快速分组交换 (Fast Packet Switching, FPS),又称高速分组交换,仍然是存储转发式交换,但从多方面采取措施减小分组的转发时延。这些措施是:

- (1) 简化网络协议,尽量通过硬件进行分组的转发处理;
- (2) 大大提高端口及相应链路的传输速率;
- (3) 采用固定长度的小分组,以便于用硬件实现分组交换。

光纤传输为前两个措施的采用提供了可能。光纤传输的高质量 (误码率小于 10^{-9}) 允许人们简化链路层通信协议,取消差错控制所需要的反馈重传;采用宽带光纤传输可大大提高链路的传输速率。大规模和超大规模集成电路的发展又为分组交换的硬件实现奠定了基础。

这样,一种采用定长小分组的快速分组交换体制就应运而生了。这个定长小分组被称为信元 (Cell)。1988年, ITU-T (原 CCITT) 第 18 研究组决定采用固定长度的信元作为信息传送的基本单位,并将这种基于信元的复用与交换体制命名为异步转移模式 (Asynchronous Transfer Mode, ATM)。

ATM 是一种高速低时延的信息传送方式,它采用基于信元的异步时分复用和面向连接的快速分组交换技术。1990~1993年, ITU-T 制订了关于 ATM 的一系列建议。标准规定,