

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相关知识; 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

2007 年 9 月第 1 版

印数: 1-3 000 册

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

此为试读, 需要完整PDF请访问: [www.ertongbook.com](http://www.ertongbook.com)

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
<b>第4章</b>	<b>电路交换控制</b> .....	<b>65</b>
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
<b>第5章</b>	<b>分组交换</b> .....	<b>121</b>
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
<b>第 6 章 面向连接的快速分组交换</b> .....	<b>159</b>
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
<b>第 7 章 非连接型快速分组交换</b> .....	<b>186</b>
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
<b>第 8 章</b>	<b>多协议标记交换 .....</b>	<b>252</b>
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 6 章 面向连接的快速分组交换

传统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，但它只能提供尽力服务，即存在 QoS 问题。本章将讨论一种能够提供 QoS 保证的分组交换技术——面向连接的快速分组交换，其典型例子是异步转移模式（Asynchronous Transfer Mode, ATM）。本章在介绍 ATM 网络的结构、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、交换网络的结构及控制机制<sup>[3,8]</sup>。

### 6.1 快速分组交换与异步转移模式

#### 6.1.1 快速分组交换

传统分组交换是 20 世纪 60 年代末至 70 年代初设计的。当时所用的传输媒质主要是铜线（包括同轴电缆和双绞线电缆），传输速率低（几十 kbit/s），传输误码率高（ $10^{-4} \sim 10^{-6}$ ），因而网络性能的瓶颈是传输链路，而不是交换机。这就导致在链路层采用复杂的差错控制（ARQ）和流量控制协议，因为分组的差错和丢失在链路上解决比端到端解决要节省网络带宽资源的开销。除了链路速率低这一因素之外，当时的数据终端也不能实现数据的高速发送和接收处理。因此，对交换机的容量和处理能力要求不高，而采用基于软件实现的分组交换机是当时的设计趋势。在这种基于软件的分组交换机中，各个分组在交换机内的共享存储器中排队，并由单个 CPU 对分组逐个地进行串行处理，包括完成链路层的差错控制、流量控制功能和网络层的路由选择功能。由于用软件实现分组的存储转发，就能够对分组进行灵活的处理，也允许使用可变的分组长度。

经过几十年的发展，链路的主要传输媒质已变成光纤，其传输速率高达几 Gbit/s，传输误码率低到  $10^{-9}$  以下。网络性能的瓶颈不再是传输链路，而是节点的交换机。这就驱使人们去研究快速的分组交换技术。

快速分组交换的基本设计思想是简化分组交换机的协议处理，将复杂性推向网络边缘，也就是推向端系统。具体的实现快速分组交换的技术措施有如下几种。

(1) 简化协议，取消链路层的差错控制和流量控制。由于光纤传输的误码率很低，逐条链路的差错控制已不再必要，极少发生的差错可以通过端到端的差错控制来解决。另外，流量控制也可以由端系统去实现。

(2) 采用硬件实现分组转发和并行处理技术。在简化协议的基础上, 分组交换的处理负荷相应减轻。随着 CPU 处理速度的提高和并行处理方法的使用, 用硬件实现分组转发成为可能, 而这又进一步提高交换机的处理速度。

(3) 采用固定长度的小分组 (Mini-packet)。缩短分组长度有利于减小分组转发时延, 尽管会引起单位时间内到达的分组数的增加, 但优点还是主要的。采用固定长度的分组有利于分组交换机的硬件设计, 便于安排从不同端口输入的分组, 并实行并行交换。

(4) 采用面向连接的分组交换方式。为了提高交换速度, 每个分组的处理必须尽量简单。在分组交换中比较费时的一个关键功能是路由选择。在无连接分组交换过程中, 每个分组都要有完整的目的地址, 分组到达交换节点时, 交换机要根据分组的目的地址计算或查找路由表, 获得下一节点的地址, 从而将分组转发到相应的输出端口。当路由表的规模比较大时, 每个分组的选路功能是相当费时的, 对交换速度有重要的影响。采用面向连接的方式, 在用户信息传送之前, 先建立端到端的虚通路连接, 在建立连接阶段实现复杂的路由计算功能。这样, 在用户信息传送阶段, 各分组不需携带目的地址, 只需携带虚通路标识, 更重要的是不需要完成选路功能, 因为路由在建立连接阶段已经确定了。在建立连接阶段, 还可以实现带宽等资源的分配, 通过连接接纳控制可限制进网的业务量, 因而可提供 QoS 保证。对于语音、视频和批数据的传送, 面向连接的交换方式是很适合的, 因为在连接建立以后用户信息的传送将持续相当长的时间, 有限的连接建立时延只占很小的比例。面向连接的方式也有缺点。首先在传送单个短分组的场合, 其效率是很低的, 而且在承载多个独立短分组的情况下, 会引起连接的频繁建立和释放, 消耗过多的网络资源; 其次, 对每批次数据传送而言, 存在连接建立时延, 除非提前建立连接或使用预先建立的永久性虚通路。

### 6.1.2 异步转移模式

采用上述快速分组交换技术的异步转移模式是发展综合业务数字网过程中的产物。20 世纪 80 年代以前, 形成了三大网络 (电话网、计算机网和电视网) 并存的局面, 它们采用了最适合于自身业务的复用与交换体制及相应的通信协议。这些相互独立的网络用途各异, 技术体制各异, 重复建设, 经济性差, 很难互连互通, 而且不便支持新出现的业务。因此, 人们一直在寻找、设计一种理想的网络, 即采用一个统一的网络为用户提供多种业务 (包括语音、数据、视频等业务)。早在 20 世纪 70 年代就提出了综合业务数字网的构想。从 1980 年至 1988 年, CCITT (现 ITU-T) 大力研究窄带综合业务数字网 (ISDN), 并形成了标准, 技术上逐渐成熟。但由于接口不灵活, 未能给用户提供更多的新业务, 其应用受到限制。自 20 世纪 80 年代中期以来, 开始致力于研究宽带综合业务数字网 (B-ISDN), 于 1986 年提出异步转移模式 (ATM)。由于 ATM 具有一系列的优点, 它很快被接受, 并被 ITU-T 确定为 B-ISDN 的基础转移模式。另外, 光通信技术的迅速发展加快了 B-ISDN 的前进步伐, 光通信具有容量大、误码率极低等特点, 为语音、数据和动态图像等业务的综合传输提供了理想的宽带传输平台。除了技术因素的推动以外, B-ISDN 的提出也是需求牵引的结果, 其中最主要的是计算机数据通信业务量的猛增及多媒体业务的出现, 要求建立一个宽带、通用且灵活的数字网络, 能以统一的方式为用户提供各种业务。正是由于技术的进步和需求的牵

引，导致了 B-ISDN 及其核心技术 ATM 的产生与发展。

异步转移模式 (ATM) 这一术语中的“转移”，是从“Transfer”翻译过来的，包含传输 (Transmission) 和交换 (Switching) 两个方面，所以信息转移模式意指信息在网络中的传输和交换的方式。所谓“异步”是相对于“同步”而言，指链路的传输及节点的交换都是基于异步时分复用技术 (其原理见 5.2.2 节)。

ATM 采用异步时分复用，信道利用率高，能满足不同速率业务以及变速率业务共享信道资源的需要。ATM 采用快速分组交换，所有信息在网中以称为信元 (Cell) 的固定长度小分组为单位进行传输与交换，减小了交换结构和缓存器管理的复杂性，便于用硬件实现交换功能，提高交换速率，也便于支持多种业务的综合，对支持未来新业务的接入具有更强的适应性。它取消了传统分组数据网中的逐段链路差错控制和流量控制，采用端到端差错控制和流量控制，从而降低了信元在交换节点的处理时延。这是由于采用了低误码率的光纤作为传输媒质，允许简化链路通信协议。ATM 采用面向连接方式，在用户信息正式传送之前，先有一个虚通路建立连接阶段，在这一阶段完成复杂的路由计算功能及带宽等网络资源的预留或分配功能，从而可保证建立的连接具有所要求的服务质量。

ATM 网络既能支持实时业务，又能支持非实时业务；既能支持恒定比特率 (Constant Bit Rate, CBR) 业务，又能支持可变比特率 (Variable Bit Rate, VBR) 业务；既支持窄带业务，又支持宽带业务。由于 ATM 的诸多优点，1990 年 ITU-T 正式将 ATM 确定为 B-ISDN 的信息转移模式。

顺便指出，ATM 的发展并不如当初预期的那样顺利。由于 ATM 技术复杂且价格较高，同时无连接的 Internet 发展非常快，快速以太网和千兆以太网又已推向市场，这就使得 ATM 目前主要的应用场合是作为 Internet 的高速骨干网。

### 6.1.3 ATM 网络组成

与其他网络一样，ATM 网络也是由节点和链路组成，而节点又分为端 (结) 点 (Endpoint) 和中继节点，在中继节点上设置 ATM 交换机。ATM 端点就是在 ATM 网络中能够发送或接收信元的源站或目的站，它们可能是计算机或其他用户终端 (如视频终端、数字电话终端等)。ATM 端点通过接入链路与 ATM 交换机相连。ATM 交换机就是一个快速分组交换机，其主要构件是交换网络 (Switching Fabric, 又称交换结构)、交换控制器、若干个高速输入和输出端口及必要的缓冲区，后面将深入讨论 ATM 的交换网络及其控制机制。

最简单的 ATM 网络可以只有一个 ATM 交换机，并通过一些点到点链路与各 ATM 端点相连。较小的 ATM 网络有少量的 ATM 交换机，一般都连接成网状网以获得较好的连通性。大型 ATM 网络拥有数量较多的 ATM 交换机，并按照分级的结构连成网络。

图 6-1 所示的网络由一个最简单的 ATM 网络和一个具有三个 ATM 交换机的小型 ATM 网络互连而成。我们应注意到图中画出了两种不同的接口。这就是：

- 用户网络接口 (User-Network Interface, UNI) 这是 ATM 端点与它们所连接的 ATM 的交换机之间的接口；
- 网络节点接口 (Network-Node Interface, NNI) 这是在 ATM 网络中两个交换机之间或在两个 ATM 网络之间的接口。

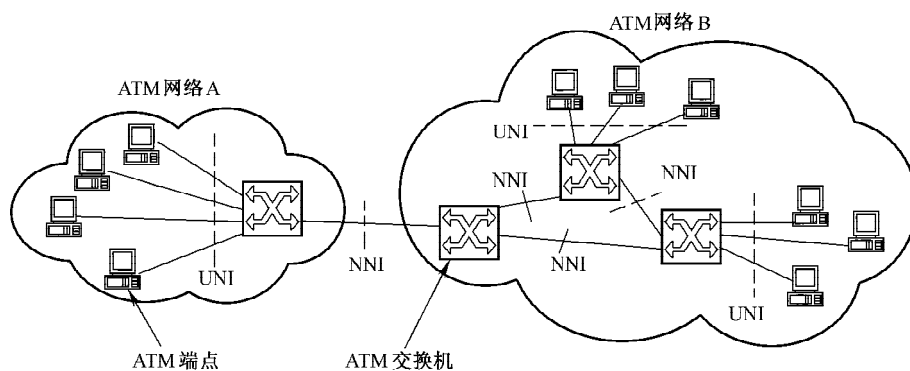


图 6-1 ATM 网络的组成及接口

## 6.2 ATM 网工作原理

### 6.2.1 ATM 信元结构

ATM 信元是一种固定长度的小分组，其标准长度为 53 字节（每字节含 8bit）。它由 5 个字节的标头域和 48 字节的载荷域组成。信元标头包含着信元在 ATM 网络中转移所需的信息，主要是路由信息。图 6-2 所示为 ATM 信元的结构。

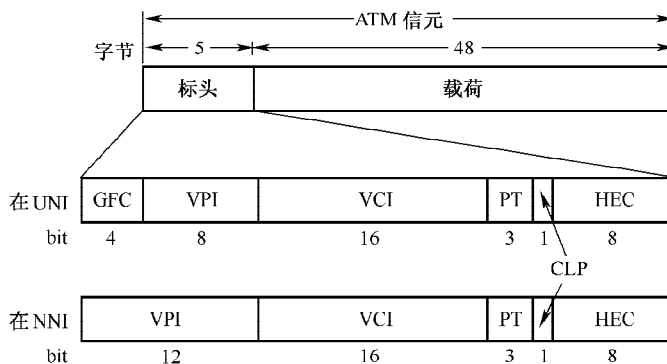


图 6-2 ATM 信元结构

图 6-2 中示出 ATM 信元有两种不同的标头，分别对应于用户网络接口 UNI 和网络节点接口 NNI。下面介绍 ATM 信元标头中各字段的作用。

- 一般流量控制（Generic Flow Control, GFC）：长度为 4bit，通常置为 0。根据 ITU-T 建议，GFC 用来在共享媒质的 UNI 上进行接入流量控制，点到点配置不需要这一接入控制功能。GFC 字段完成的是类似局域网 MAC 子层的功能，与 ATM 层的处理无关。

- 虚通道标识 VPI/虚通路标识 VCI：提供路由信息，用来标识 ATM 信元所属的虚通道（VP）/虚通路（VC）。虚通道标识符 VPI 有两种长度：在 UNI 使用的 VPI 为 8bit，在 NNI 使用的 VPI 为 12bit。虚通路标识符 VCI 占 16bit。因此，在 UNI 的接入链路上最多可支持 256 个 VP，在 NNI 的中继链路上最多可支持 4096 个 VP，而每一个 VP 所包含的 VC 最多可

达 65535 个。需要注意的是，许多 VPI/VCI 取值组合已经被定义了特定的功能，比如 VPI = 0，VCI = 5，用来标识默认的信令虚通路。

- 载荷类型 (Payload Type, PT)：用来区分该信元是用户信息信元或非用户信息信元。非用户信息信元包括 OAM (运行维护和管理) 信元和 RM (资源管理) 信元。此 3bit 字段的详细编码见表 6-1 所示。从表中可看出，第 1 个比特为 0 表示是用户信息信元；对于这类信元，第 2 个比特指示是否发生了拥塞 (该比特由网络的 ATM 交换机填写)，第 3 个比特用来区分服务数据单元 SDU 的类型 (以后再说明其使用)。例如，一个信元发出的 PT 为 000，如果在到达时变成了 010，那么目的站就知道网络出现了拥塞。

表 6-1 PT 字段的编码

PT 的编码	载荷类型	含 义	
000	用户信息	无拥塞	SDU 类型 = 0
001			SDU 类型 = 1
010		有拥塞	SDU 类型 = 0
011			SDU 类型 = 1
100	OAM 信息	与分段 F5 流有关的	
101		与端到端 F5 流有关的	
110	流量管理信息	资源管理	
111		保留	

- 信元丢失优先级 (Cell Loss Priority, CLP)：此 1bit 字段用来指示信元的丢失优先级。若 CLP = 0 就表示该信元是一个高优先级信元，而 CLP = 1 则表示该信元是一个低优先级信元。当网络负荷很重时，ATM 交换机可选择丢弃 CLP = 1 的信元以缓解网络可能出现的拥塞。除了端系统可直接指定 CLP 值外，网络还可以将违反通信流量合约的那些信元的 CLP 从 0 改为 1，这个过程称为“打标记” (Tagging)。

- 标头差错控制 (Header Error Control, HEC)：此字段长度为 8bit，提供覆盖信元标头所有字段的差错校验。HEC 可前向纠正发生在信元标头中发生的单个比特错误，并可检测多个比特错误。

## 6.2.2 ATM 逻辑连接的建立与释放

如 6.1 节所述，ATM 采用面向连接的快速分组交换。在用户信息开始传送之前，要先建立端到端的虚电路。与传统分组交换的虚电路相似，在 ATM 中使用的虚电路也是一种逻辑连接。虚电路连接的建立、维持和释放是 ATM 交换机的基本功能。两个端用户要进行通信，首先必须建立虚电路连接，然后才能在这个端到端连接的逻辑通路上以恒定的或可变的速率进行通信。通信完毕后再释放连接。

ATM 的虚电路分为两个级别，它们是：虚通道 (Virtual Path, VP) 和虚通路 (Virtual Channel, VC)。相应的逻辑连接分别称为虚通道连接 VPC 和虚通路连接 VCC。一个端到端的连接一般由若干段串接而成，其中每一段称为链路。因此，相应的有 VP 链路和 VC 链路，它们分别用 VPI 和 VPI + VCI 标识。这里需要强调指出的是，VPI 和 VCI 不是端到端虚通道

和虚通路的标识符，而是 VP 链路和 VC 链路的标识符；一个端到端逻辑连接的各段逻辑链路的标识符一般是不相同的，换句话说，VPI 和 VCI 只具有局部意义。VC 链路、VP 链路 & 物理链路的关系如图 6-3 所示。一条物理链路包含多条 VP（链路），每一 VP（链路）又包含许多 VC（链路）。VPI 相同，VCI 不同，标识不同的 VC；VPI 不同，VCI 相同，也代表不同的 VC。所以要用 VPI + VCI 作为 VC（链路）的标识符。

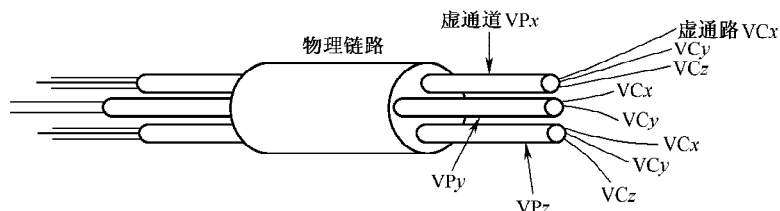


图 6-3 VC 链路、VP 链路 & 物理链路的关系

下面以图 6-4 所示的简单 ATM 网络为例来说明逻辑连接建立和释放的大致过程。

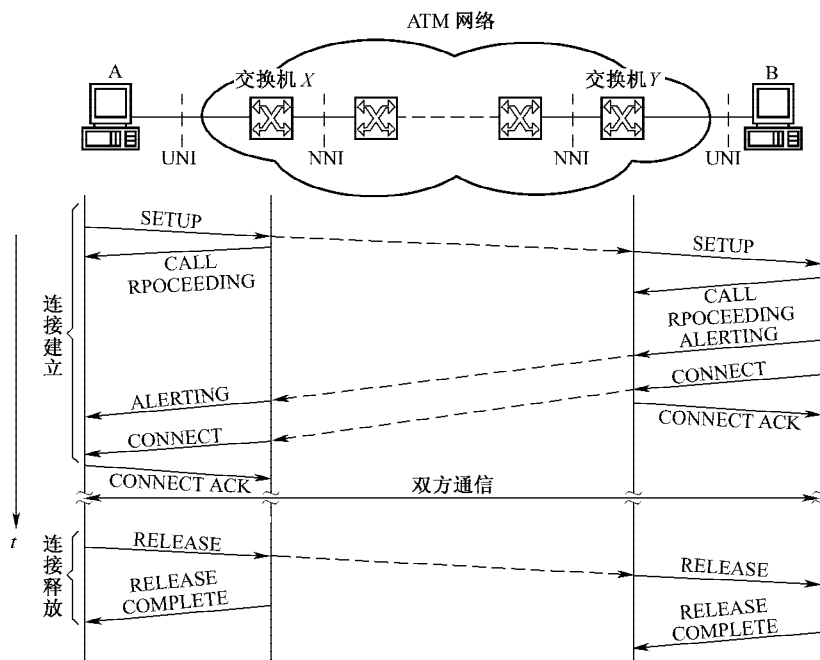


图 6-4 ATM 连接的建立 & 释放

逻辑连接的建立 & 释放是通过 ATM 信令系统实现的。ATM 在 UNI 和 NNI 处的信令协议是不同的。ATM 论坛已制订出 UNI3.1 和 UNI4.0 信令规范，详细地规定了 UNI 点对点 & 点对多点配置的信令消息格式 & 整个的控制过程。ITU-T 也制订了相应的 UNI 信令标准，如 Q.2931 和 Q.2971。关于 NNI 信令，可采用 ITU-T 制订的七号信令系统的 B-ISDN 用户部分 (B-ISUP) 或 ATM 论坛的 P-NNI 信令。

用于呼叫连接建立 & 释放的 UNI 信令消息 (Signaling Message) 主要有 7 种，各种消息的含义如表 6-2 所示。需要指出的是，信令消息是通过信令虚通路来传送的。消息的内容包括呼叫参考值、消息类型、消息长度以及信息元素或参数 (如被叫/主叫用户地址、连接标

识 VPI/VCI、用户信元速率、宽带承载能力和服务质量参数等)。

表 6-2 ATM 的呼叫连接控制信令消息

消息类型	当终端发送时的意义	当网络发送时的意义
SETUP	请求建立连接	有一个呼叫到来 (incoming call)
CALL PROCEEDING	收到呼叫	连接建立的请求正在进行处理
ALERTING	已开始提醒被叫用户	被叫终端已开始提醒被叫用户
CONNECT	接受呼叫	呼叫请求已被接受
CONNECT ACK	对 CONNECT 消息的确认	对 CONNECT 消息的确认
RELEASE	请求释放连接	一个端点发出了连接释放请求
RELEASE COMPLETE	对 RELEASE 的确认	对 RELEASE 的确认, ATM 网络已释放逻辑连接

一个连接可能要通过 ATM 网络中的多个交换机。为简单起见,在图 6-4 中只表示 UNI 信令的传送过程,而 NNI 信令的传送过程用虚线箭头表示。

下面简述呼叫连接控制过程。

主叫用户终端 A 使用 UNI 信令 SETUP 向与其相邻的 ATM 交换机 X 发起呼叫连接请求,设被叫用户终端是 B。交换机 X 收到 SETUP 后,一边向端点 A 发送 CALL PROCEEDING,表示已收到该呼叫;一边发送相应的 NNI 信令给下一个节点。该 NNI 信令经过网络内部多个节点的转发,一直到达与终端 B 相邻的交换机 Y。交换机 Y 接着向 B 发送 SETUP 消息,表示有一个呼叫到来。被叫终端 B 收到 SETUP 后,向交换机 Y 回应 CALL PROCEEDING 消息(可选),表示连接建立请求正在进行处理。处理完毕后,如果可以接受呼叫,终端 B 就发出 ALERTING 消息,表示已开始提醒被叫用户(例如给用户振铃)。交换机 Y 用相应的 NNI 信令将 ALERTING 消息转发到主叫侧。在被叫用户接受呼叫(例如摘机)时,终端 B 向网络发出 CONNECT 消息,交换机 Y 一边将该消息转发到主叫侧,一边向终端 B 回应 CONNECT ACK 消息,以示确认。主叫终端 A 收到 CONNECT 消息后,也可回应一个 CONNECT ACK 消息。至此就完成了逻辑连接的建立过程。

接着就可以进行双向或单向的用户信息传送。传送完毕后,任何一端都可以发起连接释放过程。通过交换 RELEASE 和 RELEASE COMPLETE 这两条消息即可释放连接。

需要指出,ATM 标准没有指明任何特定的路由选择算法。基于 ATM 的 B-ISDN 是传统电信网的发展,其路由算法自然应与电信网一致(参看第 4 章)。如果将 ATM 应用于计算机网络,其路由算法最好应与计算机网取得一致。

### 6.2.3 虚通路标识符和虚通道标识符的转换

前面已经讲过,ATM 信元在 ATM 网络中一定是在某一个特定的虚通路上按序传送的。因此,ATM 信元的标头至少要有个虚通路标识符 VCI,以便唯一地标识该信元属于哪一个虚通路。若 ATM 交换机收到一个信元,但其 VCI 与该交换机所知道的任何虚通路均无联系,则 ATM 交换机就丢弃此信元。

那么,ATM 信元是怎样得到其虚通路标识符呢?

设端点 A 与端点 B 进行通信,它们之间建立了一条逻辑连接。端点 A 必须给新建立的

连接指派一个虚通路标识符 VCI，显然，这个 VCI 不能和端点 A 正在使用的其他 VCI 重复。然而端点 B 可能同时接收其他一些端点发来的信元，这些端点都是独立地选择自己的 VCI 值。这样，端点 B 很可能收到来自不同端点的但具有相同 VCI 的信元，结果使端点 B 无法确定这些信元的源端点。

为了解决上述矛盾，最简单的方法就是使所有的 VCI 只在每一段物理链路上具有唯一的值。当信元在一条虚通路上传送时，每经过一段链路，VCI 值都可以改变。下面通过一个简单的例子来说明这点。我们设从端点 A 到端点 B 经过 ATM 交换机 X、Y 和 Z（如图 6-5 所示）。

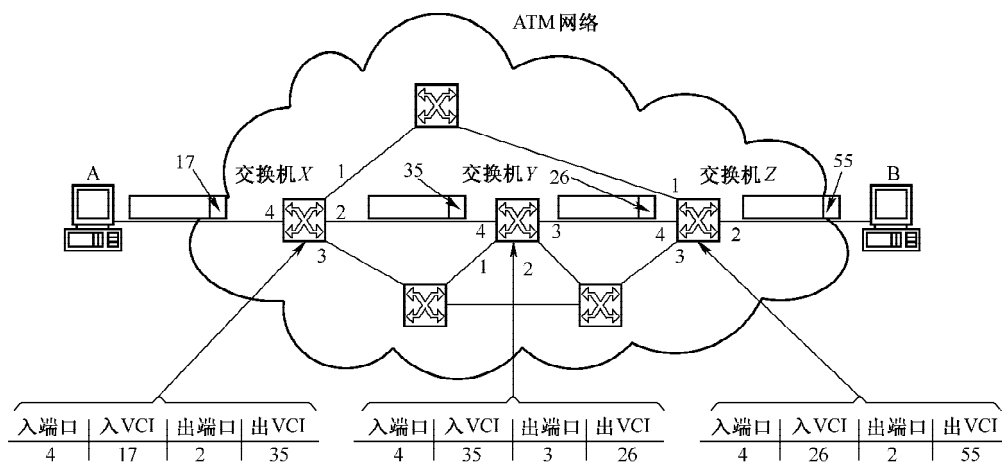


图 6-5 逻辑连接举例

设端点 A 将它到交换机 X 之间传输的信元的 VCI 值置为 17，信元从端口 4 进入交换机 X。交换机 X 从端口 2 向交换机 Y 转发此信元，将 VCI 转换为交换机 X 未使用的 VCI 值，如 35。交换机 Y 从端口 4 收到此信元，从端口 3 向交换机 Z 进行转发，再将 VCI 转换为 26。最后，交换机 Z 从端口 4 收到信元，从端口 2 向端点 B 进行转发，并将 VCI 转换为 55。

从以上的讨论可以看出。在每一个交换机中应当有一个 VCI 的转换表，其中至少要有 4 个参数，即入端口号、入 VCI 值，出端口号以及出 VCI 值。应当注意的是，在上述的 VCI 转换表中存放的是已经建立的虚通路的路由选择信息。

上述 VCI 值的分配和转换方法有两个好处。第一，使网络具有良好的可扩展性 (Scalability)，因为给某一条虚链路分配一个 VCI 值并不需要网络的全局信息。每个交换机只要保证与它相连的虚链路具有唯一的 VCI 值即可。第二，使 VCI 值只具有局部意义可大大增加全网可供分配的 VCI 值的数目。否则，当 ATM 网络的端点数增多时，每一个端点所能分配到的 VCI 的值的数目就会减小。

在一个较大的 ATM 网络中，通过 ATM 交换机的虚通路可能有几万条。在 VCI 转换表中每一条虚通路都要占据一行。当虚连接不断地建立和释放时，对交换机的内存和处理机来说都是相当大的负担。

解决上述问题可借用公共电话网中采用的方法。在电路交换的电话网中，交换机要对成千上万条话路连接进行处理。电话网采用汇接交换机对群路进行交换。例如，一个一次群 E1 有 30 个话路。当交换机以群路为单位进行交换时，就比以单个话路为单位的交换减少很多的处理开销。