

第3章 广域通信网

广域网是通信公司建立和运营的网络,覆盖的地理范围大,可以跨越国界,到达世界上任何地方。通信公司把它的网络分次(拨号线路)或分块(租用专线)地出租给用户以收取服务费用。计算机连网时,如果距离遥远,需要通过广域网进行转接。最早出现的也是普及面最广的通信网是公共交换电话网,后来出现了各种公用数据网。这些网络在因特网中都起着重要作用,本章主要讲述的是广域网技术。

3.1 公共交换电话网

公共交换电话网(Public Switched Telephone Network, PSTN)是为了话音通信而建立的网络,从20世纪60年代开始又被用于数据传输。虽然各种专用的计算机网络和公用数据网已经迅速发展起来,能够提供更好的服务质量和更多样的通信业务,但是PSTN的覆盖面更广,联网费用更低,因而在有些地方用户仍然通过电话线拨号上网。

3.1.1 电话系统的结构

电话系统是一个高度冗余的分级网络。图3-1所示为一个简化了的电话网。用户电话通过一对铜线连接到最近的端局,这个距离通常是1~10km,并且只能传送模拟信号。虽然电话局间干线是传输数字信号的光纤,但是在用电话线连网时需要在发送端把数字信号变换为模拟信号,在接收端再把模拟信号变换为数字信号。由电话公司提供的公共载体典型的带宽是4000 Hz,称其为话音信道。这种信道的电气特性并不完全适合数据通信的要求,在线路质量太差时还需采取一定的均衡措施,方能减小传输过程中的失真。

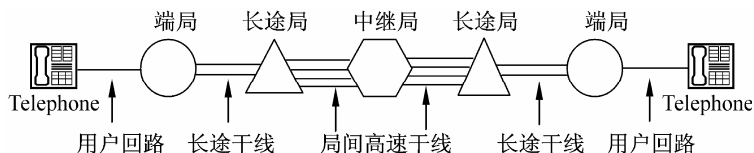
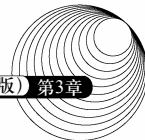


图 3-1 电话系统示意图

公用电话网由本地网和长途网组成,本地网覆盖市内电话、市郊电话以及周围城镇和农村的电话用户,形成属于同一长途区号的局部公共网络。长途网提供各个本地网之间的长话业务,



包括国际和国内的长途电话服务。我国的固定电话网采用 4 级汇接辐射式结构。最高一级有 8 个大区中心局, 包括北京、上海、广州、南京、沈阳、西安、武汉和成都。这些中心局互连接, 形成网状结构。第二级共有 22 个省中心局, 包括各个省会城市。第三级共有 300 多个地区中心局。第四级是县中心局。大区中心局之间都有直达线路, 以下各级汇接至上一级中心局, 并辅助一定数量的直达线路, 形成如图 3-2 所示的 4 级汇接辐射式长话网。

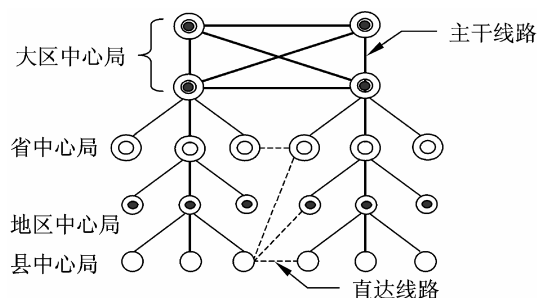


图 3-2 4 级汇接辐射式长话结构示意图

3.1.2 本地回路

用户把计算机连接到电话网上就可以进行通信。按照 CCITT 的术语, 用户计算机叫做数据终端设备 (Data Terminal Equipment, DTE), 因为这种设备代表通信链路的端点。在通信网络一边, 有一个设备用于管理网络的接口, 这个设备叫数据电路设备 (Data Circuit Equipment, DCE)。DCE 通常指调制解调器、数传机、基带传输器、信号变换器、自动呼叫和应答设备等。它们提供波形变换和编码功能, 以及建立、维持和释放连接的功能。物理层协议与设备之间 (DTE/DCE) 的物理接口以及传送位的规则有关。物理介质的各种机械的、电磁的特性由物理层和物理介质之间的界线确定。实际设备和 OSI 概念之间的关系如图 3-3 所示。

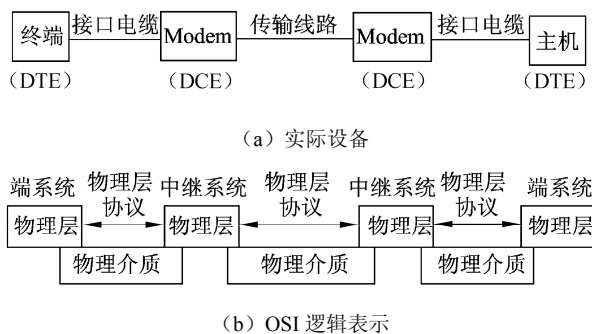


图 3-3 实际设备和 OSI 逻辑表示之间的关系

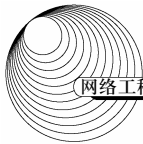


图 3-3 (a) 中的传输线路可以是公共交换网或专用线。在通信线路采用公共交换网的情况下,正式进行数据传输之前,DTE 和 DCE 之间先要交换一些控制信号以建立数据通路(即逻辑连接);在数据传输完成后,还要交换控制信号断开数据通路。交换控制信号的过程就是所谓的“握手”过程,这个过程和 DTE/DCE 之间的接插方式、引线分配、电气特性和应答信号等有关。在数据传输过程中,DTE 和 DCE 之间要以一定的速率和同步方式识别每一个信号元素(1 或 0)。对于这些与设备之间通信有关的技术细节,CCITT 和 ISO 用 4 个技术特性来描述,并给出了适应不同情况的各种标准和规范。这 4 个技术特性是机械特性、电气特性、功能特性和过程特性。下面以 EIA (Electronic Industries Association) 制定的 RS-232-C 接口为例说明这 4 个技术特性。

1. 机械特性

机械特性描述 DTE 和 DCE 之间物理上的分界线,规定连接器的几何形状、尺寸大小、引线数、引线排列方式以及锁定装置等。RS-232-C 没有正式规定连接器的标准,只是在其附录中建议使用 25 针的 D 型连接器(如图 3-4 所示)。当然,也有很多 RS-232-C 设备使用其他形式的连接器,特别是在微型机的 RS-232-C 串行接口上大多使用 9 针连接器。

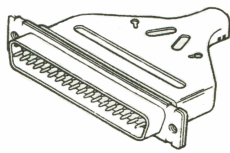


图 3-4 D 型连接器

2. 电气特性

DTE 与 DCE 之间有多条信号线,除了地线之外,每根信号线都有其驱动器和接收器。电气特性规定这些信号的连接方式以及驱动器和接收器的电气参数,并给出有关互连电缆方面的技术指导。

图 3-5 (a) 给出了 RS-232-C 采用的 V.28 标准电路。V.28 的驱动器是单端信号源,所有信号共用一根公共地线。信号源产生 3~15 V 的信号,正负 3V 之间是信号电平过渡区,如图 3-6 所示。当接口点的电平处于过渡区时,信号的状态是不确定的;当接口点的电平处于正负信号区间时,对于不同的信号线代表的意义不一样,如表 3-1 所示。

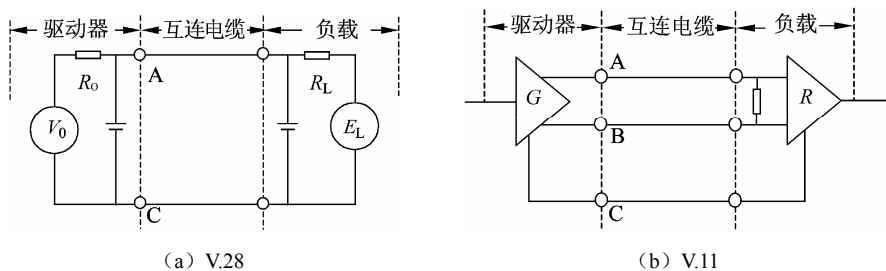


图 3-5 CCITT 建议的接口电路

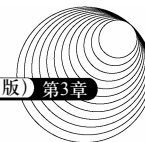


图 3-6 接口电路的信号区间

表 3-1 接口电平的含义

类 型	-3~-15V	+3~+15V
数据线	1	0
控制线和定时线	OFF	ON

另外两种常用的电气特性标准是 V.10 和 V.11。V.11 是一种平衡接口，每个接口电路都用一对平衡电缆构成各自的信号回路（如图 3-5（b）所示）。这种连接方式减小了信号线之间的串音。V.10 的发送端是非平衡输出，接收端则是平衡输入，用于以上两种电路之间的转接。

3. 功能特性

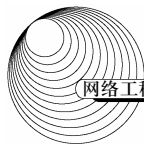
功能特性对接口连线的功能给出确切的定义。从大的方面，接口线的功能可分为数据线、控制线、定时线和地线。有的接口可能需要两个信道，因而接口线又可分为主信道线和辅助信道线。

RS-232-C 采用的标准是 V.24。V.24 为 DTE/DCE 接口定义了 44 条连线，为 DTE/ACE 定义了 12 条连线。ACE 为自动呼叫设备，有时和 Modem 做在一起。按照 V.24 的命名方法，DTE/DCE 连线用“1”开头的三位数字命名，例如 103、115 等，称为 100 系列接口线。DTE/ACE 连线用“2”开头的三位数字命名，例如 201、202 等，称为 200 系列接口线。

RS-232-C 定义了 21 根接口连线的功能，按照 RS-232-C 的术语，接口连线叫做互换电路。表 3-2 给出了 RS-232-C 互换电路的功能定义，同时列出了 V.24 对应的线号。表中对每一条互换电路的功能进行了简要的描述，也说明了电路的信号方向。关于这些互换电路的使用方法则属于下面要讨论的过程特性。

表 3-2 RS-232-C 的互换电路功能

管脚	RS-232-C 电路	V.24 等价电路	描 述	地	数据		控制		定时		测试	
					DTE	DCE	DTE	DCE	DTE	DCE	DTE	DCE
1	AA	101	保护地	×								
7	AB	103/2	信号地	×								
2	BA	103	发送数据			×						
3	BB	104	接收数据		×							



续表

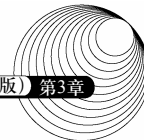
管脚	RS-232-C 电路	V.24 等价电路	描 述	地	数据		控制		定时		测试	
					DTE	DCE	DTE	DCE	DTE	DCE	DTE	DCE
4	CA	105	请求发送									
5	CB	106	允许发送				×					
6	CC	107	数传机就绪				×	×				
20	CD	108/2	数据终端就绪									
22	CE	125	振铃指示				×	×				
8	CF	109	接收线路信号检测				×					
21	CG	110	信号质量检测				×					
23	CH	111	数据信号速率选择 (DTE)				×	×				
23	CI	112	数据信号速率选择 (DCE)									
24	DA	113	发送器码元定时 (DTE)							×		
15	DB	114	发送器码元定时 (DCE)						×			
17	DC	115	接收器码元定时 (DCE)						×			
14	SBA	118	辅助信道发送数据			×						
16	SBB	119	辅助信道接收数据		×							
19	SCA	120	辅助信道请求发送					×				
13	SCB	121	辅助信道准备发送				×					
12	SCF	122	辅助信道接收信号检测				×					
8			保留电路, 用于测试									×
9			保留电路, 用于测试								×	
18	(LL)	(RS-232-D)	(本地回路)									×
25	(TM)	(RS-232-D)	(测试模式)								×	

图 3-7 所示为计算机(异步终端设备)和异步 Modem 连接的方法, 这里只需要 9 根连线, 保护接地和信号地线只用一根连线同时接在 1 和 7 两个管脚上。

4. 过程特性

物理层接口的过程特性规定了使用接口线实现数据传输的操作过程, 这些操作过程可能涉及高层的功能, 因而对于物理层操作过程和高层功能过程之间的划分是有争议的。另一方面, 对于不同的网络、不同的通信设备、不同的通信方式、不同的应用, 各有不同的操作过程。下面举例说明利用 RS-232-C 进行异步通信的操作过程。

RS-232-C 控制信号之间的相互关系是根据互连设备的操作特性随时间而变化的。图 3-8 给出了计算机端口和 Modem 之间控制信号的定时关系。假定 Modem 打开电源后升起 DSR 信号, 随后从线路上传来两次振铃信号 RI, 计算机在响应第一次振铃信号后升起它的数据终端就绪信号 DTR。DTR 信号和第二次振铃信号 RI 配合, 使得 Modem 回答呼叫并升起载波检测信号 DCD。



如果计算机中的进程需要发送信息,就会升起请求发送信号 RTS, Modem 通过升起允许发送信号 CTS 予以响应,之后计算机端口就可以开始传送数据。

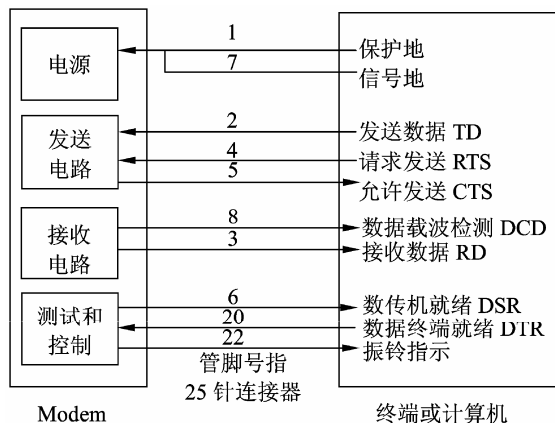


图 3-7 异步通信时 DTE/DCE 的连接

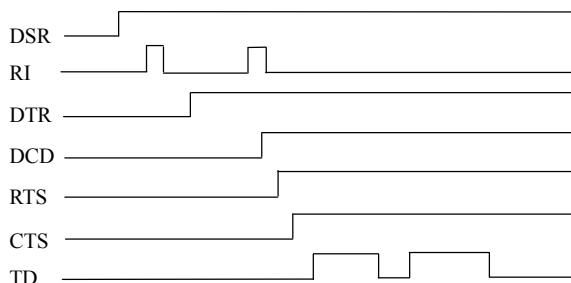
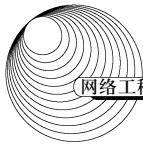


图 3-8 异步通信时控制信号的定时关系

3.1.3 调制解调器

调制解调器 (Modulation and Demodulation, Modem) 通常由电源、发送电路和接收电路组成。电源提供 Modem 工作所需要的电压; 发送电路中包括调制器、放大器, 以及滤波、整形和信号控制电路, 它的功能是把计算机产生的数字脉冲转换为已调制的模拟信号; 接收电路包括解调器以及有关的电路, 它的作用是把模拟信号变成计算机能接收的数字脉冲。Modem 的组成原理如图 3-9 所示, 图中上半部分是发送电路, 下半部分是接收电路, 图中的虚线框用在同步 Modem 中。

现代的高速 Modem 采用格码调制 (Trellis Coded Modulation, TCM) 技术。这种技术在编码过程中插入一个冗余位进行纠错, 从而减小了误码率。按照 CCITT 的 V.32 建议, 调制器的



输入数据流被分成 4 位的位组, 4 位组经过卷积编码产生了第 5 个冗余校验位。包括冗余位的 5 位组在复平面上的分布表示在图 3-10 的星座图中, 每个码点最左边的位是冗余位。

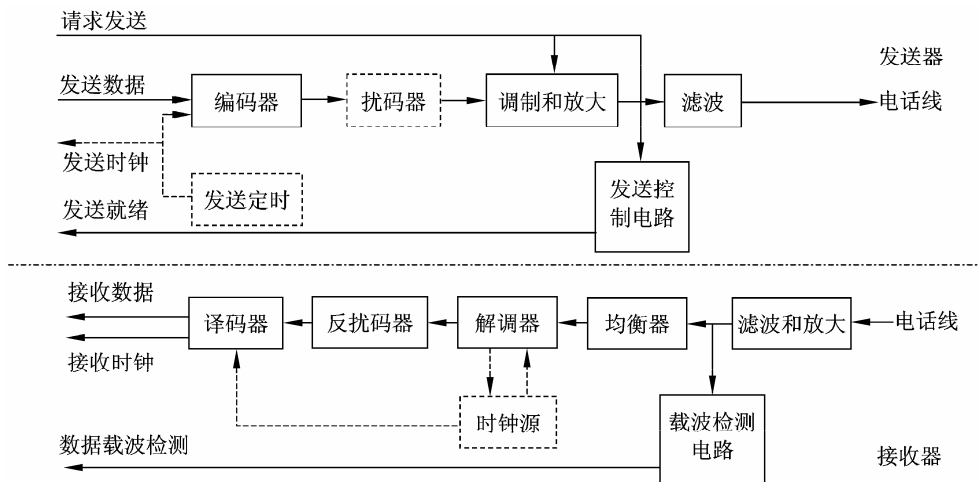


图 3-9 Modem 设备的组成原理框图

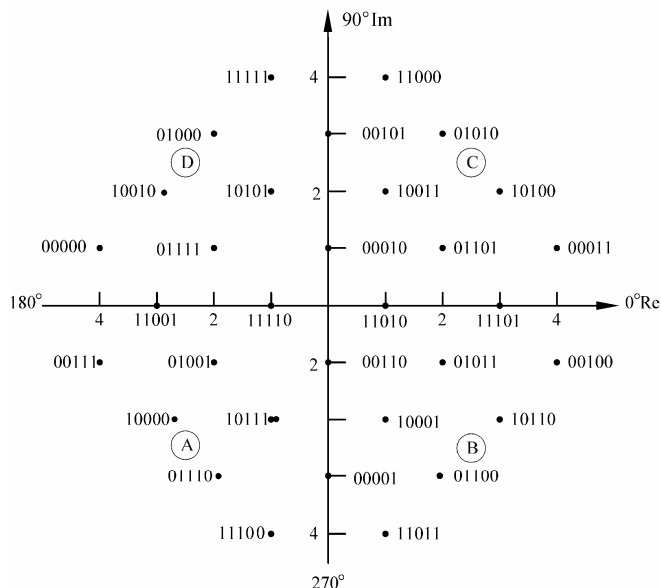
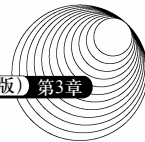


图 3-10 V.32 格码调制的星座图



接收Modem检测这种格码调制信号时使用维特比(Viterbi)译码器,这种译码器不像通常的“硬比特”检测器那样一位一位地进行判断,而是对多达32位的一组位进行比较,判断出每一位的正确值。做出判断的过程是按照形似网格的决策树进行的,因而这种调制技术叫网格编码调制,简称格码调制。使用格码调制技术的V.32Modem可以在公共交换网上实现9600bps的高速传输。

进一步提高传输速度还可以在其他技术方面寻求解决办法,例如采用数据压缩技术。有一种V.29Modem,虽然工作在9600bps,但是由于使用的数据压缩算法可达到2:1的压缩比,所以数据发送速率理论上可达到19200bps。

另外一种高速Modem采用了高速微处理器和大约70000行指令,由于采用多个音频组成的载波群对数据进行分组传输,因而叫做分组集群式Modem。这种Modem的工作过程是这样的:首先原发方Modem同时发送512个音频载波信号,接收Modem对收到的所有载波信号进行评价,向原发Modem报告哪些频率可用,哪些频率不能使用。然后原发方Modem根据侦察到的线路情况确定最适合的调制方式,可能是2位、4位或6位的QAM信号。例如,若400个音频载波可用,调制方案为6位QAM,则 $400 \times 6 = 2400$,即可同时传送2400位。如果每种载波都是一秒钟变化4次,则可得到约10000bps的数据速率。

1996年出现了56Kbps的Modem,并于1998年形成了ITU的V.90建议。这种Modem采用非对称的工作方式,从客户端向服务器端发送称为上行信道,其数据速率为28.8Kbps或33.6Kbps;从服务器端向客户端发送称为下行信道,其数据速率可以达到56Kbps。其之所以采用非对称的工作方式,是因为客户端发送数据时要采用模数转换,会出现量化噪声,使得Modem的数据速率受到限制。ISP一端的服务器采用数字干线连接,无须模数转换,不会出现量化噪声,因而可以用到PCM编码调制的最高数据速率56Kbps。这种技术的出现适应了通过电话线实现准高速连接Internet的需求,成为因特网用户首选的连网技术。

3.2 X.25 公共数据网

公共数据网是在一个国家或全世界范围内提供公共电信服务的数据通信网。CCITT于1974年提出了访问分组交换网的协议标准,即X.25建议,后来又进行了多次修订。这个标准分为3个协议层,即物理层、链路层和分组层,分别对应于ISO/OSI参考模型的低三层。

物理层规定用户终端与网络之间的物理接口,这一层协议采用X.21或X.21bis建议。链路层提供可靠的数据传输功能,这一层的标准叫做LAP-B(Link Access Procedure-Balanced),它是HDLC的子集。分组层提供外部虚电路服务,这一层协议是X.25建议的核心,特别称为X.25 PLP协议(Packet Layer Protocol)。图3-11给出了这三层之间的关系。

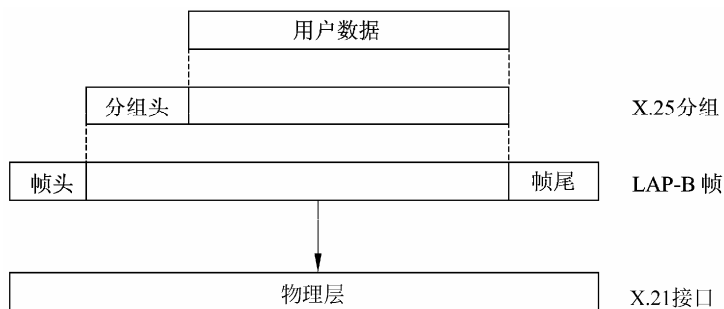
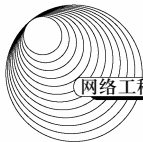


图 3-11 X.25 的分层结构

3.2.1 流量控制和差错控制

流量控制是一种协调发送站和接收站工作步调的技术,其目的是避免由于发送速度过快,使得接收站来不及处理而丢失数据。通常,接收站有一定大小的接收缓冲区,当接收到的数据进入缓冲区后,接收器要进行简单的处理,然后才能清除缓冲区,再开始接收下一批数据。如果发送得过快,缓冲区就会溢出,从而引起数据的丢失。通过流控机制可以避免这种情况的发生。

首先讨论没有传输错误的流控技术,即传输过程中不会丢失帧,接收到的帧都是正确的,无须重传,并且所有发出的帧都能按顺序到达接收端。

1. 停等协议

最简单的流控协议是停等协议。它的工作原理是:发送站发出一帧,然后等待应答信号到达后再发送下一帧;接收站每收到一帧后送回一个应答信号(ACK),表示愿意接收下一帧,如果接收站不送回应答,则发送站必须等待。这样,在源和目标之间的数据流动是由接收站控制的。

假设在半双工的点对点链路上, S_1 站向 S_2 站发送数据帧, S_1 每发出一个帧就等待 S_2 送回应答信号。根据图 3-12 所示,发送一帧的时间为

$$T_{FA}=2t_p+t_f$$

其中, t_p 为传播延迟, t_f 为发送一帧的时间(称为一帧时)。

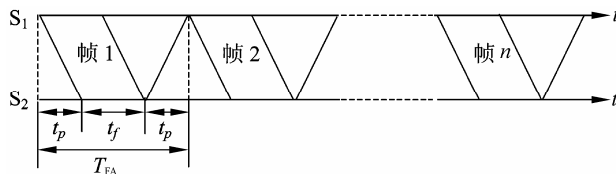
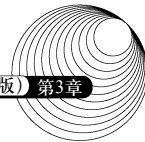


图 3-12 停等协议的效率



于是线路的利用率为

$$E = \frac{t_f}{2t_p + t_f} \quad (3.1)$$

定义 $a = t_p / t_f$, 则

$$E = \frac{1}{2a + 1} \quad (3.2)$$

这是在停等协议下线路的最高利用率,也可以认为是停等协议的效率。事实上,数据帧中还包含一些控制信息,例如地址信息及校验和等,再加上已忽略了的某些时间开销,因而实际的线路利用率更低。

为了更深入地理解式(3.2)的含义,对 a 进行一些分析。由于 a 是线路传播延迟和一个帧时的比,故在线路长度和帧长固定的情况下 a 是一个常数。又由于线路传播延迟是线路长度 d 和信号传播速度 v 的比值,而一帧时是帧长 L 和数据速率 R 的比,因而有

$$a = \frac{d/v}{L/R} = \frac{Rd/v}{L} \quad (3.3)$$

式(3.3)的分子 Rd/v 的单位为位,其物理意义是线路上能容纳的最大位数,即线路的位长度,它是由线路的物理特性决定的。因而, a 可理解为线路位长和帧长的比,或者说线路的帧计数长度。

考虑下面的例子。通常卫星信道的传播延迟是 270ms,假设数据速率是 64Kbps,帧长是 4 000 位。对于卫星链路可得

$$a = 64 \times 270 / 4\,000 = 4.32 > 1$$

根据式(3.2),卫星链路的利用率为

$$E = \frac{1}{2a + 1} = \frac{1}{2 \times 4.32 + 1} = \frac{1}{9.64} = 0.104$$

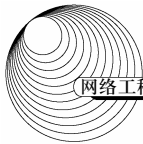
可见卫星链路的利用率仅为 1/10 左右,大量的时间用在等待应答信号上了。

按照最新的传输技术,传送一帧的时间会降到 6ms,甚至 125μs。这样 a 的值将是 45~2 160,在应用停等协议的情况下,链路的利用率可能只有 0.0002。

另外一个例子是局域网,线路长度 d 一般为 0.1~10km,传播速度 $v=200\text{m}/\mu\text{s}$ 。设数据速率 $R=10\text{Mbps}$,帧长 $L=500$ 位,则 a 的取值范围为 $10^{-5} \sim 1$ 。如果取 $a=0.1$,则链路的利用率为 0.83;如果取 $a=0.01$,则链路的利用率为 0.98。可见,在局域网上利用简单的停等协议时效率要高得多。

2. 滑动窗口协议

滑动窗口协议的主要思想是允许连续发送多个帧而无须等待应答。如图 3-13 所示,假设站



S_1 和 S_2 通过全双工链路连接, S_2 维持能容纳 6 个帧的缓冲区 ($W_{\text{收}}=6$)。这样, S_1 就可以连续发送 6 个帧而不必等待应答信号 ($W_{\text{发}}=6$)。为了使 S_2 能够表示哪些帧已被成功地接收, 每个帧都给予一个顺序编号。如果帧编号字段为 k 位, 则帧以 2^k 为模连续编号。 S_2 发出一个应答信号 $\text{ACK}i$, 并把窗口滑动到 $i \sim W-i+1$ 的位置, 表明 i 之前的帧已正确接收, 期望接收后续的 W 个帧。由于随着数据传送过程的进展窗口向前滑动, 因而取名为滑动窗口协议。

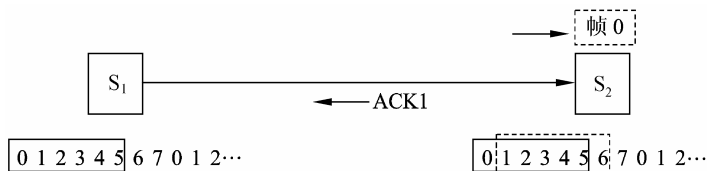


图 3-13 滑动窗口协议的效率

现在考查窗口大小 (W) 对协议效率的影响。按照图 3-13, 假设 S_1 向 S_2 发出 0 号帧, S_2 收到 0 号帧后返回应答帧 $\text{ACK}1$, 并把窗口滑动到图中虚线的位置。根据前面的分析, 从 0 号帧开始发送到 $\text{ACK}1$ 到达 S_1 的时间是 $2t_p + t_f$ 。在这段时间内, S_1 可连续发送 W 个帧, 它的工作时间是 $W \times t_f$ 。所以协议的效率为

$$E = \frac{W \times t_f}{2t_p + t_f} = \frac{W}{2a + 1} \quad (3.4)$$

在以上讨论中, 都假定发送应答信号的时间可忽略。其实应答信号是用专门的控制帧传输的, 也需要一定的时间来发送和处理。在利用全双工线路进行双向通信的情况下, 应答信号可以放在 S_2 到 S_1 方向发送的数据帧中, 这种技术叫“捎带应答”。如果应答信号被捎带送回发送站, 则应答信号的传送时间可计入反向发送数据帧的时间中, 因而上面的假定是符合实际情况的。

3. 差错控制

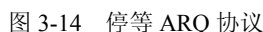
差错控制是检测和纠正传输错误的机制。前面假定没有传输错误, 但实际情况不是这样。在数据传输过程中有的帧可能丢失, 有的帧可能包含错误的位, 这样的帧经接收器校验后会被拒绝。通常, 应付传输差错的办法如下。

(1) 肯定应答。接收器对收到的帧校验无误后送回肯定应答信号 ACK , 发送器收到肯定应答信号后可继续发送后续帧。

(2) 否定应答重发。接收器收到一个帧后经校验发现错误, 则送回一个否定应答信号 NAK , 发送器必须重新发送出错帧。

这种技术的主要思想是利用差错检测技术自动地对丢失帧和错误帧请求重发，因而叫做 ARQ (Automatic Repeat reQuest) 技术。结合前面讲的流控技术，可以组成 3 种形式的 ARQ 协议。

停等 ARQ 协议是停等流控技术和自动请求重发技术的结合。根据停等 ARQ 协议，发送站一帧后必须等待应答信号，收到肯定应答信号 ACK 后继续发送下一帧；收到否定应答信号 NAK 后重发该帧；若在一定的时间间隔内没有收到应答信号也必须重发。最后一种情况值意，没有收到应答信号的原因可能是帧丢失了，也可能是应答信号丢失了。无论哪一种原发送站都必须重新发送原来的帧。发送站必须有一个重发计时器，每发送一帧就开始计时。长度不能小于信号在线路上一个来回的时间。另外在停等 ARQ 协议中，只要能区分两个的帧是否重复就可以了，因此只用 0 和 1 两个编号，即帧编号字段长度为 1 位。图 3-14 表了各种可能的传送情况。



下面介绍的协议是滑动窗口技术和自动请求重发技术的结合。由于窗口尺寸开到足够大时，帧在线路上可以连续地流动，因此又称其为连续 ARQ 协议。根据出错帧和丢失帧处理上的不同，连续 ARQ 协议分为选择重发 ARQ 协议和后退 N 帧 ARQ 协议。

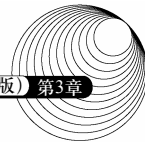
对于选择重发 ARQ 协议，窗口的大小有一定的限制。假设帧编号为 3 位，发送和接收窗口大小都是 7，考虑下面的情况。

- 协议失败的原因是由于发送窗口没有向前滑动,接收窗口向前滑动了最大的距离,而新的接收窗口和原来的发送窗口中仍有相同的帧编号,造成了接收器误把重发的帧当作新到帧。避免这种错误的办法就是缩小窗口,使得接收窗口向前滑动最大距离后不再与旧的接收窗口重叠。显然,当窗口大小为帧编号数的一半时就可以达到这个效果,所以采用选择重发 ARQ 协议时窗口的最大值应为帧编号数的一半,即 $W_{\text{发}}=W_{\text{收}}\leq 2^{k-1}$ 。

后退 N 帧 ARQ 协议就是从出错处重发已发出过的 N 个帧。在图 3-15 (b) 中, 接收窗口的大小为 1, 因而接收器必须按顺序接收, 当第 2 帧出错时, 2、3、4、5 号帧都必须重发。



68



字段总是捎带一个应答信号,这样就可能出现对同一个帧的重复应答。假定帧编号字段为3位长,发送窗口大小为8。当发送器收到第一个ACK1后把窗口推进到后沿为1、前沿为0的位置,即发送窗口现在包含的帧编号为1、2、3、4、5、6、7、0。如果这时又收到一个捎带回的ACK1,发送器如何做呢?后一个ACK1可能表示窗口中的所有帧都未曾接收,也可能意味着窗口中的帧都已正确接收。然而,如果规定窗口的大小为7,则可以避免这种二义性。所以,在后退 N 帧协议中必须限制发送窗口大小 $W \leq 2^k - 1$ 。

3.2.2 HDLC 协议

数据链路控制协议可分为两大类:面向字符的协议和面向位的协议。面向字符的协议以字符作为传输的基本单位,并用10个专用字符控制传输过程。这类协议发展较早,至今仍在使用。面向位的协议以位作为传输的基本单位,它的传输效率高,已广泛地应用于公共数据网上。这一小节介绍一种面向位的数据链路控制协议。

HDLC(High Level Data Link Control,高级数据链路控制)协议是国际标准化组织根据IBM公司的SDLC(Synchronous Data Link Control)协议扩充开发而成的。美国国家标准化协会(ANSI)则根据SDLC开发出类似的协议,叫做ADCCP协议(Advanced Data Communication Control Procedure)。以下的讨论都是基于HDLC。

1. HDLC 的基本配置

HDLC定义了3种类型的站、两种链路配置和3种数据传输方式。3种站分别如下。

- (1) 主站。对链路进行控制,主站发出的帧叫命令帧。
- (2) 从站。在主站控制下进行操作,从站发出的帧叫响应帧。
- (3) 复合站。具有主站和从站的双重功能。复合站既可以发送命令帧也可以发出响应帧。

两种链路配置如下。

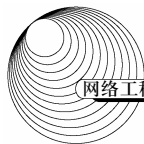
(1) 不平衡配置。适用于点对点 and 点对多点链路。这种链路由一个主站和一个或多个从站组成,支持全双工或半双工传输。

(2) 平衡配置。仅用于点对点链路。这种配置由两个复合站组成,支持全双工或半双工传输。

3种数据传输方式如下。

(1) 正常响应方式(Normal Response Mode, NRM)。适用于不平衡配置,只有主站能启动数据传输过程,从站收到主站的询问命令时才能发送数据。

(2) 异步平衡方式(Asynchronous Balanced Mode, ABM)。适用于平衡配置,任何一个复



合站都无须取得另一个复合站的允许就可以启动数据传输过程。

(3) 异步响应方式 (Asynchronous Response Mode, ARM)。适用于不平衡配置, 从站无须取得主站的明确指示就可以启动数据传输, 主站的责任只是对线路进行管理。

正常响应方式可用于计算机和多个终端相连的多点线路上, 计算机对各个终端进行轮询以实现数据输入。正常响应方式也可以用于点对点的链路上, 例如计算机和一个外设相连的情况。异步平衡方式能有效地利用点对点全双工链路的带宽, 因为这种方式没有轮询的开销。异步响应方式的特点是各个从站轮流询问中心站, 这种传输方式很少使用。

2. HDLC 帧结构

HDLC 使用统一的帧结构进行同步传输, 图 3-16 所示为 HDLC 的帧结构。从图中可以看出, HDLC 帧由 6 个字段组成。以两端的标志字段 (F) 作为帧的边界, 在信息字段 (INFO) 中包含了要传输的数据。下面对 HDLC 帧的各个字段分别予以解释。

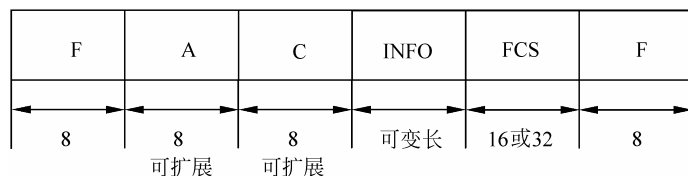


图 3-16 HDLC 帧结构

(1) 帧标志 F。HDLC 用一种特殊的位模式 01111110 作为帧的边界标志。链路上所有的站都在不断地探索标志模式, 一旦得到一个标志就开始接收帧。在接收帧的过程中如果发现一个标志, 则认为该帧结束了。由于帧中间出现位模式 01111110 时也会被当作标志, 从而破坏了帧的同步, 所以要使用位填充技术。发送站的数据位序列中一旦发现 0 后有 5 个 1, 则在第 7 位插入一个 0, 这样就保证了传输的数据中不会出现与帧标志相同的位模式。接收站则进行相反的操作: 在接收的位序列中如果发现 0 后有 5 个 1, 则检查第 7 位, 若第 7 位为 0 则删除; 若第 7 位是 1 且第 8 位是 0, 则认为是检测到帧尾的标志; 若第 7 位和第 8 位都是 1, 则认为是发送站的停止信号。有了位填充技术, 任意的位模式都可以出现在数据帧中, 这个特点叫做透明的数据传输。

(2) 地址字段 A。地址字段用于标识从站的地址, 用在点对多点链路中。地址通常是 8 位长, 然而经过协商之后, 也可以采用更长的扩展地址。扩展的地址字段如图 3-17 所示, 可以看出, 它是 8 位组的整数倍。每一个 8 位组的最低位表示该 8 位组是否是地址字段的结尾: 若为 1, 表示是最后的 8 位组; 若为 0, 则不是。所有 8 位组的其余 7 位组成了整个扩展地址字段。

全为 1 的 8 位组 (11111111) 表示广播地址。

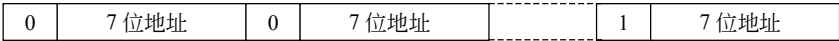


图 3-17 HDLC 扩展地址

(3) 控制字段 C。HDLC 定义了 3 种帧, 可根据控制字段的格式区分。信息帧 (I 帧) 承载着要传送的数据, 此外还捎带着流量控制和差错控制的应答信号。管理帧 (S 帧) 用于提供 ARQ 控制信息, 当不使用捎带机制时要用管理帧控制传输过程。无编号帧提供建立、释放等链路控制功能, 以及少量信息的无连接传送功能。控制字段第 1 位或前两位用于区别 3 种不同格式的帧, 如图 3-18 所示。基本的控制字段是 8 位长, 扩展的控制字段为 16 位长。

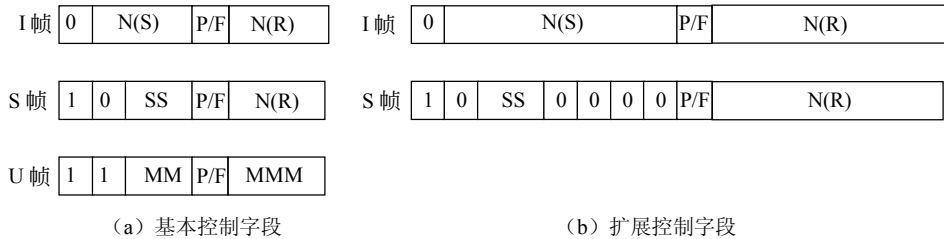


图 3-18 控制字段格式

(4) 信息字段 INFO。只有 I 帧和某些无编号帧含有信息字段。这个字段可含有用于表示用户数据的任何序列, 其长度没有规定, 但具体的实现往往限定了最大帧长。

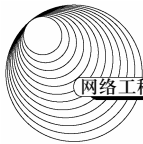
(5) 帧校验序列 FCS。FCS 中含有各个字段的校验 (标志字段除外)。通常使用 CRC-CCITT 标准产生 16 位校验序列, 有时也使用 CRC-32 产生 32 位校验序列。

3. HDLC 帧类型

HDLC 协议的帧类型如表 3-3 所示。下面结合 HDLC 的操作介绍这些帧的作用。

表 3-3 HDLC 协议的帧类型

名 字	功 能	描 述
信息帧 (I)	命令/响应	交换用户数据
管理帧 (S)		
接收就绪 (RR)	命令/响应	肯定应答, 可以接收第 i 帧
接收未就绪 (RNR)	命令/响应	肯定应答, 不能继续接收

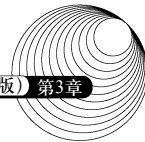


续表

名 字	功 能	描 述
拒绝接收 (REJ)	命令/响应	否定应答, 后退 N 帧重发
选择性拒绝接收 (SREJ)	命令/响应	否定应答, 选择重发
无编号帧 (U)		
置正常响应方式 (SNRM)	命令	置数据传输方式 NRM
置扩展的正常响应方式 (SNRME)	命令	置数据传输方式为扩展的 NRM
置异步响应方式 (SARM)	命令	置数据传输方式 ARM
置扩展的异步响应方式 (SARME)	命令	置数据传输方式为扩展的 ARM
置异步平衡方式 (SABM)	命令	置数据传输方式 ABM
置扩展的异步平衡方式 (SABME)	命令	置数据传输方式为扩展的 ABM
置初始化方式 (SIM)	命令	由接收站启动数据链路控制过程
拆除连接 (DISC)	命令	拆除逻辑连接
无编号应答 (UA)	响应	对置方式命令的肯定应答
非连接方式 (DM)	响应	从站处于逻辑上断开的状态
请求拆除连接 (RD)	响应	请求断开逻辑连接
请求初始化方式 (RIM)	响应	请求发送 SIM 命令, 启动初始化过程
无编号信息 (UI)	命令/响应	交换控制信息
无编号询问 (UP)	命令	请求发送控制信息
复位 (RSET)	命令	用于复位, 重置 $N(R)$, $N(S)$
交换标识 (XID)	命令/响应	交换标识和状态
测试 (TEST)	命令/响应	交换用于测试的信息字段
帧拒绝 (PRMR)	响应	报告接收到不能接收的帧

(1) 信息帧。信息帧除承载用户数据之外还包含该帧的编号 $N(S)$, 以及捎带的肯定应答序号 $N(R)$ 。I 帧还包含一个 P/F 位, 在主站发出的命令帧中这一位表示 P, 即轮询 (polling); 在从站发出的响应帧中这一位是 F 位, 即终止位 (final)。在正常响应方式下, 主站发出的 I 格式命令帧中的 P/F 位置 1, 表示该帧是询问帧, 允许从站发送数据。从站响应主站的询问, 可以发送多个响应帧, 其中仅最后一个响应帧的 P/F 位置 1, 表示一批数据发送完毕。在异步响应方式和异步平衡方式下, P/F 位用于控制 S 帧和 U 帧的交换过程。

(2) 管理帧。管理帧用于进行流量和差错控制, 当没有足够多的信息帧捎带管理命令/响应时, 要发送专门的管理帧来实现控制。从表 3-3 看出, 有 4 种管理帧可以用控制字段中的两个 S 位来区分。RR 帧表示接收就绪, 它既是对 $N(R)$ 之前帧的确认, 也是准备接收 $N(R)$ 及其后续帧的肯定应答。RNR 帧表示接收未就绪, 在对 $N(R)$ 之前的帧给予肯定应答的同时,



拒绝进一步接收后续帧。REJ 帧表示拒绝接收 N(R) 帧, 要求重发 N(R) 帧及其后续帧。显然, REJ 用于后退 N 帧 ARQ 流控方案中。类似地, SREJ 帧用于选择重发 ARQ 流控方案中。

管理帧中 P/F 位的作用如下所述: 主站发送 P 位置 1 的 RR 帧询问从站, 是否有数据要发送。如果从站有数据要发送, 则以信息帧响应; 否则从站以 F 位置 1 的 RR 帧响应, 表示没有数据可发送。另外, 主站也可以发送 P 位置 1 的 RNR 帧询问从站的状态。如果从站可以接收信息帧, 则以 F 位置 1 的 RR 帧响应; 反之, 如果从站忙, 则以 F 位置 1 的 RNR 帧响应。

(3) 无编号帧。无编号帧用于链路控制。这类帧不包含编号字段, 也不改变信息帧流动的顺序。无编号帧按其控制功能可分为以下几个子类。

- 设置数据传输方式的命令和响应帧。
- 传输信息的命令和响应帧。
- 用于链路恢复的命令和响应帧。
- 其他命令和响应帧。

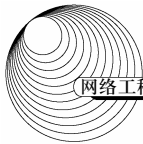
设置数据传输方式的命令帧由主站发送给从站, 表示设置或改变数据传输方式。SNRM、SARM 和 SABM 分别对应 3 种数据传输方式。SNRME、SARME 和 SABME 也是设置数据传输方式的命令帧, 然而这 3 种传输方式使用两个字节的控制域。从站接收了设置传输方式的命令帧后以无编号应答帧(UA)响应。一种传输方式建立后一直保持有效, 直到另外的设置方式命令改变了当前的传输方式。

主站向从站发送置初始化方式命令(SIM), 使得接收该命令的从站启动一个建立链路的过程。在初始化方式下, 两个站用无编号信息帧(UI)交换数据和命令。释放连接命令(DISC)用于通知对方链路已经释放, 对方站以 UA 帧响应, 链路随之断开。

除 UA 帧之外, 还有几种响应帧与传输方式的设置有关。非连接方式帧(DM)可用于响应所有的置传输方式命令, 表示响应的站处于逻辑上断开的状态, 即拒绝建立指定的传输方式。请求初始化方式帧(RIM)也可用于响应置传输方式命令, 表示响应站没有准备好接收命令, 或正在进行初始化。请求释放连接帧(RD)则表示响应站要求断开逻辑连接。信息传输的命令和响应用于两个站之间交换信息。无编号信息帧(UI)既可作为命令帧, 也可作为响应帧。UI 帧传送的信息可以是高层的状态、操作中断状态、时间、链路初始化参数等。主站/复合站可发送无编号询问命令(UP)请求接收站送回无编号响应帧, 以了解它的状态。

链路恢复命令和响应用于 ARQ 机制不能正常工作的情况下。接收站可用帧拒绝响应(FRMR)表示接收的帧中有错误。例如, 控制字段无效、信息字段太长、帧类型不允许携带信息以及捎带的 N(R) 无效等。

复位命令(RSET)表示发送站正在重新设置发送顺序号, 这时接收站也应该重新设置接收顺序号。



还有两种命令和响应不能归入以上几类。交换标识(XID)帧用于在两个站之间交换它们的标识和特征,实际交换的信息依赖于具体的实现。测试命令帧(TEST)用于测试链路和接收站是否正常工作。接收站收到测试命令后要尽快以测试帧响应。

4. HDLC 的操作

下面通过图 3-19 的例子说明 HDLC 的操作过程,这些例子虽然不能囊括实际运作中的所有情况,但是可以帮助读者理解各种命令和响应的使用方法。由于 HDLC 定义的命令和响应非常多,可以实现各种应用环境的所有要求,所以对于任何一种特定的应用,只要实现一个子集就可以了,以下给出的例子都是实际应用中的典型情况。

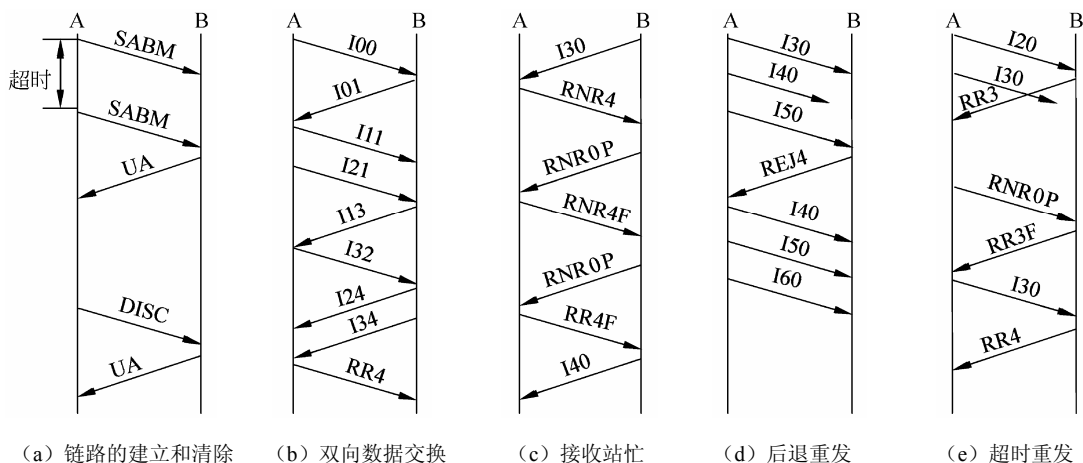
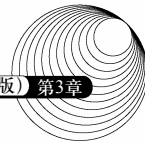


图 3-19 HDLC 操作的例

在图 3-19 中,用 I 表示信息帧,I 后面的两个数字分别表示信息帧中的 N(S) 和 N(R) 值。管理帧和无编号帧都直接给出帧名字,管理帧后的数字则表示帧中的 N(R) 值,P 和 F 表示该帧中的 P/F 位置 1,没有 P 和 F 表示这一位置 0。

图 3-19(a) 说明了链路建立和释放的过程。A 站发出 SABM 命令并启动定时器,在一定的时间内没有得到应答后重发同一命令。B 站以 UA 帧响应,并对本站的局部变量和计数器进行初始化。A 站收到应答后也对本站的局部变量和计数器进行初始化,并停止计时,这时逻辑链路就建立起来了。释放链路的过程由双方交换一对命令 DISC 和响应 UA 完成。在实际使用中可能出现链路不能建立的情况,B 站以 DM 响应 A 站 SABM 命令,或者 A 站重复发送 SABM 命令预定的次数后放弃建立连接,向上层实体报告链接失败。

图 3-19(b) 说明了全双工交换信息帧的过程。每个信息帧中用 N(S) 指明发送顺序号,



用 $N(R)$ 指明接收顺序号。当一个站连续发送了若干帧而没有收到对方发来的信息帧时, $N(R)$ 字段只能简单地重复, 例如, A 发给 B 的 I11 和 I21。最后 A 站没有信息帧要发时用一个管理帧 RR4 对 B 站给予应答。图中也表示出了肯定应答的积累效应, 例如 A 站发出的 RR4 帧一次应答了 B 站的两个数据帧。

图3-19(c)画出了接收站忙的情况。出现这种情况的原因可能是接收站数据链路层缓冲区溢出, 也可能是接收站上层实体来不及处理接收到的数据。图中 A 站以 RNR4 响应 B 站的 I30 帧, 表示 A 站对第 3 帧之前的帧已正确接收, 但不能继续接收下一个帧。B 站接收到 RNR4 后每隔一定时间以 P 位置 1 的 RNR 命令询问接收站的状态。接收站 A 如果保持忙则以 F 位置 1 的 RNR 帧响应; 如果忙状态解除, 则以 F 位置 1 的 RR 帧响应, 于是数据传送从 RR 应答中的接收序号恢复发送。

图 3-19(d)描述了使用 REJ 命令的例子。A 站发出了第 3、4、5 信息帧, 其中第 4 帧出错。接收站检出错帧后发出 REJ4 命令, 发送站返回到出错帧重发。这是使用后退 N 帧 ARQ 技术的典型情况。

图 3-19(e)表示的是超时重发的例子。A 站发出的第 3 帧出错, B 站检测到错误后丢弃了它。但是, B 站不能发出 REJ 命令, 因为 B 站无法判断这是一个 I 帧。A 站超时后发出 P 位置 1 的 RNR 命令询问 B 站的状态。B 站以 RR3F 响应, 于是数据传送从断点处恢复。

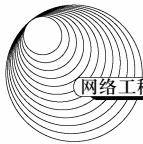
3.2.3 X.25 PLP 协议

X.25 的分组层提供虚电路服务, 共有两种形式的虚电路: 一种是交换虚电路 (Switched Virtual Call, SVC), 一种是永久虚电路 (Permanent Virtual Circuit, PVC)。交换虚电路是动态建立的虚电路, 包含呼叫建立、数据传送和呼叫清除等几个过程。永久虚电路是网络指定的固定虚电路, 像专用线一样, 无须建立和清除连接, 可直接传送数据。

无论是交换虚电路还是永久虚电路, 都是由几条“虚拟”连接共享一条物理信道。一对分组交换机之间至少有一条物理链路, 几条虚电路可以共享该物理链路。每一条虚电路由相邻节点之间的一对缓冲区实现, 这些缓冲区被分配给不同的虚电路代号以示区别。建立虚电路的过程就是在沿线各节点上分配缓冲区和虚电路代号的过程。

图 3-20 是一个简单的例子, 用来说明虚电路是如何实现的。图中有 A、B、C、D、E 和 F 共 6 个分组交换机。假定每个交换机可以支持 4 条虚电路, 所以需要 4 对缓冲区。图 3-20 建立了 6 条虚电路, 其中一条是“③ 1-BCD-2”, 它从 B 节点开始, 经过 C 节点, 到达 D 节点连接的主机。根据图上的表示, 对于 B 节点连接的主机来说, 给它分配的是 1 号虚电路; 对于 D 节点上的主机来说, 它连接的是 2 号虚电路。可见, 连接在同一虚电路上的一对主机看到的虚电路号不一样。

图 3-21 为通过两次握手建立和释放虚电路连接的例子。连网的两个 DTE 通过交换 Call Request、Incoming Call、Call Accepted 和 Call Connectd 建立连接, 并协商连接的参数。释放虚



电路则交换 Clear Request、Clear Indication、Clear Response 和 Clear Confirm 这 4 个分组。

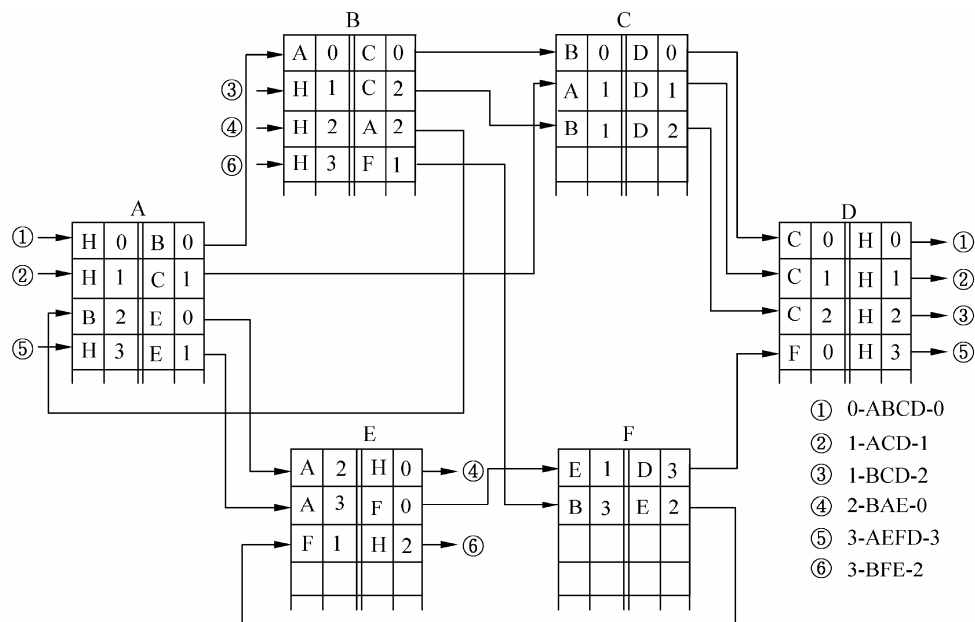


图 3-20 虚电路表的例子

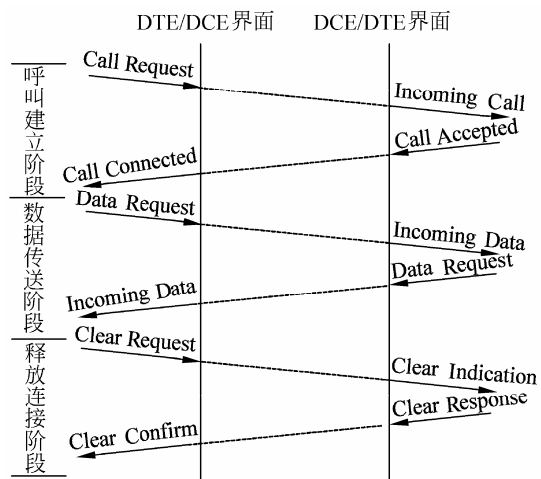
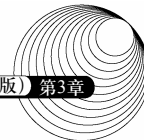


图 3-21 X.25 虚电路的建立和释放



X.25 PLP 层使用的各种分组的格式大同小异, 如图 3-22 所示。

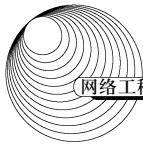


图 3-22 X.25 分组格式

PLP 协议把用户数据分成一定大小的块(一般为 128 字节), 再加 24 位或 32 位的分组头组成数据分组。分组头中第 3 个字节的最低位用来区分数据分组和其他的控制分组。对数据分组, 这一位为 0, 其他分组的这一位为 1。分组头中包含 12 位的虚电路号, 这 12 位划分为组号和信道号。P(R) 和 P(S) 字段分别表示接收和发送顺序号, 用于支持流量控制和差错控制, 这两个字段可以是 3 位或 7 位长。在分组头的第一个字节中有两位用来区分两种不同的格式: 3 位顺序号格式对应 01, 7 位顺序号格式对应 10。Q 位在标准中没有定义, 可由上层软件使用, 用来区分不同的数据。M 位和 D 位用在分组排序中。

X.25 的流控和差错控制机制与 HDLC 类似。每个数据分组都包含发送顺序号 P(S) 和接收顺序号 P(R), 默认的顺序号为 3 位, 但是可以在建立虚电路时通过特别业务机制要求使用 7 位顺序号。P(S) 字段由发送 DTE 按递增的次序指定给每个发出的数据分组, P(R) 字段捎带了 DTE 期望从另一端接收的下一个分组的序号。如果一端没有数据分组要发送, 则可以用 RR(接收就绪) 或 RNR(接收未就绪) 控制分组回送应答信息。X.25 默认的窗口大小是 2, 但是对于 3 位顺序号窗口最大可设置为 7, 对于 7 位顺序号窗口最大可设置为 127。这也是在建立虚电路时通过协商决定的。

X.25 的差错控制采用后退 N 帧 ARQ 协议。如果节点收到否定应答 REJ, 则重传 P(R)



字段指明的分组及其之后的所有分组。

3.3 帧中继网

帧中继最初是作为 ISDN 的一种承载业务而定义的。按照 ISDN 的体系结构,用户与网络的接口分成两个平面,其目的是把信令和用户数据分开,如图 3-23 所示。控制平面在用户和网络之间建立和释放逻辑连接,而用户平面在两个端系统之间传送数据。

帧中继在第二层建立虚电路,用帧方式承载数据业务,因而第三层就被简化掉了。同时,FR 的帧层也比 HDLC 操作简单,只做检错,不再重传,没有滑动窗口式的流控,只有拥塞控制。

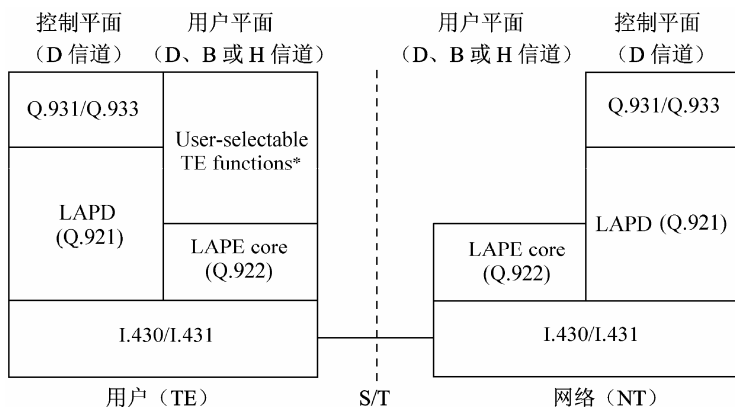
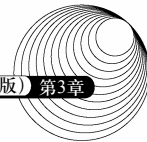


图 3-23 用户与网络接口协议的体系结构

3.3.1 帧中继业务

帧中继网络提供虚电路业务。虚电路是端到端的连接,不同的数据链路连接标识符(Data Link Connection Identifier, DLCI)代表不同的虚电路。在用户—网络接口(UNI)上的 DLCI 用于区分用户建立的不同虚电路,在网络—网络接口(NNI)上的 DLCI 用于区分网络之间的不同虚电路。DLCI 的作用范围仅限于本地的链路段,如图 3-24 所示。

虚电路分为永久虚电路和交换虚电路。PVC 是在两个端用户之间建立的固定逻辑连接,为用户提供约定的服务。帧中继交换设备根据预先配置的 DLCI 表把数据帧从一段链路交换到另外一段链路,最终传送到接收的用户。SVC 是使用 ISDN 信令协议 Q.931 临时建立的逻辑连接,



它要以呼叫的形式通过信令来建立和释放。有的帧中继网络只提供 PVC 业务, 而不提供 SVC 业务。

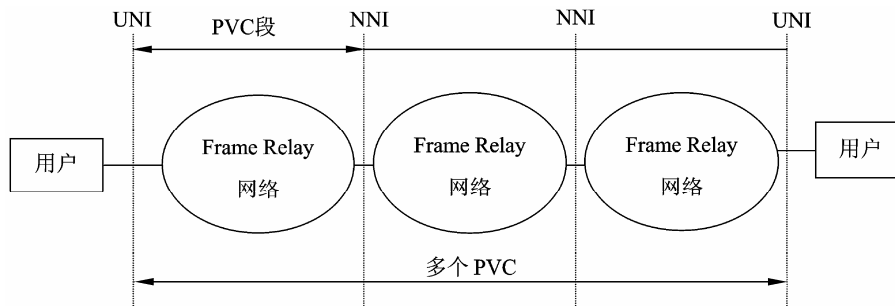


图 3-24 用户—网络接口与网络—网络接口

在帧中继的虚电路上可以提供不同的服务质量, 服务质量参数有下面这些。

- 接入速率 (AR): 指 DTE 可以获得的最大数据速率, 实际上就是用户—网络接口的物理速率。
- 约定突发量 (B_c): 指在 T_c (时间间隔) 内允许用户发送的数据量。
- 超突发量 (B_e): 指在 T_c 内超过 B_c 部分的数据量, 对这部分数据网络将尽力传送。
- 约定数据速率 (CIR): 指正常状态下的数据速率, 取 T_c 内的平均值。
- 扩展的数据速率 (EIR): 指允许用户增加的数据速率。
- 约定速率测量时间 (T_c): 指测量 B_c 和 B_e 的时间间隔。
- 信息字段最大长度: 指每个帧中包含的信息字段的最大字节数, 默认为 1600 字节。

这些参数之间有如下关系:

$$B_c = T_c \times CIR$$

$$B_e = T_c \times EIR$$

在用户—网络接口上对这些参数进行管理。在两个不同的传输方向上, 这些参数可以不同, 以适应两个传输方向业务量不同的应用。网络应该可靠地保证用户以等于或低于 CIR 的速率传送数据。对于超过 CIR 的 B_c 部分, 在正常情况下也能可靠地传送, 但是若出现网络拥塞, 则会被优先丢弃。对于 B_e 部分的数据, 网络将尽量传送, 但不保证传送成功。对于超过 $B_c + B_e$ 的部分, 网络拒绝接收, 如图 3-25 所示。这是在保证用户正常通信的前提下防止网络拥塞的重要手段, 对各种数据通信业务 (流式的和突发的) 有很强的适应能力。

在帧中继网上, 用户的数据速率可以在一定的范围内变化, 从而既可以适应流式业务, 又可以适应突发式业务, 这使得帧中继成为远程传输的理想形式, 如图 3-26 所示。

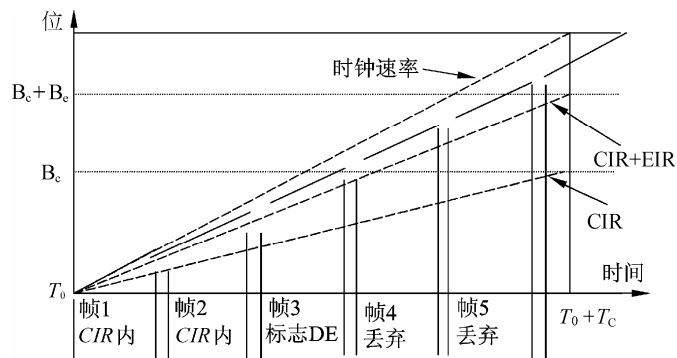
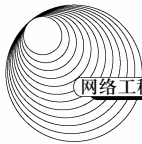


图 3-25 用户数据速率控制

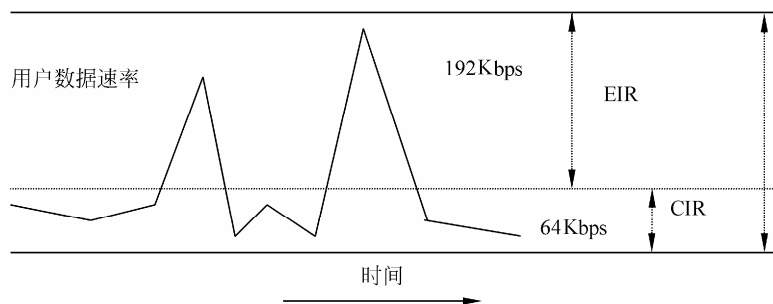
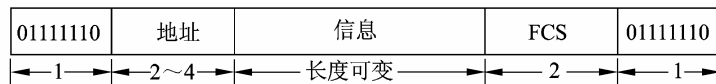


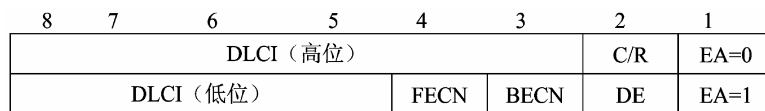
图 3-26 用户数据速率的变化

3.3.2 帧中继协议

与 HDLC 一样, 帧中继采用帧作为传输的基本单位。帧中继协议叫做 LAP-D (Q.921), 它比 LAP-B 简单, 省去了控制字段, 帧格式如图 3-27 所示。

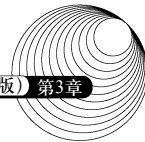


(a) 帧格式



(b) 2 字节地址格式

图 3-27 帧中继的帧格式



从图 3-27 (a) 看出, 帧头和帧尾都是一个字节的帧标志字段, 编码为 01111110, 与 HDLC 一样。信息字段长度可变, 1 600 字节是默认的最大长度。帧效验序列也与 HDLC 相同。地址字段的格式如图 3-27 (b) 所示。其中各参数的含义如下。

- EA: 地址扩展位, 该位为 0 时表示地址向后扩展一个字节, 为 1 时表示最后一个字节。
- C/R: 命令/响应位, 协议本身不使用这个位, 用户可以用这个位区分不同的帧。
- FECN: 向前拥塞位, 若网络设备置该位为 1, 则表示在帧的传送方向上出现了拥塞, 该帧到达接收端后, 接收方可据此调整发送方的数据速率。
- BECN: 向后拥塞位, 若网络设备置该位为 1, 则表示在与帧传送相反的方向上出现了拥塞, 该帧到达发送端后, 发送方可据此调整发送数据速率。
- DE: 优先丢弃位, 当网络发生拥塞时, DE 为 1 的帧被优先丢弃。
- DC: 该位仅在地址字段为 3 或 4 字节时使用。一般情况下 DC 为 0, 若 DC 为 1, 则表示最后一个字节的 3~8 位不再解释为 DLCI 的低位, 而被数据链路核心控制使用。
- DLCI: 数据链路连接标识符, 在 3 种不同的地址格式中分别是 10、16 和 23 位。它们的取值范围和用途各不相同, 有的虚电路传送数据, 有的虚电路传送信令, 还有的用于强化链路层管理。

关于 FECN 和 BECN 的用法如图 3-28 所示, 这个叫做显式拥塞控制。另外, 用户终端可以根据 ISDN 上层建立的序列号检测帧丢失的概率, 一旦帧的丢失超过一定程度, 用户终端要自动地降低发送的速率, 这个叫隐式流控。在这种没有流量控制的网络中, 对于拥塞的控制需要用户和网络共同完成。

强化链路层管理 (Consolidated Link Layer Management, CLLM) 是另外一种拥塞控制的方法。这种 CLLM 消息通过第二层管理连接 (DLCI 1007) 成批地传送拥塞信息, 其中包含受拥塞影响的 DLCI 清单以及出现拥塞的原因等。收到 CLLM 消息的终端可以采取相应的行动 (例如减少发送的数据量) 以缓解拥塞。

综上所述, LAP-D 帧具有下列作用。

- (1) 通过帧标志字节对帧进行封装, 通过 0 位插入技术做到透明地传输。
- (2) 利用地址字段实现对物理链路的多路复用。
- (3) 利用帧校验和检查传输错误, 丢弃出错的帧。
- (4) 检查帧的长度在 0 位插入之前或删除之后是否为整数个字节, 丢弃长度出错的帧。

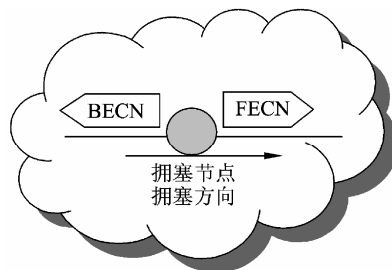
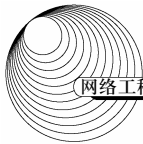


图 3-28 向前拥塞和向后拥塞



- (5) 检查太长（超过约定的长度）和太短（少于 1600 字节）的帧并丢弃。
- (6) 对网络拥塞进行控制。

3.3.3 帧中继的应用

帧中继原来是作为 ISDN 的承载业务而定义的，后来许多组织看到了这种协议在广域网中的巨大优势，所以对帧中继技术进行了广泛的研究。这里有产业界成立的帧中继论坛（Frame Relay Forum），也有国际和地区的标准化组织，都在从事非 ISTN 的独立帧中继标准的开发（例如 ITU-T X.36）。这些标准删除了依赖于 ISDN 的成分，提供了通用的帧中继连网功能。同时主要的网络设备制造商（例如 CISCO、3COM 等）都支持帧中继远程网络，它们的路由器都提供了 FR 接口。图 3-29 是通过帧中继连接局域网的例子。

帧中继远程连网的主要优点如下。

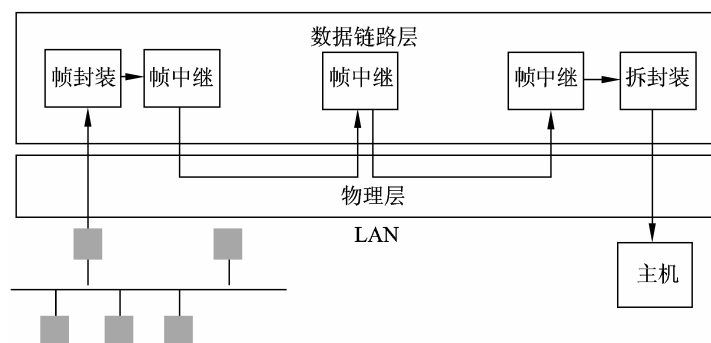
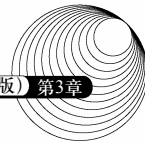


图 3-29 帧中继连接局域网

- (1) 基于分组（帧）交换的透明传输，可提供面向连接的服务。
- (2) 帧长可变，长度可达 1600~4096 字节，可以承载各种局域网的数据帧。
- (3) 可以达到很高的数据速率，2~45Mbps。
- (4) 既可以按需提供带宽，也可以应付突发的数据传输。
- (5) 没有流控和重传机制，开销很少。

帧中继协议在第二层实现，没有定义专门的物理层接口，可以用 X.21、V.35、G.703 或 G.704 接口协议。用户在 UNI 接口上可以连接 976 条 PVC（DLCI=16~991）。在帧中继之上不仅可以承载 IP 数据报，而且其他的协议（例如 LLC、SNAP、IPX、ARP 和 RARP 等）甚至远程网桥协议都可以在帧中继上透明地传输。帧中继论坛已经公布了多种协议通过帧中继传送的标准（例如 IP over RF）。



建立专用的广域网可以租用专线,也可以租用 PVC。帧中继相对于租用专线也有许多优点,例如下面这些。

(1) 由于使用了虚电路,所以减少了用户设备的端口数。特别是对于星型拓扑结构(一个主机连接多个终端),这个优点很重要。对于网状拓扑结构,如果有 N 台机器相连,利用帧中继可以提供 $N(N-1)/2$ 条虚拟连接,而不是 $N(N-1)$ 个端口。

(2) 提供备份线路成为运营商的责任,而不需要端用户处理。备份连接成为对用户透明的交换功能。

(3) 采用 CIR+EIR 的形式可以提供很高的峰值速率,同时在正常情况下使用较低的 CIR,可以实现经济的数据传输。

(4) 利用帧中继可以建立全国范围的虚拟专用网,既简化了路由又增加了安全性。

(5) 使用帧中继通过一点连接到 Internet,既经济又安全。

帧中继的缺点如下。

(1) 不适合对延迟敏感的应用(例如声音、视频)。

(2) 不保证可靠的提交。

(3) 数据的丢失与否依赖于运营商对虚电路的配置。

3.4 ISDN 和 ATM

随着技术的进步,新的通信业务不断涌现,新的通信网络也应运而生。在今天的通信领域有各种各样的网络,如用户电报网、固定电话网、移动电话网、电路交换数据网、分组交换数据网、租用线路网、局域网和城域网等。为了开发一种通用的电信网络,实现全方位的通信服务,电信工程师们提出了综合业务数字网。

3.4.1 综合业务数字网

ISDN 分为窄带 ISDN(Narrowband Integrated Service Digital Network, N-ISDN)和宽带 ISDN(Broadband Integrated Service Digital Network, B-ISDN)。N-ISDN 是 20 世纪 70 年代开发的网络技术,开发它的目的是以数字系统代替模拟电话系统,把音频、视频和数据业务放在一个网络上统一传输。从用户的角度看,ISDN 的体系结构如图 3-30 所示。

用户通过本地的接口设备访问 N-ISDN 提供的数字管道(digital pipe),数字管道以固定的位速率提供电路交换服务、分组交换服务或其他服务。为了提供不同的服务,ISDN 需要复杂的信令系统来控制各种信息的流动,同时按照用户使用的实际速率进行收费,这与电话系统根据连接时间收费是不同的。

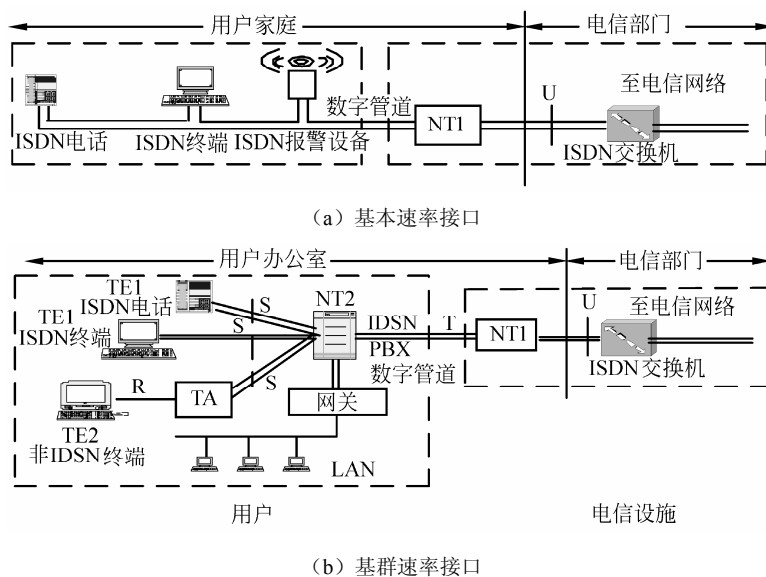
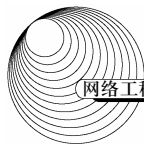


图 3-30 N-ISDN 用户接口

1. ISDN 用户接口

ISDN 系统主要提供两种用户接口：基本速率 $2B+D$ 和基群速率 $30B+D$ 。B 信道是 64Kbps 的话音或数据信道，而 D 信道是 16Kbps 或 64Kbps 的信令信道。对于家庭用户，通信公司在用户住所安装一个第一类网络终接设备 NT1。用户可以在连接 NT1 的总线上最多挂接 8 台设备共享 $2B+D$ 的 144Kbps 信道，如图 3-30 (a) 所示。NT1 的另一端通过长达数千米的双绞线连接到 ISDN 交换局。通常家庭连网使用这种方式。

大型商业用户则要通过第二类网络终接设备 NT2 连接 ISDN，如图 3-30 (b) 所示。这种接入方式可以提供 $30B+D$ （接近 2.048Mbps）的接口速率，甚至更高。所谓 NT2，就是一台专用小交换机（Private Branch eXchange, PBX），它结合了数字数据交换和模拟电话交换的功能，可以对数据和话音混合传输，与 ISDN 交换局的交换机功能差不多，只是规模小一些。

用户设备分为两种类型：1 型终端设备（TE1）符合 ISDN 接口标准，可通过数字管道直接连接 ISDN，例如数字电话、数字传真机等；2 型终端设备（TE2）是非标准的用户设备，必须通过终端适配器（TA）才能连接 ISDN。通常的 PC 就是 TE2 设备，需要插入一个 ISDN 适配卡才能接入 ISDN。

2. B-ISDN 体系结构

窄带 ISDN 的缺点是数据速率太低，不适合视频信息等需要高带宽的应用，它仍然是一种

基于电路交换网的技术。20 世纪 80 年代, ITU-T 成立了专门的研究组织, 开发宽带 ISDN 技术, 后来在 I.321 建议中提出了 B-ISDN 体系结构和基于分组交换的 ATM 技术, 如图 3-31 所示。B-ISDN 模型采用了与 OSI 参考模型同样的分层概念, 同时还以不同的平面来区分用户信息、控制信息和管理信息。

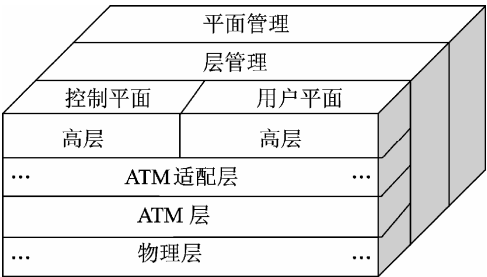


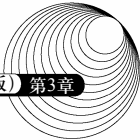
图 3-31 B-ISDN 参考模型

用户平面提供与用户数据传送有关的流量控制和差错检测功能。控制平面主要用于连接和信令信息的管理。管理平面支持网络管理和维护功能。每一个平面划分为相对独立的协议层, 共有 4 个层次, 各层又根据需要分为若干子层, 其功能如表 3-4 所示。

表 3-4 B-ISDN 各层的功能

层 次	子 层	功 能	与 OSI 的对应
高层		对用户数据的控制	高层
ATM 适配层	汇聚子层	为高层数据提供统一接口	第四层
	拆装子层	分割和合并用户数据	
ATM 层		虚通路和虚信道的管理 信元头的组装和拆分 信元的多路复用 流量控制	第三层
物理层	传输汇聚子层	信元校验和速率控制 数据帧的组装和拆分	第二层
	物理介质子层	位定时 物理网络接入	第一层

B-ISDN 的关键技术是异步传输模式, 采用 5 类双绞线或光纤传输, 数据速率可达 155Mbps, 可以传输无压缩的高清晰度电视 (HTV)。这种高速网络有广泛的应用领域和广阔的发展前途。下面首先介绍 ATM 的基本概念。



证同一虚电路上的信元顺序不能改变。这是 ATM 交换机设计中要解决的关键问题。

3.4.2 ATM 虚电路

ATM 的网络层以虚电路提供面向连接的服务。ATM 支持两级连接,即虚通路(Virtual Path)和虚信道(Virtual Channel)。虚信道相当于 X.25 的虚电路,一组虚信道捆绑在一起形成虚通路,如图 3-35 所示。这样的两级连接提供了更好的调度性能。



图 3-35 ATM 的虚通路和虚信道

ATM 虚电路具有下列特点。

- (1) ATM 是面向连接的(提供面向连接的服务,内部操作也是面向连接的),在源和目标之间建立虚电路(即虚信道)。
- (2) ATM 不提供应答,因为光纤通信是可靠的,只有很少的错误可以留给高层处理。
- (3) 由于 ATM 的目的是实现实时通信(例如语音和视频),所以偶然的错误信元不必重传。

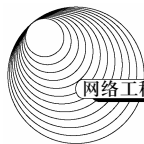
虚电路中传送的协议数据单元叫做 ATM 信元。ATM 信元包含 5 个字节的信元头和 48 个字节的数。信元头的结构如图 3-36 所示。可以看出,在 UNI 接口和 NNI 接口上的信元是不一样的。



图 3-36 ATM 的信元头结构

下面分别介绍各个字段的含义。

- GFC (General Flow Control): 4 位,主机和网络之间的信元才有这个字段,可用于主机和网络之间的流控或优先级控制,经过第一个交换机时被重写为 VPI 的一部分。这个字段不会传送到目标主机。



- VPI (虚通路标识符): 有 8 位 (UNI) 或 12 位 (NNI) 之分。
- VCI (虚信道标识符): 16 位, 理论上每个主机都有 256 个虚通路, 每个虚通路包含 65 536 个虚信道。实际上, 部分虚信道用于控制功能 (例如建立虚电路), 并不传送用户数据。
- PTI (Payload Type): 负载类型 (3 位), 表 3-5 说明了这 3 位的含义, 其中的 0 型或 1 型信元是用户提供的, 用于区分不同的用户信息, 而拥塞信息是网络提供的。

表 3-5 负载类型

PTI 值	含 义	PTI 值	含 义
000	用户数据, 无拥塞, 0 型信元	100	相邻交换机之间的维护信息
001	用户数据, 无拥塞, 1 型信元	101	源和目标交换机之间的维护信息
010	用户数据, 有拥塞, 0 型信元	110	源管理信元
011	用户数据, 有拥塞, 1 型信元	111	保留

- CLP (Cell Loss Priority): 这一位用于区分信息的优先级, 如果出现拥塞, 交换机优先丢弃 CLP 被设置为 1 的信元。
- HEC (Header Error Check): 8 位的头校验和, 将信元位形成的多项式乘以 2^8 , 然后除以 x^8+x^2+x+1 , 就形成了 8 位的 CRC 校验和。

3.4.3 ATM 高层

这是与业务相关的高层。ATM 4.0 规定的用户业务分为 4 类, 如表 3-6 所示。

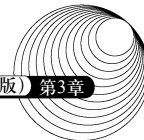
表 3-6 高层协议

服 务 类	CBR	RT-VBR	NRT-VBR	ABR	UBR
保证带宽	√	√	√	任选	×
实时通信	√	√	×	×	×
突发通信	×	×	√	√	√
拥塞反馈	×	×	×	√	×

这 4 类业务介绍如下。

(1) CBR (Constant Bit Rate)。固定比特率业务, 用于模拟铜线和光纤信道, 没有错误检查, 没有流控, 也没有其他处理。这种业务使得当前的电话系统可以平滑地转换到 B-ISDN, 也适合于交互式语音和视频流。

(2) VBR (Variable Bit Rate)。可变比特率业务, 又分为以下两类。



- 实时性：例如交互式压缩视频信号（MPEG）就属于这一类业务，其特点是传输速率变化很大，但是信元的到达模式不应有任何抖动，即对信元的延迟和延迟变化要加强控制。
- 非实时性：这一类通信要求按时提交，但一定程度的抖动是允许的，例如多媒体电子邮件就属于这一类业务。由于多媒体电子邮件在显示之前已经存入了接收者的磁盘，所以信元的延迟抖动在显示之前已经被排除了。

（3）ABR（Available Bit Rate）。有效比特率业务，用于突发式通信。如果一个公司通过租用线路连接它的各个办公室，就可以使用这一类业务。公司可以选择足够的线路容量来处理峰值负载，但是经常会有大量的线路容量空闲；或者公司选择的线路容量只能够处理最小的负载，在负载大时会经受拥塞的困扰。例如，平时线路保证 5Mbps，峰值时可能会达到 10Mbps。

（4）UBR（Unspecified Bit Rate）。不定比特率通信，可用于传送 IP 分组。因为 IP 协议不保证提交，如果发生拥塞，信元可以被丢弃。文件传输、电子邮件和 USENET 新闻是这类业务潜在的应用领域。

3.4.4 ATM 适配层

ATM 适配层（ATM Adaptation Layer）负责处理高层来的信息，发送方把高层来的数据分割成 48 字节长的 ATM 负载，接收方把 ATM 信元的有效负载重新组装成用户数据包。ATM 适配层分为以下两个子层。

- CS（Convergence）子层：提供标准的接口。
- SAR（Segmentation and Reassembly）子层：对数据进行分段和重装配。

这两个子层与相邻层的关系如图 3-37 所示。

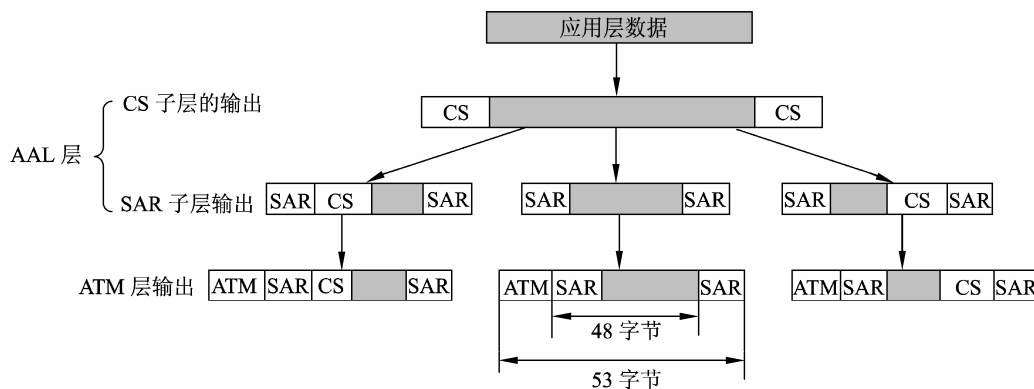
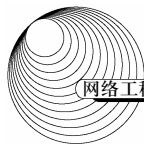


图 3-37 AAL 层与相邻层的关系



AAL 又分为 4 种类型, 对应于 A、B、C、D 4 种业务 (如表 3-7 所示), 这 4 种业务是定义 AAL 层时的目标业务。

表 3-7 高层协议

服 务 类 型	A 类	B 类	C 类	D 类
端到端定时	要求		不要求	
比特率	恒定	可变		
连接模式	面向连接			无连接

- AAL1: 对应于 A 类业务。CS 子层检测丢失和误插入的信元, 平滑进来的数据, 提供固定速率的输出, 并且进行分段。SAR 子层加上信元顺序号和及其检查和, 以及奇偶校验位等。
- AAL2: 对应于 B 类业务, 用于传输面向连接的实时数据流。无错误检测, 只检查顺序。
- AAL3/4: 对应于 C/D 类业务, 原来 ITU-T 有两个不同的协议分别用于 C 类和 D 类业务, 后来合并为一个协议。该协议用于面向连接的和无连接的服务, 对信元错误和丢失敏感, 但是与时间无关。
- AAL5: 对应于 C/D 类业务, 这是计算机行业提出的协议。与 AAL3/4 不同之处是在 CS 子层加长了检查和字段, 减少了 SAR 子层, 只有分段和重组功能, 因而效率更高。图 3-38 表示 AAL5 的两个子层的功能, 其中的 PAD 为填充字段, 使其成为 48 字节的整数倍; UU 字段供高层用户使用, 例如作为顺序号或多路复用, AAL 层不用; Len 字段代表有效负载的长度; CRC 字段为 32 位校验和, 对高层数据提供保护。AAL5 多用在局域网中, 实现 ATM 局域网仿真 (LANE)。

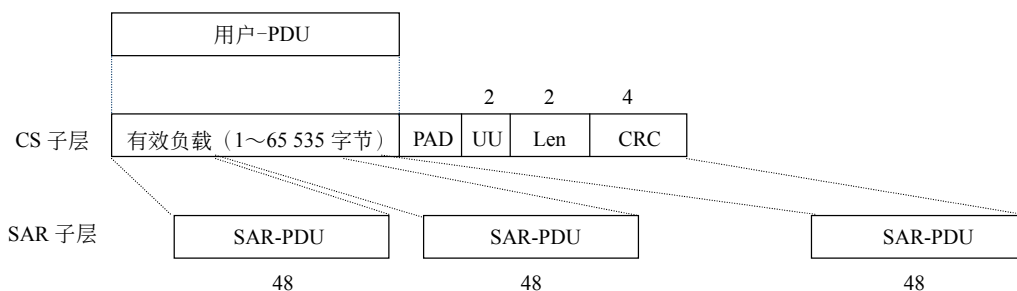
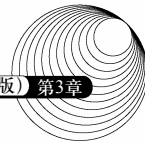


图 3-38 AAL5 的两个子层

3.4.5 ATM 通信管理

ATM 网络是一种高速网络, ATM 通信覆盖了实时的和非实时的、高速的和低速的 (从每



秒数千位到数百兆位)、固定比特率和可变比特率等多种模式,因而对拥塞控制提出了很高的要求。然而,在 ATM 信元中可用于通信控制的开销位非常有限,所以对信元流的控制必须由另外的机制来实施。ITU-T 基于简化控制机制和提高传输效率的目的定义了基本的通信管理功能(I.371 建议),同时 ATM 论坛又提出了更高级的通信和拥塞控制机制(Traffic Management Specification 4.0),所有这些控制功能的主要目标都是避免或者减小网络拥塞,保证 ATM 网络的服务质量(QoS)。这一节讨论 ATM 网络的通信管理和拥塞控制机制。

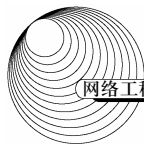
1. 连接准入控制

连接准入控制是防止网络因超载而出现拥塞的第一道防线。用户在请求建立一个 VPC 或 VCC 时,必须说明通信流的特征,从网络提供的各种 QoS 参数类中选择适合自己需求的类别。当且仅当网络在维护已有的连接正常运行的前提下能够满足用户的需求时才接受新的连接请求,这时网络与用户之间就建立了一个通信合约,只要用户在通信过程中遵守合约,就应该得到需要的服务质量。通信合约可以用以下 4 个参数表示。

- 峰值信元速率:提供给 ATM 连接的最大通信速率。
- 信元时延变化:在测量点上观察到的信元到达模式相对于峰值速率变化的上限。
- 可持续信元速率:在 ATM 连接持续时间可获得的平均速率的上限。
- 突发容限:在测量点上观察到的信元到达模式相对于可持续信元速率变化的上限。

前两个参数适用于 CBR 和 VBR 通信,后两个参数仅适用于 VBR 通信。虽然 CBR 通信源是以固定的峰值速率生成信元,但是由于种种原因(例如,不同速率的多个通信流复用 ATM 信道而引起的排队延迟,插入 OAM 信元引起的时延,物理层插入控制位引起的滞后效应等)会引起信元到达时间出现偏差,信元堆积时意味着峰值速率增加,信元之间出现间隙则意味着峰值速率减少。在网络为一个连接分配资源时不仅要考虑其峰值速率,而且要考虑以上因素引起的信元速率变化。特别是对于 VBR 通信,还要考虑可持续信元速率和突发容限,这样才能更有效地使用网络资源。例如,如果多个 VCC 统计时分多路复用在一个 VPC,若根据峰值速率和平均速率综合考虑,则为 VPC 分配的缓冲区才能得到有效的利用,同时还不会丢失信元。用户和网络之间可以用不同的方式建立通信合约。

- 隐含说明通信参数。可以由网络操作员规定一个参数值的集合,用户从默认的集合中选择符合自己需要的参数值,所有的或同类型的连接被赋予同样的参数值,提供同样的服务质量。
- 显式说明通信参数。用户提出连接请求时说明需要的通信参数,网络操作员为特定的用户提供特定的参数值。对于固定虚电路,在连接建立时通过网络管理系统设定所有的通信参数;对于交换虚电路,用户与网络通过 ATM 信令来协商连接的通信参数。



2. 使用参数控制

连接一旦建立,网络必须监控用户是否遵守通信合约,避免由于用户滥用资源而引起网络拥塞。使用参数控制可以在 VPC 和 VCC 两级实施,但主要还是监控 VPC 的使用参数,因为网络资源毕竟是在 VPC 基础上分配的,包含其中的所有 VCC 共享分配给 VPC 的资源。

对于信元峰值速率(R)和信元时延变化的监控适用下面的算法。如果没有时延变化,则信元到达的间隔时间 $T=1/R$;如果出现时延变化, T 值就不固定了。网络监控所有的信元到达时间,对于 $T \leq \tau$ 的信元,网络放行;对于 $T > \tau$ 的信元,可置其 $CLP=1$,在后续的监控点如果出现拥塞,则会被优先丢弃,这里 τ 是网络规定的时延变化容限。对于可持续信元速率和突发容限,可以用类似的算法进行监控。

3. 通信量整形

通信量整形用于平滑通信流,减少信元的堆积,公平地分配资源,缩小平均延迟时间。有一种令牌桶算法如图 3-39 所示,这种算法不是监视和丢弃违反通信合约的信元,而是规范信元的行为,使其符合通信合约的规定。

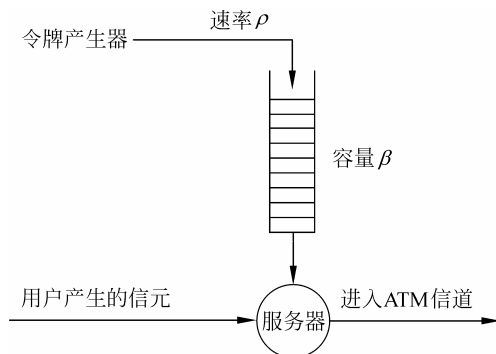


图 3-39 令牌桶算法

在图 3-39 中,令牌产生器每秒钟生产 ρ 个令牌,并把它们放入容量为 β 的令牌桶中,如果令牌桶放满了,多余的令牌将被丢弃。用户发出的信元经过服务器转发进入 ATM 信道。服务器的服务规则是每传送一个信元必须从令牌桶中取出并消耗掉一个令牌,如果令牌能充分供应,则服务器可以连续转发;如果令牌供应不及时,服务器就暂停转发,并等待获取新的令牌。按照这个算法,信元离开服务器进入 ATM 信道的平均速率不能大于令牌产生的速率(ρ),但是可以有一定的突发性,在短时间内消耗掉令牌桶中积压的所有令牌。