第3章 广域网技术

3.1 广域网的演变与发展

3.1.1 广域网技术的特点

计算机网络按覆盖的地理范围划分，主要分为广域网（Wide Area Network，WAN）、城域网（Metropolitan Area Network，MAN）与局域网（Local Area Network，LAN）3种类型。而Internet是将多个广域网、城域网与局域网互联构成的网际网。

局域网用于将一个实验室、一栋大楼或一个校园的有限范围内的各种计算机、终端与外部设备互联。城域网是介于广域网与局域网之间，它的设计目标是要满足50km范围内的大量企业、机关、公司的多个局域网互联的要求。广域网所覆盖的地理范围为50～5000km。如果从网络技术发展历史的角度看，最先出现的是广域网，然后是局域网，城域网是在Internet大规模接入的背景下出现的，因此它出现的时间相对较晚。

由于局域网、城域网与广域网出现的年代、发展背景，以及各自的设计目标不同，因此它们各自形成了自己鲜明的技术特点。将广域网与局域网进行比较后就会发现，它们的不同之处主要表现在：覆盖的地理范围不同；核心技术与标准不同；组建和管理方式不同。

局域网覆盖有限的地理范围，广域网所覆盖的地理范围为50～5000km，它覆盖一个地区、国家或横跨几个洲。广域网利用公共分组交换网、卫星通信网和无线分组交换网，将分布在不同地区的城域网、局域网或大型计算机系统互联起来，以便达到资源共享的目的。

在广域网的发展过程中，可以用于构成广域网的典型网络类型和技术主要有公共电话交换网（Public Switched Telephone Network，PSTN）、公用数据网X.25、帧中继（Frame Reply，FR）网、综合业务数字网（Integrated Service Digital Network，ISDN）、异步传输模式（Asynchronous Transfer Mode，ATM）网、数字数据网（Digital Data Network，DDN）、同步光纤网（Synchronous Optical Network，SONET）和同步数字体系（Synchronous Digital Hierarchy，SDH）。

3.1.2 广域网研究的技术思路

通过研究广域网的发展史，人们会发现研究与开发广域网技术有两类人员：一类是从事电信网技术的研究人员；另一类是研究计算机网络的技术人员。

从事电话交换、电信网与通信技术的人员考虑的问题是：如何在成熟技术和广泛使用的电信网络的基础上，将传统的语音传输业务和数据传输业务结合，这就出现了ISDN、

X.25 与 WDM 的研究与应用。

早期,人们利用公共电话交换网 PSTN 的模拟信道,使用调制解调器完成计算机与计算机之间的低速数据通信。1974 年,X.25 网出现。随着光纤开始应用,一种简化的 X.25 协议的网络(即帧中继网)得到广泛应用。数字数据网(DDN)是一种基于点到点连接的窄带公共数据网。这几种技术在早期的广域网建设中发挥了一定的作用。ATM 网络的概念最初是从事电话交换与电信网的技术人员提出的,它们试图将语音与数据传输放在一个网络中完成,并且覆盖从局域网到广域网的整个领域。但是,这条技术路线不是很成功的。尽管目前部分广域网的核心交换网仍然使用 ATM 技术,但是它的发展空间已经比较小了。

20 世纪 80 年代,波分复用(WDM)技术已在美国 AT&T 公司的网络中使用,它的传输速率为 2×1.7Gb/s。从 20 世纪 90 年代中期开始,波分复用技术在北美得到快速发展,并首先向密集波分复用(DWDM)方向发展。欧洲各国大的电信运营商安装了大量的点到点 DWDM 系统,这些系统以 16×2.5Gb/s 的 DWDM 系统为主。2000 年,DWDM 实验系统的速率为 82×40Gb/s,传输距离为 300km。目前光纤传输系统最高容量是 80Tb/s,并且在远距离点到点传输的广域网中得到应用。早期的 SONET/SDH 是为传统电信业务服务的,它并不适合传输 IP 分组。由于数据业务将成为未来电信业务的主体,而绝大多数运营商的传输网是 SONET/SDH 网络,出于经济的原因,他们不会放弃大量已存在的、成熟可靠的 SONET/SDH 技术。为了适应数据业务发展的需要,SDH 发展趋势是支持 IP 和 Ethernet 业务的接入,并不断融合 ATM 和路由交换功能,构成以 SDH 为基础的广域网平台。广域网发展的一个重要趋势是 IP over SONET/SDH。

从事计算机网络的研究人员早期是在电信网的基础上,考虑如何利用物理层的通信设施和设备,将分布在不同区域的计算机连接起来。在此基础上,他们把研究的重点放在物理层接口标准、数据链路层协议与网络层 IP 协议上。当局域网的 Ethernet 技术日趋成熟和广泛使用时,他们调整了高速局域网的设计思路,在速率为 1Gp/s 的千兆以太网、10Gb/s 的万兆以太网和 40G/100Gb/s 四万兆以太网及十万兆以太网物理层设计中,考虑利用光纤作为远距离传输介质,发展光以太网技术,将 Ethernet 技术从局域网扩大到城域网和广域网。目前看来,这条技术路线是十分成功的。

图 3-1 给出了广域网和数据传输技术的发展过程。图中涉及的技术是以 ISDN、X.25、WDM 与 GE/10GE/40GE/100GE 这 4 条路线来组织。图 3-1 中横坐标表示的是对应技术的发展时间。

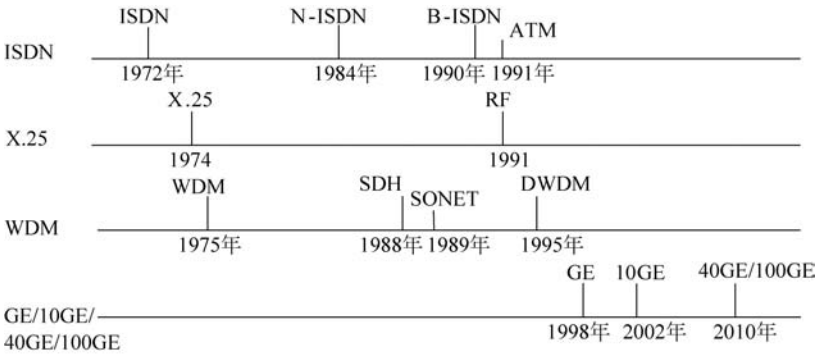

图 3-1 广域网和数据传输技术的发展过程

3.2 广域网结构与参考模型

3.2.1 广域网的组成

早期的计算机网络主要是广域网，在以广域网为背景研究网络体系的结构的过程中，人们总结出计算机网络要完成的两大基本功能是数据处理和数据通信，相应的计算机网络从逻辑功能上分为资源子网和通信子网两部分，如图 3-2 所示。

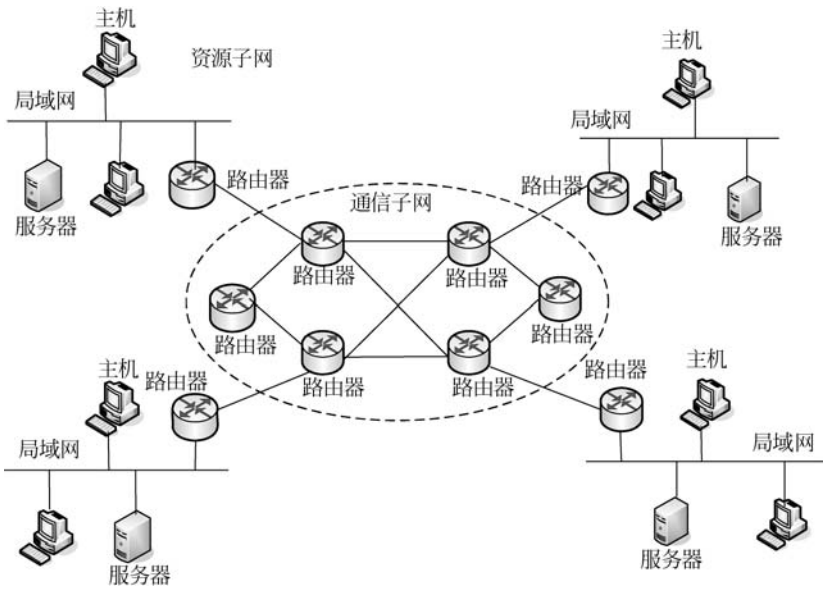

图 3-2 广域网结构

1. 资源子网

资源子网由主计算机系统、终端、终端控制器、联网外设、各种软件资源与信息资源组成。资源子网负责全网数据的处理业务，向网络用户提供各种网络资源和网络服务。主计算机系统简称主机(Host)，它可以是大型机、中型机、小型机、工作站或微型机。主机是资源子网的主要组成单元，它通过高速通信线路与通信子网的通信控制处理机(或路由器)相连接。普通用户终端通过主机联入网内。主机要为本地用户访问网络中其他主机设备与资源提供服务，同时要为网中远程用户共享本地资源提供服务。终端(Terminal)是用户访问网络的界面，终端可以是简单的输入、输出终端，也可以是带有处理机的智能终端，它可以通过主机接入网内，也可以通过终端控制器、报文分组组装与拆卸装置或通信控制处理机连入网内。

2. 通信子网

通信子网由通信控制处理机(Communication Control Processor，CCP)、通信线路与其他通信设备组成，负责完成网络中分组数据的发送、接收与转发等通信处理任务。CCP 就是目前广泛使用的路由器的前身，因此后面讨论中可以用路由器代替 CCP。在广域网中，路由器是通信子网中的网络结点。一方面，它作为与资源子网的主机、终端的连接接口，将

主机和终端接入网内；另一方面，它又作为通信子网中分组存储转发结点，完成分组的接收、校验、存储、转发等功能，实现将源主机分组准确发送到目的主机的作用。通信线路为路由器与路由器、路由器与主机之间提供通信信道。计算机网络采用了多种通信线路，如电话线、双绞线、同轴电缆、光缆、无线通信信道、微波与卫星通信信道。

计算机网络的拓扑主要是指通信子网的拓扑。网络拓扑是通过通信子网中路由器与通信线路之间的几何关系来表示网络结构，反映网络中各实体间的结构关系。

需要指出的是，广域网可以明确地划分出资源子网和通信子网，而局域网由于采用的工作原理和结构的限制，不能明确地划分出子网的结构。

3.2.2 广域网参考模型

广域网主要工作在OSI参考模型底层的3个层次，即物理层、数据链路层和网络层，如图3-3所示。

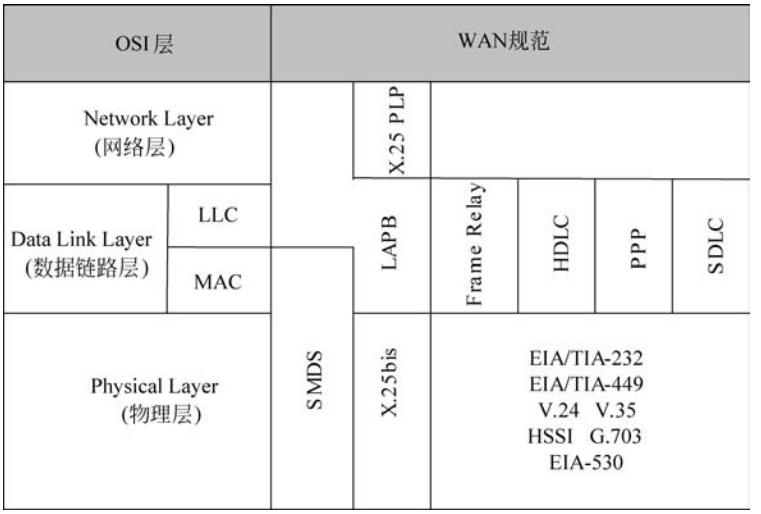

图3-3 广域网技术规范与OSI参考模型的关系

如果从网络覆盖的范围与网络体系结构的角度，广域网与城域网的设计一定要解决网络层的路由问题，局域网不需要考虑路由，因此它可以不涉及网络层的问题。早期的广域网X.25与ATM都设计了自己的网络层协议，但是，在Internet广泛应用的今天，不管它是哪种类型的局域网、城域网与广域网技术，它的网络层都统一使用IP协议，这已经成为一种趋势，因此目前的局域网、城域网与广域网研究都将注意力集中到物理层和数据链路层，负责解决好低两层的数据通信问题。根据这种发展趋势，本章主要讨论广域网的物理层与数据链路层技术和协议，网络层问题将在第5章中讨论。

广域网标准通常描述物理层传送方式与数据链路层操作，包括寻址、数据流控制与封装。广域网标准由许多经认可授权的组织定义及管理，其中包括如下机构。

(1) 国际电信联盟的电信标准化部门(ITU-T)，即前国际电话与电报咨询委员会(CCITT)。

(2) 国际标准化组织(ISO)。

(3) 国际网络工程任务组(IETF)。

(4) 电子工业协会(EIA)。

(5) 电信工业协会(TIA)。

3.2.3 广域网的物理层

广域网物理层协议描述了如何提供广域网服务的电子、机械、操作及功能方面的连接，大多数的广域网都需要通信服务提供商、交换电信公司(如网际网络服务提供商)等提供的互联架构。

1. 数据终端设备和数据通信设备

广域网物理层描述了数据终端设备(Data Terminating Equipment，DTE)和数据通信设备(Data Circuit-terminating Equipment，DCE)之间的接口(见图 3-4)，其中 DTE 是具有一定的数据处理能力和数据收发能力的设备，负责提供存储或接收数据，如连接到调制解调器上的计算机(或路由器)就是一种 DTE。DCE 提供了到网络的物理连接，提供时钟信号用于同步 DCE 和 DTE 之间的数据传输，并转发数据流，如 Modem。DCE 设备通常是与 DTE 对接。

图 3-4　串行 DCE 和 DTE 连接

对于标准的串行接口，通常从外观就能判断是 DTE 还是 DCE，DTE 是针头(俗称公头)，DCE 是孔头(俗称母头)，这样两种接口才能连接在一起。

连接到 WAN 时，串行连接的一端为 DTE 设备，另一端为 DCE 设备。两台 DCE 设备之间是 WAN 服务提供商传输网络，在这种情况下，DTE 通常是路由器，但是如果终端、计算机、打印机或传真机直接连接到服务提供商网络，则它们将充当 DTE。

DCE 通常是调制解调器或 CSU/DSU，它将来自 DTE 的用户数据转换为 WAN 服务提供商传输链路能够接收的格式。远程 DCE 收到信号后，将其解码为比特序列，然后将其传输给远程 DTE。其中，CSU/DSU(信道服务单元/数据服务单元)是一种数字接口设备，负责将 DTE 设备上的物理接口连接到 DCE 设备的接口。CSU 接收和传送来往于 WAN 线路的信号，并提供对其两边线路干扰的屏蔽作用。CSU 也可以响应电话公司的用于检测目的地的回响信号。DSU 进行线路控制，在输入和输出间转换以下几种形式的帧：RS-232C、RS-449 或局域网的 V.35 帧和 T1 线路上的 TDM DSX 帧。

电子工业协会(EIA)和国际电信联盟电信标准局(ITU-T)一直积极制定让 DTE 能够与 DCE 通信的标准。EIA 将 DCE 称为数据通信设备，而 ITU-T 将 DCE 称为数据电路端接设备。

符合标准的 DTE/DCE 接口定义了如下规范。

(1) 机械/物理特征：引脚数量和连接器类型。

(2) 电气特征：定义了表示 0 和 1 的电平。

(3) 功能特征：通过指定接口中每条信令线路的含义定义了其执行的功能。

(4) 过程特征：指定数据传输事件的顺序。

用于连接 DTE 和 DCE 的电缆是屏蔽串行转接电缆。屏蔽串行转接电缆的路由器端可

能是 DB-60 连接器,用于连接串行 WAN 接口卡的 DB-60 接口;另一端可以是符合标准的连接器。WAN 提供商或 CSU/DSU 通常决定了这种电缆的类型。主流网络设备均支持串行标准 EIA/TIA-232、EIA/TIA-449、V.35、X.21 和 EIA/TIA-530,如图 3-5 所示。

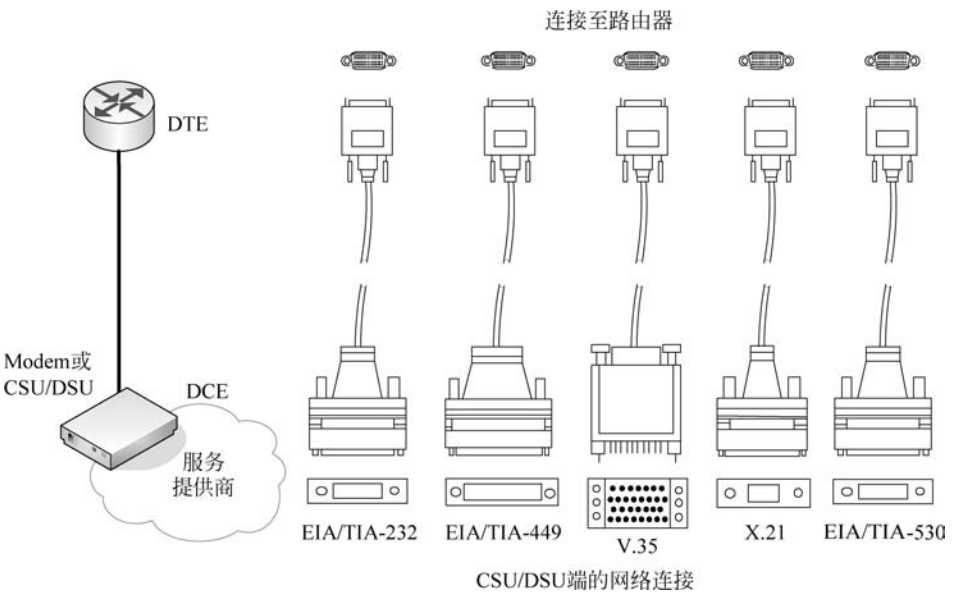

图 3-5 WAN 串行连接方式

许多物理层标准定义了 DTE 和 DCE 之间接口的控制规则,表 3-1 列举了常用物理层标准和它们的连接器。

表 3-1 广域网物理层标准

标 准	描 述
EIA/TIA-232	在近距离范围内,允许 25 针 D 型连接器上的信号速度最高可达 64kb/s,以前称为 RS-232
EIA/TIA-449/530	是 EIA/TIA-232 的高速版本(最高可达 2Mb/s),它使用 36 针 D 型连接器,传输距离更远,也称为 RS-422 或 RS-423
EIA/TIA-612/613	高速串行接口(HSSI),使用 50 针 D 型连接器,可以提供 T3(45Mb/s)、E3(34Mb/s)和同步光纤网(SONET)STS-1(51.84Mb/s)速率的接入服务。接口的实际速率取决于外部的 DSU 及连接的服务类型
V.35	用来在网络接入设备和分组网络之间进行通信的一个同步、物理层协议的 ITU-T 标准。V.35 普遍用在美国和欧洲,其建议速率为 48kb/s
X.21	用于同步数字线路上的串行通信 ITU-T 标准,它使用 15 针 D 型连接器,主要用在欧洲和日本
V.24	是介于 DTE 和 DCE 之间的物理层接口的 ITU-T 标准
G.703	用于电信公司设备与 DTE 之间的连接的 ITU-T 电子与机械规格,使用 British Naval Connectors(BNC)并运行于 E1 数据速率等级下

2. 常见的广域网设备

(1) 路由器(Router):提供诸如局域网互联、广域网接口等多种服务,包括 LAN 和

WAN 的设备连接端口。

(2) WAN 交换机(Switch)：连接到广域网上，进行语音、数据资料及视频通信。WAN 交换机是多端口的网络设备，通常进行帧中继、X.25 及交换式多兆位数据服务(SMDS)等流量的交换。WAN 交换机通常在 OSI 参考模型的数据链路层之下，依据每个帧的目的地址过滤、转发并洪泛数据帧。

(3) 调制解调器(Modem)：包括针对各种语音级(Voice Grade)服务的不同接口，信道服务单元/数字服务单元(CSU/DSU)是 T1/E1 服务的接口，终端适配器/网络终结器(TA/NT1)是综合业务数字网(ISDN)的接口。

(4) 通信服务器(Communication Server)：汇集拨入和拨出的用户通信。

3. 广域网基本的线路类型与网络带宽

可以依照速率需求向 WAN 服务提供商租用 WAN 链路，其容量单位为每秒多少位(b/s)，其带宽决定了通过 WAN 链路的数据传输速率。美国地区的 WAN 带宽规定通常使用北美数字分级系统(North American Digital Hierarchy)，而中国或亚洲地区(除日本外)通常使用的是欧洲标准。表 3-2 列出了一些常见的 WAN 链路类型及相应网络带宽。

表 3-2　线路类型及带宽

线 路 类 型	信 令 标 准	带　　宽
56	DS0	56kb/s
64	DS0	64kb/s
T1	DS1	1.544Mb/s
E1	M	2.048Mb/s
E3	M3	34.064Mb/s
T3	DS3	44.736Mb/s
OC-1	SONET	51.84Mb/s
OC-3	SONET	155.54Mb/s
OC-9	SONET	466.56Mb/s
OC-12	SONET	622.08Mb/s
OC-18	SONET	933.12Mb/s
OC-24	SONET	1224.16Mb/s
OC-36	SONET	1866.24Mb/s
OC-48	SONET	2488.32Mb/s

3.3　广域网的数据链路层

3.3.1　数据链路层的基本概念

1. 链路与数据链路

链路(Link)就是一个结点到相邻结点的一段物理线路，而中间没有任何其他的交换结点。在进行数据通信时，两个计算机之间的通信路径往往要经过许多段这样的链路，可见链

路只是路径的一个组成部分。

数据链路(Data Link)则是另外一个概念。这是因为当需要在一条线路上传输数据时,除了必须有一条物理线路外,还必须有一些必要的通信协议来控制这些数据的传输。若把实现这些协议的硬件和软件加到链路上,就构成了数据链路。现在最常用的方法是使用网络适配器来实现这些协议。一般的适配器都包含数据链路层和物理层这两层的功能。

也有人采用另外的术语,就是把链路分为物理链路和逻辑链路。物理链路就是上面所说的链路,逻辑链路就是上面所说的数据链路,是物理链路加上必要的通信协议。

数据链路结构可以分为两种:点到点链路和点到多点链路,如图3-6所示。图3-6中数据链路两端DTE称为计算机或终端,从链路逻辑功能的角度常称为站,从网络拓扑结构的观点则称为结点。

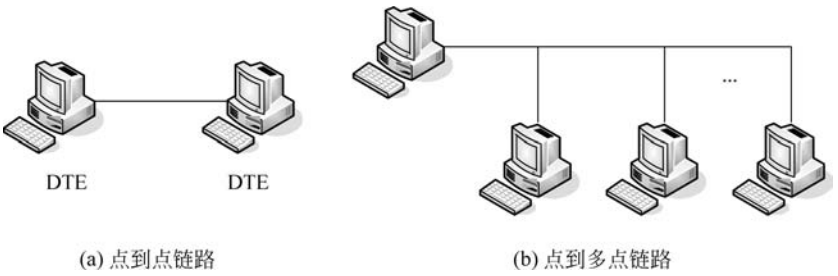

图3-6 数据链路结构

在点到点链路中,发送信息和命令的站称为主站,接收信息和命令而发出确认信息或响应的站称为从站,兼有主、从功能可发送命令与响应的站称为复合站。在点到多点链路中,往往有一个站为控制站,主管数据链路的信息流,并处理链路上出现的不可恢复的差错情况,其余各站则为受控站。

2. 数据链路层控制功能

数据链路层是OSI参考模型的第二层,它在物理层提供的通信接口与物理线路连接服务的基础上,将易出错的物理线路构筑成相对无差错的数据链路,以确保DTE与DTE之间、DTE与网络之间有效、可靠地传送数据信息。为了实现这个目标,数据链路控制功能应包括以下几部分。

(1) 帧控制。数据链路上传输的基本单位是帧。帧控制功能要求发送站把网络层送来的数据信息分成若干数据块,在每个数据块中加入地址字段、控制字段、校验字段,以及帧开始和结束标志,组成帧来发送;要求接收端从收到的帧中去掉标志字段,还原成原始数据信息后送到网络层。

(2) 帧同步。在传输过程中必须实现帧同步,以保证对帧中各个字段的正确识别。

(3) 差错控制。当数据信息在物理链路中传输出现差错,数据链路控制功能要求接收端能检测出差错并予以恢复,通常采用的方法有自动请求重发(ARQ)和前向纠错两种。采用ARQ方法时,为了防止帧的重收和漏收,常对帧采用编号发送和接收。当检测出无法恢复的差错时,应通知网络层做相应处理。

(4) 流量控制。流量控制用于克服链路的拥塞。它能对链路上信息流量进行调节,确保发送端发送的数据速率与接收端能够接收的数据速率匹配。常用的流量控制方法是滑动

窗口控制法。

(5) 链路管理。数据链路的建立、维持和终止,控制信息的传输方向,显示站的工作状态,这些都属于链路管理的范畴。

(6) 透明传输。当所传输的数据出现了控制字符时,就必须采取适当的措施,使接收方不至于将数据误认为是控制信息。这样才能保证数据链路层的透明传输。

(7) 寻址。在多点链路中,帧必须能到达正确的接收站。

(8) 异常状态恢复。当链路发生异常情况时,如收到含义不清的序列或超时收不到响应等,能自动重新启动,恢复到正常工作状态。

典型广域网的通信子网是由路由器与连接路由器的点对点的租用线路组成的。当一帧到达路由器时,路由器会检查该帧的校验字段,如果校验字段正确,该帧将被送到数据链路层软件。该软件一般是集成在网络接口适配器板的某一块芯片中。如果该帧是它希望接收的帧,那么它将该帧中的网络层数据(分组)提交网络层,网络层根据分组的源、目的地址进行路由选择,确定分组的输出线路。如果路由器 A 选择下一个路由器 B 时,它就需要通过建立相应的数据链路,执行数据链路协议,建立可靠的数据链路,为网络层提供可靠的数据包传输服务。

3. 数据链路层协议分类

为了适应数据通信的需要,ISO、ITU-T 以及一些国家和大的计算机制造公司,先后制定了不同类型的数据链路层协议。根据数据帧的组织方式,可以分为面向字符型和面向比特型两种。

(1) 面向字符型。国际标准化组织制定的 ISO 1745、IBM 公司的二进制同步规程 BSC 以及我国国家标准 GB 3543—1982 属于面向字符型的规程,也称为基本型传输控制协议。在这类协议中,用字符编码集中的几个特定字符来控制链路的操作,监视链路的工作状态。例如,采用国际 5 号码标准时,SOH 表示报头开始,STX 表示正文开始,ETX 表示正文结束,ETB 表示正文信息组的结束,ENQ、EOT、ACK、NAK 等字符用于控制链路操作。面向字符型规程有一个很大的缺点,就是它与所用的字符集有密切的关系,使用不同字符集的两个站之间,很难使用该协议进行通信。面向字符型规程主要适用于中低速异步或同步传输,很适合通过电话网进行数据通信。

(2) 面向比特型。ITU-T 制定的 X.25 建议的 LAPB、ISO 制定的 HDLC、美国国家标准 ADCCP、IBM 公司的 SDLC 等均属于面向比特型的规程。在这类规程中,采用特定的二进制序列 01111110 作为帧的开始和结束,以一定的比特组合所表示的命令和响应实现链路的监控功能,命令和响应可以和信息一起传送。所以它可以实现不受编码限制、高可靠和高效率的透明传输。面向比特型规程主要适用于中高速同步半双工和全双工数据通信,如分组交换方式中的链路层就采用这种规程。随着通信技术的发展,它的应用将日益广泛。

4. 广域网的数据链路层协议

在每个 WAN 连接上,数据在通过 WAN 链路前都被封装到帧中,为了确保传输数据的帧的格式匹配,必须配置恰当的第二层封装类型。协议的选择主要取决于 WAN 的拓扑和通信设备。WAN 数据链路层定义了传输到远程站点的数据封装形式。路由器把数据报以二层帧格式进行封装,然后传输到广域网链路。尽管存在几种不同的广域网封装,但是大多数有相同的原理。这是因为大多数的广域网封装都是从高级数据链路控制(HDLC)和同步

数据链路控制(SDLC)演变而来的。尽管它们有相似的结构,但是每一种数据链路协议都指定了自己特殊的帧类型,不同类型是不相容的。

通常广域网数据链路层协议有以下几种。

(1) 点对点协议(Point to Point Protocol,PPP):PPP是一种标准协议,规定了同步或异步链路上的路由器对路由器、主机对网络的连接。

(2) 串行线路互联协议(Serial Line Internet Protocol,SLIP):SLIP是PPP的前身,用于使用TCP/IP的点对点串行连接。SLIP已经基本上被PPP取代。

(3) 高级数据链路控制(High-level Data Link Control,HDLC):它是点对点、专用链路和电路交换连接上默认的封装类型。HDLC是按比特访问的同步数据链路层协议,它定义了同步串行链路上使用帧标识和校验的数据封装方法。当连接不同设备商的路由器时,要使用PPP封装(基于标准)。HDLC同时支持点对点与点对多点连接。

(4) X.25/平衡式链路访问程序(LAPB):X.25是帧中继的原型,它指定LAPB为一个数据链路层协议。LAPB是定义DTE与DCE之间如何连接的ITU-T标准,是在公用数据网络上维护远程终端访问与计算机通信的。LAPB用于包交换网络,用来封装位于X.25中第二层的数据包。

(5) 帧中继:帧中继是一种高性能的包交换式广域网协议,可以应用于各种类型的网络接口中。帧中继适用于更高可靠性的数字传输设备上。

(6) ATM:ATM是信元交换的国际标准,在定长(53B)的信元中能传输各种各样的服务类型(如话音、音频、数据)。ATM适用于高速传输介质(如SONET)。

(7) 综合业务数字网(ISDN):一组数字服务,可经由现有的电话线路传输语音和数据信息。

最常用的两个广域网协议是HDLC和PPP,因此本节重点介绍这两种协议。

3.3.2 HDLC协议

高级数据链路控制(High-Level Data Link Control,HDLC)是一个在同步网上传输数据、面向比特的数据链路层协议,它是由国际标准化组织(ISO)根据IBM公司的SDLC(Synchronous Data Link Control)协议扩展开发而成的。

20世纪70年代初,IBM公司率先提出了面向比特的同步数据链路控制规程(SDLC),随后,美国国家标准委员会(ANSI)和国际标准化组织(ISO)均采纳并发展了SDLC,并分别提出了自己的标准:ANSI的高级数据通信控制规程(Advanced Data Communications Control Procedure,ADCCP),ISO的高级数据链路控制规程(High-level Data Link Control,HDLC)。CCITT在此基础上将HDLC修改为链路接入规程(Link Access Procedure,LAP),并成为X.25网络接口标准的一部分,但是后来又将它修改为LAPB,使之与HDLC的新版本更加兼容。

1. HDLC的基本概念

(1) 主站、从站、复合站。HDLC涉及3种类型的站,即主站、从站和复合站。

主站的主要功能是发送命令(包括数据信息)帧、接收响应帧,并负责整个链路控制系统的初始化、流程的控制、差错检测或恢复等。

从站的主要功能是接收由主站发来的命令帧,向主站发送响应帧,并且配合主站参与差

错恢复等链路控制。

复合站的主要功能是既能发送，又能接收命令帧和响应帧，并且负责整个链路的控制。

(2) HDLC 链路的结构。在 HDLC 中，对主站、从站和复合站定义了 3 种链路结构，如图 3-7 所示。

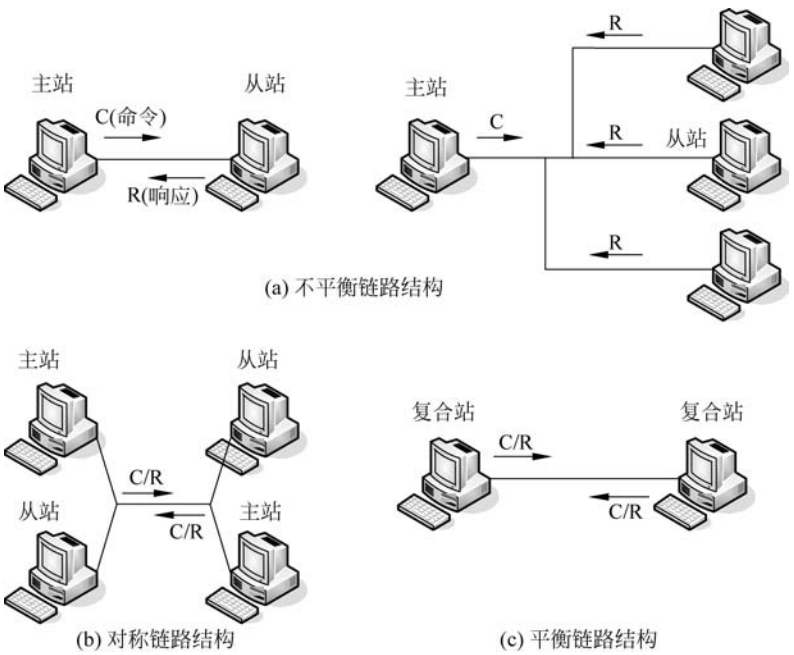

图 3-7　HDLC 链路结构类型

(3) 操作方式。根据通信双方的链路结构和传输响应类型，HDLC 提供了正常响应方式、异步响应方式和异步平衡方式 3 种操作方式。

① 正常响应方式(NRM)。正常响应方式适用于不平衡链路结构，即用于点对点和点对多点的链路结构中，特别是点-多点链路。在 NRM 方式中，由主站控制整个链路的操作，负责链路的初始化、数据流控制和链路复位等。从站的功能很简单，它只有在收到主站的明确允许后，才能发出响应。

② 异步响应方式(ARM)。异步响应方式也适用于不平衡链路结构。它与 NRM 不同的是：在 ARM 方式中，从站可以不必得到主站的允许就可以开始数据传输。显然它的传输效率比 NRM 有所提高。

③ 异步平衡方式(ABM)。异步平衡方式适用于平衡链路结构。链路两端的复合站具有同等的能力，不管哪个复合站均可在任意时间发送命令帧，并且不需要收到对方复合站发出的命令帧就可以发送响应帧。ITU-T X.25 建议的数据链路层就采用这种方式。

除 3 种基本操作方式外，还有 3 种扩充方式，即扩充正常响应方式(SNRM)、扩充异步响应方式(SARM)、扩充异步平衡方式(SABM)，它们分别与 3 种基本方式相对应。

2. HDLC 的帧结构

HDLC 的帧格式如图 3-8 所示，它由 6 个字段组成，这 6 个字段可以分为 5 种类型，即标志字段(F)、地址字段(A)、控制字段(C)、信息字段(I)、帧校验字段(FCS)。在帧结构中

允许不包含信息字段(I)。

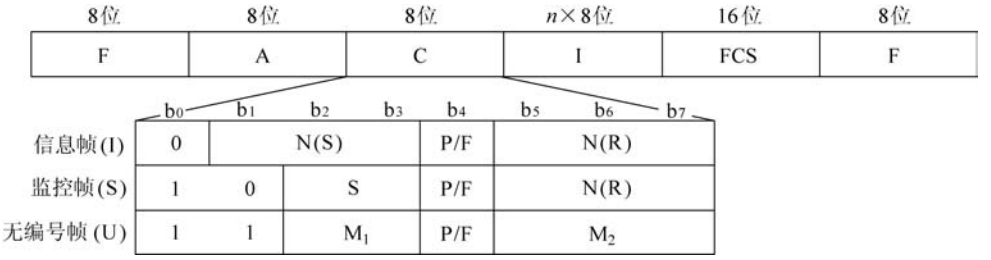

图 3-8　HDLC 的帧格式

(1) 标志字段(F)。标志字段为 01111110 的比特模式,用以标志帧的起始和帧的终止,以此来实现帧的同步。标志字段也可以作为帧与帧之间的填充字符。通常,在不进行帧传送的时刻,信道仍处于激活状态,在这种状态下,发送方不断地发送标志字段,可以用作时间填充。

在一串数据比特中,有可能产生与标志字段的码型相同的比特组合。为了防止这种情况产生,保证对数据的透明传输,采取了 0 比特插入/删除法。图 3-9 给出了 0 比特插入/删除法的基本工作过程。

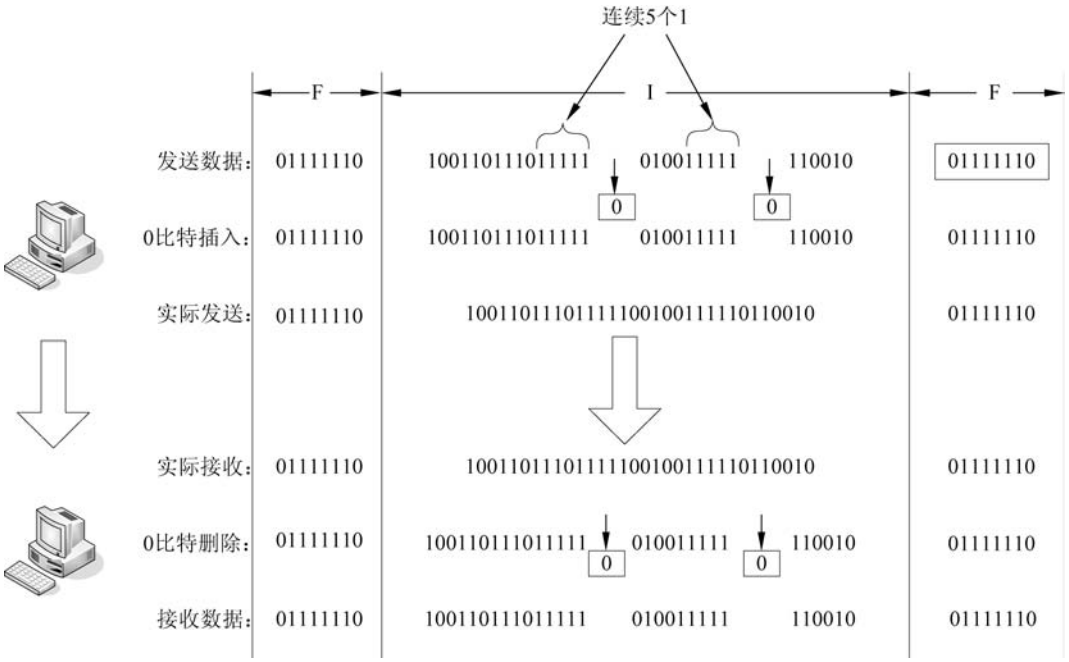

图 3-9　0 比特插入/删除法的基本工作过程

0 比特插入/删除法规定:发送端在两个标志字段 F 之间的比特序列中,如果检测出连续的 5 个 1,不管它后面的比特位是 0 还是 1,都增加一个 0;那么接收过程中,在两个标志字段 F 之间的比特序列中检查出连续的 5 个 1 之后就删除一个 0。在数据发送端,经 0 比特插入后的数据就可以保证不会出现 6 个连续的 1。在接收一个帧时,首先找到 F 字段以确定帧的边界,然后再对其中的比特序列进行检查,每当发现 5 个连续 1 时,就将这 5 个连

续 1 后的一个 0 删除，以便将数据还原成原来的比特。这样保证了在传送的比特序列中，不管出现什么样的比特组合，也不至于产生帧边界的判断错误。因此，0 比特插入/删除法的使用，排除了在信息流中出现的标志字段的可能性，保证了对数据信息的透明传输。

当连续传输两帧时，前一个帧的结束标志字段 F 可以兼作后一个帧的起始标志字段。当暂时没有信息传送时，可以连续发送标志字段，使接收端可以一直保持与发送端同步。

(2) 地址字段(A)。地址字段表示链路上站的地址。在使用不平衡方式传送数据时(采用 NRM 和 ARM)，地址字段总是写入从站的地址；在使用平衡方式时(采用 ABM)，地址字段总是写入应答站的地址。

地址字段的长度一般为 8 位，最多可以表示 256 个站的地址。在许多系统中规定，地址字段为“11111111”时，定义为全站地址，即通知所有的接收站接收有关的命令帧并按其动作；全“0”比特为无站地址，用于测试数据链路的状态。因此有效地址共有 254 个之多，这对一般的多点链路是足够的。但考虑在某些情况下，如使用分组无线网，用户可能很多，可使用扩充地址字段，以字节为单位扩充。在扩充时，每个地址字段的第 1 位用作扩充指示，即当第 1 位为“0”时，后续字节为扩充地址字段；当第 1 位为“1”时，后续字节不是扩充地址字段，地址字段到此为止。

(3) 控制字段(C)。控制字段用来表示帧类型、帧编号及命令、响应等。从图 3-8 可知，由于 C 字段的构成不同，可以把 HDLC 帧分为 3 种类型：信息帧、监控帧、无编号帧，分别简称 I 帧(Information)、S 帧(Supervisory)、U 帧(Unnumbered)。在控制字段中，第 1 位是“0”为 I 帧，第 1、2 位是“10”为 S 帧，第 1、2 位是“11”为 U 帧，它们具体操作复杂，在后面予以介绍。另外控制字段也允许扩展。

(4) 信息字段(I)。信息字段内包含了用户的数据信息和来自上层的各种控制信息。在 I 帧和某些 U 帧中，具有该字段，它可以是任意长度的比特序列。在实际应用中，其长度由收发站的缓冲器的大小和线路的差错情况决定，但必须是 8 位的整数倍。

(5) 帧校验字段(FCS)。帧校验序列用于对帧进行循环冗余校验，其校验范围从地址字段的第 1 比特到信息字段的最后一比特的序列，并且规定为了透明传输而插入的“0”不在校验范围内。

在 HDLC 协议中，采用了循环冗余校验(Cyclical Redundancy Check，CRC)码进行差错检验。


视频讲解

CRC 校验码的基本思想是利用线性编码理论，在发送端根据要传送的 k 位二进制码序列，以一定的规则产生一个校验用的 r 位监督码(CRC 码)，并附在信息后边，构成一个新的共($k+r$)位的二进制码序列数，然后发送出去；在接收端，则根据信息码和 CRC 码之间所遵循的规则进行检验，以确定传送中是否出错。

CRC 的校验过程如下。

(1) 设要发送的数据为 $f(x)$，其长度为 k 位；生成多项式为 $G(x)$，最高幂次为 r；计算 $f(x)\cdot x^r$；对于采用 CRC-16(HDLC 使用的生成多项式，表达式为：$G(x)=x^{16}+x^{15}+x^2+1$ 生成多项式的二进制乘法来说，其意义相当于将发送比特序列左移了 16 位，用来放置余数。

(2) 将 $f(x)\cdot x^r$ 除以生成多项式 $G(x)$(在实际计算时，使用模 2 加法进行运算)，即

$$\frac{f(x)\cdot x^r}{G(x)}=Q(x)+\frac{R(x)}{G(x)}$$

式中,$R(x)$为余数多项式。

(3) 将 $f(x)\cdot x^r+R(x)$作为一个整体数据块,记为 $H(x)$,从发送端经过通信信道传送到接收端。

(4) 在接收端,设接收到的数据块为 $H'(x)$,计算 $H'(x)/G(x)$,若能除尽,则说明发送过程中未出现差错;若有余数(除不尽),则说明发送过程中出现了差错。

下面用一个简单的例子说明 CRC 差错检验的方法。

(1) 设发送的数据为 5 位的数据 10111,即 $f(x)=x^4+x^2+x+1$;生成多项式 $G(x)=x^4+x+1$,最高幂次为 r,对于二进制其生成多项式的数值为 10011。

(2) $f(x)\cdot x^r=101110000$,除以生成多项式 $G(x)=10011$,余数为 1100。

(3) 将 $f(x)\cdot x^r+R(x)=101111100$(前 5 位为信息位,后 4 位为校验位)$=H(x)$传送到接收方。

(4) 接收到的数据块 $H'(x)=101111100$ 除以 $G(x)$,能除尽,则传送过程中未发生错误。如果传送过程中出现错误,则接收到的数据块除以 $G(x)$时不能除尽(二进制除法采用的是模 2 除法,即不向上一位借位,所以实际上就是除数和被除数做异或计算,其无实际的数学含义)。

至此,校验计算完成。

CRC 生成多项式 $G(x)$与具体的链路层协议有关。例如,以太网帧校验中采用的生成多项式 CRC-32 的表达式为

$$G(x)=x^{32}+x^{26}+x^{23}+x^{22}+x^{16}+x^{12}+x^{11}+x^{10}+x^8+x^7+x^5+x^4+x^2+x+1$$

CRC 校验具有侦错能力强、系统消耗小、使用简单的特点。具体来说,CRC 具有以下的检错能力。

(1) CRC 校验码能检查出全部单个错。

(2) CRC 校验码能检查出全部离散的二位错。

(3) CRC 校验码能检查出全部奇数个错。

(4) CRC 校验码能检查出全部长度小于或等于 r 位的突发错。

(5) CRC 校验码能以 $\left[1-\left(\frac{1}{2}\right)^{r-1}\right]$的概率检查出长度为 $r+1$ 位的突发错。

对于 CRC-16,$r=16$,则 CRC 校验码能检查出所有小于或等于 16 位的突发错,并能以 $\left[1-\left(\frac{1}{2}\right)^{16-1}\right]=0.999\,969\,48$(即 99.997%)的概率检查出长度为 17 位的突发错,漏检概率仅为十万分之三。

3. HDLC 的帧类型

控制字段是 HDLC 的关键字段,许多重要的功能都靠它来实现。控制字段规定了帧的类型,即 I 帧、S 帧、U 帧,控制字段的格式如图 3-8 所示,其中:

N(S):发送帧序列编号。

N(R):期望接收的帧序列编号,且是对 N(R)以前帧的确认。

S:监控功能比特。

M：无编号功能比特。

P/F：查询/结束(Poll/Final)比特，作为命令帧发送时的查询比特，以 P 位出现；作为响应帧发送时的结束比特，以 F 位出现。

下面对 3 种不同类型的帧分别予以介绍。

(1) 信息帧(I 帧)。I 帧用于数据传送，它包含信息字段。在 I 帧控制字段中 b_1～b_3 比特为 N(S)，b_5～b_7 比特为 N(R)。由于是全双工通信，因此通信每一方都各有一个 N(S)和 N(R)。这里要特别强调指出：N(R)带有确认的意思，它表示序号为 N(R)－1，以及在这以前的各帧都已经正确无误地接收了。

为了保证 HDLC 的正常工作，在收发双方都设置两个状态变量 V(S)和 V(R)。V(S)是发送状态变量，为发送 I 帧的数据站所保持，其值指示待发的一帧的编号；V(R)是接收状态变量，其值为期望所收到的下一个 I 帧的编号。由此可见，用这两个状态变量的值可以确定发送序号 N(S)和接收序号 N(R)。

在发送站，每发送一个 I 帧，V(S)→N(S)，然后 V(S)＋1→V(S)。在接收站，把收到的 N(S)与保留的 V(R)做比较，如果这个 I 帧可以接收，则 V(R)＋1→N(R)，回送到发送站，用于对前面所收到的 I 帧的确认。N(R)除了可以用 I 帧回送之外，还可以用 S 帧回送，这一点从图 3-8 中可以看出来，在 I 帧和 S 帧的控制字段中具有 N(R)。

V(S)、V(R)和 N(S)、N(R)都各占 3 位，即序号采用模 8 运算，使用 0～7 八个编号。在有些场合，如卫星通信模 8 已经不能满足要求了，这时可以把控制字段扩展为 2B，N(S)、N(R)和 V(S)、V(R)都用 7 位来表示，即增加到模 128。

(2) 监控帧(S 帧)。监控帧用于监视和控制数据链路，完成信息帧的接收确认、重发请求、暂停发送请求等功能。监控帧不具有信息字段。监控帧共有 4 种，表 3-3 所示为这 4 种监控帧的记忆符、名称和功能。

表 3-3　监控帧的记忆符、名称和功能

记忆符	名　称	比　特		功　能
		b_2	b_3	
RR	接收准备好	0	0	确认，且准备接收下一帧，已收妥 N(R)以前的各帧
RNR	接收未准备好	1	0	确认，暂停接收下一帧，N(R)含义同上
REJ	拒绝接收	0	1	否认，否认 N(R)起的各帧，但 N(R)以前的帧已收妥
SREJ	选择拒绝接收	1	1	否认，只否认序号为 N(R)的帧

上面 4 种监控帧中，前 3 种用在返回连续 ARQ 方法中，最后一种只用于选择重发 ARQ 方式中。

S 帧中没有包含用户的数据信息字段，不需要 N(S)，但 S 帧中 N(R)特别有用，它的具体含义随不同的 S 帧类型而不同。其中，在 RR 帧和 RNR 帧相当于确认信息 ACK，在 REJ 帧相当于否认信息 NAK。同时应当注意到，RR 帧和 RNR 帧还具有流量控制的作用，RR 帧表示已经做好接收帧的准备，希望对方继续发送，而 RNR 帧则表示希望对方停止发送(这可能是由于来不及处理到达的帧或缓冲器已存满)。

(3) 无编号帧(U 帧)。无编号帧用于数据链路的控制，它本身不带编号，可以在任何需要的时刻发出，而不影响带编号的信息帧的交换顺序。它可以分为命令帧和响应帧。用

5比特(即M_1、M_2)来表示不同功能的无编号帧。HDLC所定义的无编号帧的记忆符和名称如表3-4所示。

表3-4　无编号帧的记忆符和名称

记忆符	名　称	类　型		M_1	M_2		
		命令	响应	b_3 b_4	b_6	b_7	b_8
SNRM	置正常响应模式	C		0 0	0	0	1
SARM/DM	置异步响应模式/断开方式	C	R	1 1	0	0	0
SABM	置异步平衡模式	C		1 1	1	0	0
SNRME	置扩充正常响应模式	C		1 1	0	1	1
SARME	置扩充异步响应模式	C		1 1	0	1	0
SABME	置扩充异步平衡模式	C		1 1	1	1	0
DISC/RD	断链/请求断链	C	R	0 0	0	1	0
SIM/RIM	置初始化方式/请求初始化方式	C		1 0	0	0	0
UP	无编号探询	C		0 0	1	0	0
UI	无编号信息	C		0 0	0	0	0
XID	交换识别	C	R	1 1	1	0	1
RESET	复位	C		1 1	0	0	1
FRMR	帧拒绝		R	1 0	0	0	1
UA	无编号确认		R	0 0	1	1	0

值得注意的是,在HDLC的各类帧中,均带有查询/结束(P/F)比特。在不同的数据传送方式中,P/F比特的用法是不一样的。

在NRM方式中,从站不能主动向主站发送信息,从站只有收到主站发出的P比特为1(对从站的查询)的命令帧以后才能发送响应帧。若从站有数据发送,则在最后一个I帧中将F比特置1;若无数据发送,则应在回答的S帧中将F比特置1。

在ARM或ABM方式中,任何一个站都可以在主动发送的S帧和I帧中将P比特置1。对方站收到P=1的帧后,应尽早地回答本站的状态并将F比特置1。

下面结合图3-10所示的例子具体说明P/F比特的使用方法。图3-10中主站A和从站B、C连成多点链路,传送帧的一些主要参数按照"地址,帧名和序号,P/F"的先后顺序标注。这里的地址是指地址字段中应填入的站地址;帧名是指帧的名称,如RR、I;序号是指监控帧中的N(R)或信息帧中的N(S)、N(R),如RR4、I31[第1个数字是N(S),第2个数字是N(R)]。P/F是在其为1时才写上P或F,表明此时控制字段的第5比特为1。

主站A先询问从站B:"B站,若有信息,请立刻发送"。这时A站发送的帧是RR监控帧,并将N(R)置0,表示期望收到对方的0号帧。因此在图3-10中将这样的帧记为"B,RR0,P"。对主站的这一命令,B站响应以连续4个信息帧,其序号N(S)从0到3。最后在第4个信息帧中将F置1,表示"我要发送的信息已发完"。这个帧记为"B,I30,F"。A站在收到B站发来的4个信息帧后,发回确认帧RR4[这时N(R)=4]。注意,这时P/F比特并未置1,因此B站收到RR4后不必应答。此后A站轮询C站,P=1,虽然这时C站没有数据发送,但也必须立即应答。C站应答也是RR帧,表示目前没有信息帧发送,F=1表明这是回答对方命令的一个响应。

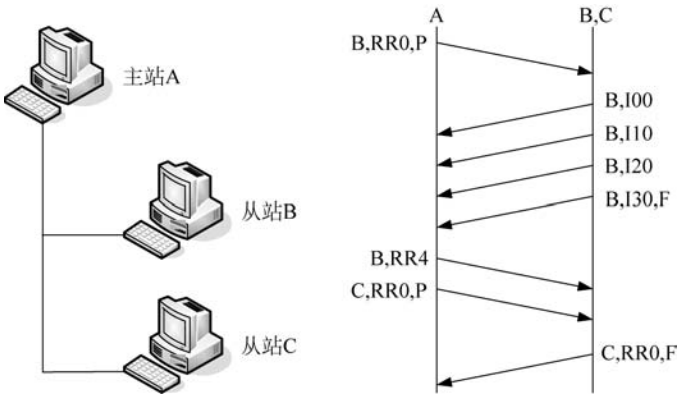

图 3-10　P/F 比特的使用方法

有了 P/F 比特，使 HDLC 规程使用起来更加灵活。在两个复合站全双工通信时，任何一方都可随时使 P＝1，这时对方就要立即回答 RR 帧，并置 F＝1，这样就可以收到对方的确认了。如果不使用 P/F 比特，则收方不一定马上发出确认帧，如收方可以在发送自己的信息帧时，利用 N(R)把确认信息发出。

4. HDLC 的操作

在图 3-10 中讨论了主站 A 和从站 B、C 交换信息的情况，这只是整个数据通信的中间阶段，在这个阶段之前还有一个数据链路的建立阶段，数据传送完毕后，还必须有一个数据链路的释放阶段。也就是说 HDLC 执行数据传输控制功能，一般分为 3 个阶段：数据链路建立阶段、信息帧传送阶段、数据链路释放阶段。第 2 阶段的完成需要用到信息帧和监控帧，第 1、3 阶段的完成需要用到无编号帧。

图 3-11 画出了多点链路的建立和释放。主站 A 先向从站 B 发出置正常响应模式(SNRM)的命令，并将 P 置 1，要求 B 站做出响应。B 站同意建立链路后，发送无编号帧确认 UA 的响应，将 F 置 1。A 站和 B 站在将其状态变量 V(S)和 V(R)进行初始化后，就完成了数据链路的建立。然后 A 站开始与 C 站建立链路。

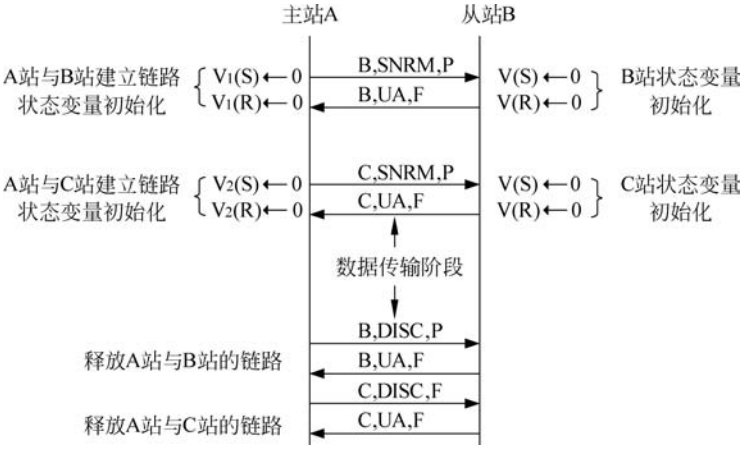

图 3-11　多点链路的建立和释放

当数据传送完毕后,A站分别向B站和C站发出断链命令(DISC),B站、C站用无编号确认帧UA响应,完成数据链路的释放。

图3-12所示为点对点链路中两个站都是复合站的情况。复合站中的一个站先发出置异步平衡模式(SABM)的命令,对方回答一个无编号响应帧UA后,即完成了数据链路的建立。由于两个站是平等的,任何一个站均可在数据传送完毕后发出DISC命令提出断链的要求,对方用UA帧响应,完成数据链路的释放。

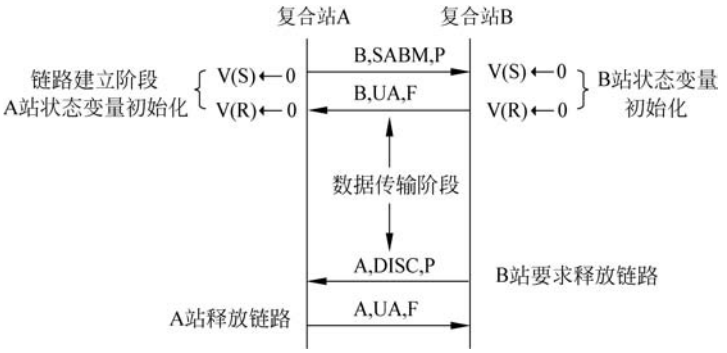

图3-12 复合站的链路建立和释放

5. HDLC协议的特点

与面向字符的基本型传输控制协议相比较,HDLC具有以下特点。

(1) 透明传输。HDLC对任意比特组合的数据均能透明传输。"透明"是一个很重要的术语,它表示某一个实际存在的事物看起来好像不存在一样。"透明传输"表示经实际电路传送后的数据信息没有发生变化。因此对所传送数据信息来说,由于这个电路并没有对其产生什么影响,可以说数据信息"看不见"这个电路,或者说这个电路对该数据信息来说是透明的。这样任意组合的数据信息都可以在这个电路上传送。

(2) 可靠性高。在HDLC协议中,差错控制的范围是除了F标志的整个帧外,基本型传输控制规程中不包括前缀和部分控制字符。另外,HDLC对I帧进行编号传输,有效地防止了帧的重收和漏收。

(3) 传输效率高。在HDLC中,额外的开销比特少,允许高效的差错控制和流量控制。

(4) 适应性强。HDLC协议能适应各种比特类型的工作站和链路。

(5) 结构灵活。在HDLC中,传输控制功能和处理功能分离,层次清楚,应用非常灵活。

最后需要指出,一般的应用极少需要使用HDLC的全集,而选用HDLC的子集。当使用某一厂商的HDLC时,一定要弄清该厂商所选用的子集是什么。

3.3.3 PPP协议

1. PPP协议的基本概念

PPP协议是在SLIP的基础上发展起来的。由于SLIP协议只支持异步传输方式、无协商过程(尤其不能协商如双方IP地址)等网络层属性的缺陷,在以后的发展过程中逐步被PPP协议所替代。

PPP协议目前最新的RFC文档为RFC1661,其中具体介绍了PPP协议的基本概念,状

态的转换过程，链路控制协议（Link Control Protocol，LCP）的帧格式及内容等知识。

从 1994 年 7 月到现在，PPP 协议本身并没有大的改变，但由于 PPP 协议所具有的其他链路层协议所无法比拟的特性，它得到了越来越广泛的应用，其扩展支持协议也层出不穷，随之而来的是 PPP 协议功能的逐步强大。

PPP 协议其全称为 Point-To-Point Protocol（点到点协议），它作为一种提供在点到点链路上传输、封装网络层数据包的数据链路层协议，处于 TCP/IP 协议栈的第二层，主要被设计用来在支持全双工的同异步链路上进行点到点之间的数据传输。

PPP 主要由三类协议组成：链路控制协议（LCP）、网络层控制协议（Network Control Protocol，NCP）和 PPP 扩展协议。其中，链路控制协议主要用于建立、拆除和监控 PPP 数据链路；网络层控制协议主要用于协商在该数据链路上所传输的数据包的格式与类型；PPP 扩展协议主要用于提供对 PPP 功能的进一步支持。

同时 PPP 还提供了用于网络安全方面的验证协议（PAP 和 CHAP）。

PPP 协议的特点如下。

（1）PPP 协议与其他数据链路层协议不同，既支持同步链路又支持异步链路，而如 X.25、FR 等数据链路层协议只对同步链路提供支持。

（2）具有各种 NCP 协议，如 IPCP、IPXCP 更好地支持了网络层协议。

（3）具有验证协议 CHAP、PAP，更好地保证了网络的安全性。

2. PPP 的帧格式

PPP 协议不仅提供了对网络层报文的承载（封装），并且支持各种链路参数的协商。这种协商特性，也导致了 PPP 报文的多样性。

PPP 的帧格式如图 3-13 所示。标志字段（Flag），规定为 0x7E（符号“0x”表示它后面的字符是用十六进制表示的，十六进制的 7E 的二进制表示是 01111110），它的作用是标识了帧的起始和结束。FCS 为帧的 CRC 校验字段。而真正属于 PPP 帧的内容的为地址字段（Address）、控制字段（Control）、协议字段（Protocol）和信息字段（Information）。

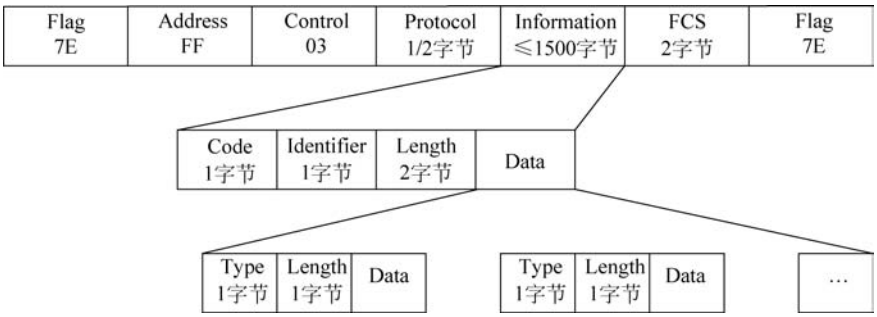

图 3-13　PPP 帧格式

其中地址字段（Address）规定为 0xFF（即 11111111），控制字段（Control）规定为 0x03（即 00000011），这两个字段一起表示了此帧为 PPP 帧。

协议字段（Protocol）作用是标明信息字段中是哪一种分组。当该字段为 0x0021 时，PPP 帧的信息字段就是 IP 数据报。若为 0xC021 时，则信息字段是 PPP 的数据链路控制协议 LCP 的数据，而 0x8021 表示这是网络层的控制数据。表 3-5 列出了常用协议字段的值及其含义。

表 3-5 常用协议字段的值及其含义

协议字段值	含　义
0x0021	Internet Protocol(IP)
0x002b	Novell IPX
0x002d	Van Jacobson Compressed TCP/IP
0x002f	Van Jacobson Uncompressed TCP/IP
0x8021	Internet Protocol Control Protocol(IPCP)
0x802b	Novell IPX Control Protocol
0x8031	Bridging NC
0xC021	Link Control Protocol
0xC023	Password Authentication Protocol(PAP)
0xC223	Challenge Handshake Authentication Protocol(CHAP)

Code 字段表明了是哪种 PPP 协商报文,如果为 IP 报文,则不存在此域,取而代之的直接是 IP 报文的数据内容。Identifier 字段用于进行协商报文的匹配。Length 字段为此协商报文长度(包括 Code 及 Identifier)。Data 字段所包含的为协商报文内容。Type 为协商选项类型,其后的 Length 为此协商选项的长度(包含 Type 字段),Data 字段为协商选项具体内容。常用的 Code 和 Type 值及其含义分别如表 3-6 和表 3-7 所示。

表 3-6 Code 值及其含义

Code 代码	含　义
0x01	Configure-Request
0x02	Configure-Ack
0x03	Configure-Nak
0x04	Configure-Reject
0x05	Terminate-Request
0x06	Terminate-Ack
0x07	Code-Reject
0x08	Protocol-Reject
0x09	Echo-Request
0x10	Echo-Reply
0x11	Discard-Request

表 3-7 Type 值及其含义

Type 代码	含　义
0x01	Maximum-Receive-Unit(MRU)
0x02	Async-Control-Character-Map
0x03	Authentication-Protocol
0x04	Quality-Protocol
0x05	Magic-Number
0x06	RESERVED
0x07	Protocol-Field-Compression
0x08	Address-and-Control-Field-Compression

校验域字段(Frame Check Sequence,FCS)为 2B,它采用 CRC 循环冗余校验计算在没有插入任何转义符号前的地址域、控制域、协议域、信息域内的数据,不包括标志域和校验域。在发送数据时,依次计算上述内容,然后将计算后的结果放入校验域;在接收时,首先去除转义字符,然后再计算校验。在接收中计算校验时可以将校验域也计算在内,计算的结果应该是固定值 F0B8(十六进制)。

3. PPP 链路的建立

PPP 链路的建立是通过一系列的协商完成的。其中,链路控制协议(LCP)除了用于建立、拆除和监控 PPP 数据链路外,还主要进行链路层特性的协商,如 MTU、验证方式等;网络层控制协议主要协商在该数据链路上所传输的数据包的格式和类型,如 IP 地址。

1）PPP 的协商过程

PPP 在建立数据链路之前要进行一系列的协商。其过程为：PPP 首先进行 LCP 协商，协商内容包括最大传输单元(MTU)、魔术字(Magic Number)、验证方式、异步字符映射等。LCP 协商成功后，进入链路建立阶段(Establish)。如果配置了 CHAP 或 PAP 验证，便进入 CHAP 或 PAP 的验证阶段，验证通过后才会进入网络协商阶段(NCP)，如 IPCP、IPXCP、BCP 的协商。任何阶段的协商失败都会导致链路的拆除。魔术字主要用于检测链路自环，通过发送 Echo Request、Echo Reply 来检测自环和维护链路状态。如果连续发现有超过最大自环允许数目个 Echo Request 报文中的魔术字与上次发送的魔术字相同，则判定网络发生自环现象。如果链路发生自环，则就需要采取相应的措施对链路复位。另外，LCP 发送 Configure-Request 时也可以检测自环，LCP 发现自环后，再发送一定数目的报文后，也会复位链路。如果 PPP 发送的 Echo Request 报文产生丢失，则连续丢失最大允许的个数之后，将链路复位，以免过多的无效数据传输。异步字符映射用于同异步转换。

2）PPP 的验证过程

(1) 口令认证协议(Password Authentication Protocol，PAP)。PAP 为两次握手协议，它通过用户名及口令来对用户进行验证。PAP 的验证过程为：当两端链路可相互传输数据时，被验证方发送本端的用户名及口令到验证方，验证方根据本端的用户表(或 RADIUS 服务器)查看是否有此用户，口令是否正确。如果正确，则会向对端发送 ACK 报文，通知对端已被允许进入下一阶段协商；否则发送 NAK 报文，通告对端验证失败。此时，并不会直接将链路关闭。只有当验证不过次数达到一定值时，才会关闭链路，来防止因误传、网络干扰等造成不必要的 LCP 重新协商过程。PAP 的验证过程如图 3-14 所示。PAP 的缺点是，在网络上以明文的方式传递用户名和口令，如果在传输过程中被截获，便有可能对网络安全造成极大的威胁。因此，它适用于对网络安全要求相对比较低的环境。

(2) 挑战握手认证协议(Challenge-Handshake Authentication Protocol，CHAP)。CHAP 为三次握手协议。它的特点是，只在网络上传输用户名，并不传输用户口令，因此它的安全性要比 PAP 高。CHAP 的验证过程为：首先由验证方向被验证方发送一些随机数，并同时将本端的主机名附带上一起发送给被验证方。被验证方接到对端的验证请求(Challenge)时，便根据此报文中验证方的主机名查找本端的用户表，如果找到了用户表中与验证方主机名相同的用户，便利用报文 ID、随机数和此用户的口令用 MD5 算法生成应答(Response)，然后将应答和自己的主机名送回，验证方接到此应答后，用报文 ID、本方保留的口令和随机数用 MD5 算法得出结果，与被验证方应答做比较，根据比较返回相应的结果。图 3-15 所示为 CHAP 的认证过程。

图 3-14　PAP 的验证过程

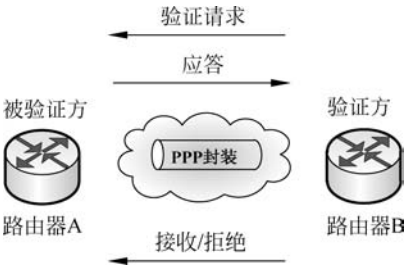

图 3-15　CHAP 的认证过程

4. 多链路捆绑

多链路捆绑(Multilink Protocol,MP)作为PPP功能的扩展协议。它可为用户提供更大的带宽,实现数据的快速转发。同时,还可实现对链路资源的动态分配,以提供负载均衡。

MP一些选项的协商是在LCP协商过程中完成的,如MRRU、SSNHF、Discriminator(终端指示符)等。而决定不同通道是否需进行多链路捆绑有两个条件:只有两个链路的Discriminator和验证方式、用户完全相符时,才能对两个链路进行捆绑。这就意味着只有当验证完成后,才能真正完成MP的协商过程。MP不会导致链路的拆除。如果配置了MP,两个链路不符合MP条件,则会建立一条新的MP通道,同时也表明允许MP为单个链路。MP是完全依照用户进行的,只有相同的用户才能进行捆绑。如果一端配置了MP,另一端不支持或未配MP,则建立起来的链路为非MP链路。

这里特别要提到的是,在1999年公布的在以太网上运行的PPP,即PPP over Ethernet,简称为PPPoE,这是PPP协议能够适应多种类型链路的一个典型实例。PPPoE是宽带上网主机使用的链路层协议。这个协议把PPP帧再封装在以太网帧中(当然还要增加一些能够识别各用户的功能)。宽带上网时由于数据传输速率较高,因此可以让多个连接在以太网上的用户共享一条到ISP的宽带链路。现在,即使是只有一个用户利用ADSL进行宽带上网(并不和其他人共享到ISP的宽带链路),也是使用PPPoE协议。

3.3.4 HDLC与PPP协议的区别

上面分别介绍了HDLC协议和PPP协议,可以看到,HDLC协议是一个面向比特型协议,而PPP是面向字符型协议,两者应用于不同的场合。为了让读者更清楚地了解这两个协议的共同点和不同点,下面特别进行比较说明。

(1) 帧格式。两个协议的帧格式基本相同,但PPP比HDLC多了协议字段(2B),可支持上层不同的协议。

(2) 寻址方式。HDLC具备多点寻址功能,PPP则是点对点协议,只能是两点之间的通信。

(3) 来源与应用。HDLC是由ITU(国际电信联盟)制定,主要用在传统电信网络线路及设备上。PPP由IETF(因特网工程任务组)制定,主要用在Internet上。

(4) 确认机制。HDLC具有捎带确认功能,PPP不提供使用序号和确认的可靠传输,因此PPP用于线路状况较好的传输线路。

(5) 协议复杂性和安全性。PPP比HDLC具有更复杂的控制机制,如可以鉴别身份,其安全性更高。

(6) 实现功能。PPP功能更多,支持数据压缩、动态地址协商和多链路捆绑等功能。

(7) 协议特征。HDLC是面向比特的;PPP则是面向字符的(同步方式时,如SDH,也可面向比特),因而所有PPP帧长都是整数字节。当PPP帧信息字段出现和标志字段一样的0x7E时,就必须采取以下措施。

① 将信息字段中出现的每一个0x7E转变成2B序列(0x7D、0x5E)。

② 若出现0x7D时,则转变成2B序列(0x7D、0x5D)。

③ 若出现ASCII的控制字符,则在字符前加入0x7D,以防被理解为控制字符。

3.4 广域网的连接类型

3.4.1 WAN 的交换方式

1. 电路交换

电路交换(Circuit Switching)方式与电话交换方式的工作过程类似。两台计算机通过广域网进行数据交换之前,首先要在广域网中建立一个实际的物理线路连接。电路交换方式的通信过程分为线路建立、数据传输与线路释放 3 个阶段。

在电路交换方式中,广域网的交换结点使用交换设备来完成输入与输出线路的物理连接。交换设备与线路分为模拟通信与数字通信两类。在线路连接过程完成之后,两台计算机之间已建立的物理线路连接为此次通信专用。广域网中的结点交换设备不能存储数据,不能改变数据内容,并且不具备差错控制能力。

电路交换的优点是,通信的实时性强,适用于交互式会话类通信。电路交换方式的缺点是,对突发性通信不适应,系统效率低;系统不具备存储转发能力,不能平滑通信量;系统不具备差错控制能力,无法发现与纠正传输过程中发生的数据差错。

2. 报文交换

报文交换方式不要求在两个通信结点之间建立专用通路。结点把要发送的信息组织成一个数据包——报文,该报文中含有目的结点的地址,完整的报文在网络一站一站地向前传送。每一个结点接收整个报文,检查目的结点的地址,然后根据网络中的通信情况在适当的时候转发到下一结点。经过多次的存储→转发,最后到达目的结点的地址,因而这样的网络称为存储转发网络。其中的交换结点要有足够大的存储空间,用以缓冲收到的长报文。交换结点对各个方向上收到的报文排队,寻找下一个转发结点,然后再转发出去,这些都带来了排队等待延迟。报文交换的优点是,不用建立专用链路,线路的利用率较高,这是由通信中的等待时延换来的。

3. 分组交换

在分组交换方式中数据包有固定的长度,因而交换结点只要在内存中开辟一个小的缓冲区就可以了。进行分组交换时,发送结点要对传送的信息分组,对各分组编号,加上源地址和目的地址及约定的分组头信息,这个过程称为信息的打包。一次通信中的所有分组在网络中传播又有两种方式,一种是数据报(Datagram),另一种是虚电路(Virtual Circuit)。

(1) 数据报。数据报类似于报文交换,每个分组在网络中的传播路径完全是由网络当时的状况随机决定的。因为每个分组有完整的地址信息,如果不出意外都可以到达目的地。但是到达目的地的顺序可能与发送的顺序不一致。有些早发的分组可能在中间某个交通拥挤的链路上耽搁了,比后发的分组到得迟,目标计算机必须对收到的分组重新进行排序才能恢复原来的信息。

(2) 虚电路。虚电路类似于电路交换,这种方式要求在发送端和接收端之间建立一条逻辑连接。在会话开始时,发送端首先发送建立连接的请求信息,这个请求信息在网络中传输,途中的各个交换结点根据当时的交通状况决定去哪条线路来响应这一请求,最后到达目的端。如果目的端给予了肯定回答,则逻辑连接就建立了。以后发送端发出的一系列分组

都通过这同一条通路,直到会话结束,拆除连接。与电路交换不同的是,逻辑连接的建立并不意味着其他的通信不能使用这条线路,它仍然具有链路共享的优点。

3.4.2 WAN的连接类型

WAN有专用连接(也称专线连接)、电路交换连接、分组交换连接3种连接类型,如图3-16所示。

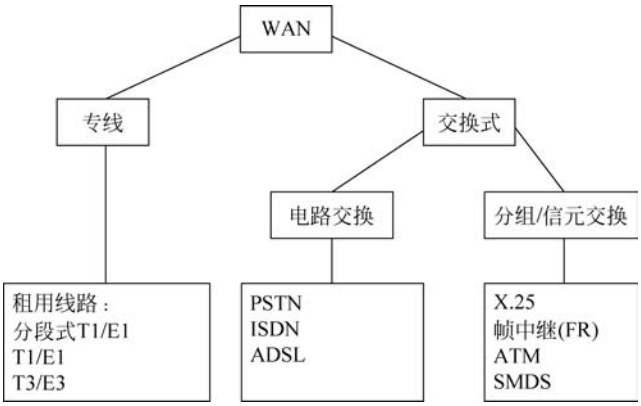

图3-16 WAN的连接类型

1. 专线连接

专线连接是一种租用线路的方式,提供全天候服务。专线通常提供主要网站或园区间的核心连接或主干网络连接,以及LAN对LAN的连接。主要的传输速率包括T1(1.544Mb/s,北美标准)、E1(2.048Mb/s,欧洲标准)、T3(44.736Mb/s,北美标准)、E3(34.064Mb/s,欧洲标准)等。我国采用的是欧洲标准。其中每一种典型速率可以划分信道,每个信道的带宽为64kb/s,带宽可以64kb/s为单位进行组合。

专线也称为点到点链路,因为其建立的路径对于通过电信设备到达的每个远程结点而言都是永久且固定的。点到点链路提供了单一而预先建立的WAN通信路径,此路径是从用户所在地服务提供商的电信网络到远程网络,并且服务提供商时刻保留着这些点到点链路供用户专用。专线连接的专用特性使企业能够最大限度地控制其广域网连接。由于专线能够提供T3和E3级别甚至更高级别的连接速率,因此专线非常适用于大量的数据传输、数据流量较为稳定的高容量环境。因为专线是非共享的,而且价格一般都比较高。连接大量的分支网络结点时,专线方案的成本会比较高。如何充分合理地利用可用带宽是一个重要问题,因为当线路闲置时用户仍需支付线路的费用。因此专线连接一般适合长时间、较短距离的连接。

2. 电路交换连接

电路交换连接的每个通信会话阶段的专属的物理电路都是通过电信运营商的网络建立、维护和终止的。电路交换是服务提供商提供基本的电话服务(PSTN)和综合业务数字网(ISDN)。

电路交换连接在需要时才建立,一般而言所需的带宽较低。基本的电话服务连接通常限制在无数据压缩的28.8kb/s,而ISDN连接则限制为64kb/s或128kb/s。电路交换连接

主要用来进行远程使用者及移动电话使用者与公司 LAN 之间的连接，它们也可以作为帧中继或专线等高速电路的备份链路。

3. 分组交换连接

分组交换连接提供给网络管理员的控制权限比点到点要少，而且网络带宽也是共享的。但分组交换（虚电路）提供了类似专线的网络服务，并且其服务费用的开销一般要比专线低。速率可以从 56kb/s 到 T3（或 E3）或者更高。当 WAN 的连接速率与专线的速率比较接近时，分组交换连接适用于对链路使用率有较高要求的网络应用环境，同时适用于较长时间连接、较大地域范围的应用场合。

3.5 广域网通信网的基础网络

3.5.1 公共电话交换网（PSTN）

公共电话交换网（Public Switch Telephone Network，PSTN）最初是为了语音通信而建立的，从 20 世纪 60 年代开始又用于数据传输。虽然各种专用的计算机网络和公用数据网近年来得到很大的发展，能够提供更好的服务质量和多种多样的通信服务，但是 PSTN 的覆盖面更广，联网费用更低廉，因而在接入网早期的应用中（20 世纪 90 年代）许多用户仍然通过电话线拨号上网。

电话系统是一个高度冗余的分级网络。图 3-17 所示的是一个简化的电话系统结构。用户电话通过一对铜线连接到最近的端局，距离为 1～10km，并且只能传输模拟信号。虽然局间干线是传输数字信号的光纤，但是在电话线联网时需要在发送端把数字信号变为模拟信号，在接收端把模拟信号转换为数字信号。由电话公司提供的公共载体典型的带宽为 300～3400Hz，称为语音频段信道。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要采取一定的均衡措施，以便来减少传输过程中的失真。

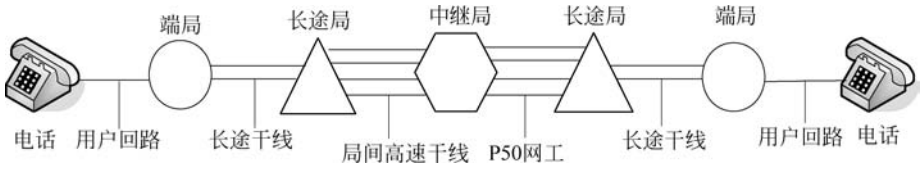

图 3-17 简化的电话系统结构

公用电话网由本地网和长途网组成，本地网覆盖市内电话、市郊电话及周围城镇和农村的电话用户，形成属于同一个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四级汇接辐射式结构。最高一级共有 8 个大区中心，包括北京、上海、广州、南京、沈阳、西安、武汉和成都。这些中心局互相连接，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 3-18 所示的四级汇接辐射式长话结构。

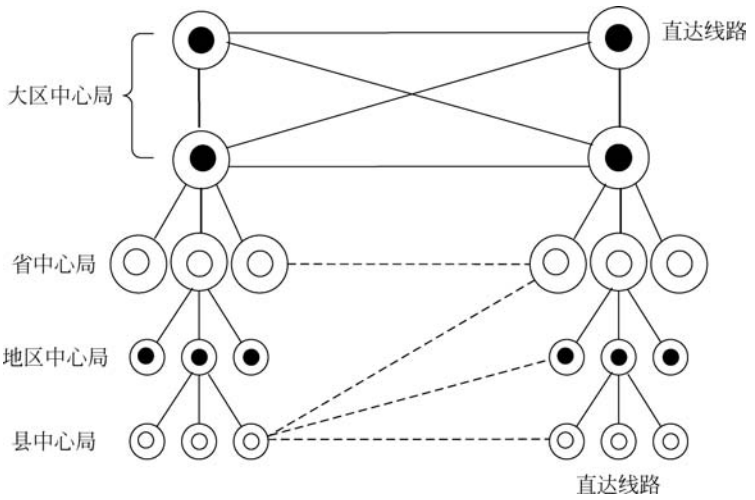

图 3-18　四级汇接辐射式长话结构

3.5.2　公用数据网(X.25)

1. X.25 网的基本概念

X.25 网出现于 1974 年,它是一种典型的公共分组交换网。当时的传输线路噪声干扰大、误码率高、传输效率低,通信质量不好。考虑到当时的传输线路条件,X.25 网的协议在设计时重点解决了差错控制、流量控制、拥塞控制等问题,因此带来的问题就是协议复杂。

公共分组交换网在一些国家是由政府部门组建和运营的,而在另一些国家由通信公司来组建和运营。不同的公共分组交换网内部有很大的差别,但它们对外部用户提供的接口都是采用国际标准,即 CCITT 提出的 X.25 建议,也称为 X.25 协议。X.25 建议只规定了以分组方式工作的 DTE 与 DCE 之间接口标准,因此不同的 X.25 网之间的互联是困难的。

早期,很多国家和地区都组建了 X.25 网。典型的公共分组交换网有 TELNET、DATAPAC、TRANSPAC 等。1989 年中国的公共分组交换网 CHINAPAC 开通并投入使用。

2. X.25 协议的层次结构

X.25 网是指采用 X.25 建议规定 DTE 与 DCE 接口标准组建的公共分组交换网。X.25 网传输速率比较低,一般为 64kb/s。图 3-19 给出了 X.25 网的结构示意图。

X.25 协议由 3 个层次组成:物理级、数据链路级和网络级。它们分别对应 OSI 参考模型的低 3 层。X.25 的物理级采用 ITU-T 专门制定的 X.21 协议。X.21 协议与早期的物理层协议(如 EIR-232)很类似,因此 X.25 的物理级也支持 EIR-232 协议。

X.25 协议的数据链路级采用平衡链路接入规程 LAPB。LAPB 采用了高级数据链路控制规程(HDLC)的帧结构,并且是它的一个子集。LAPB 帧中的控制字段 C 用于 X.25 网的数据链路级的差错控制与流量控制;地址字段 A 用于建立数据链路连接;帧校验字段 FCS 用于 CRC 校验。

ITU-T 专门为 X.25 的网络级规定了分组层协议(PLP)。分组层协议负责为 DCE 与 DTE 建立连接、数据包传输与释放连接。由于早期的 X.25 协议只支持数据报工作方式,随

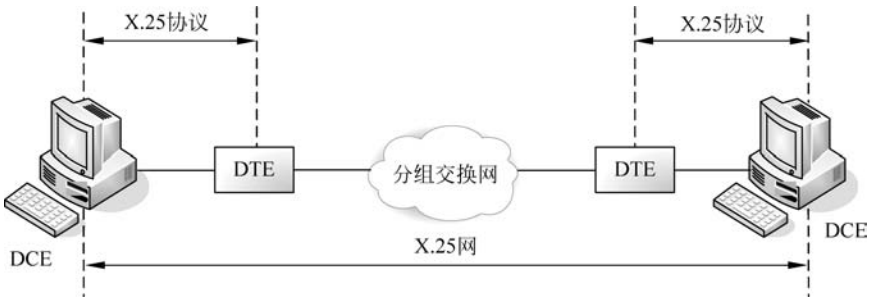

图 3-19　X.25 网的结构示意图

着分组交换技术的发展，X.25 协议支持在两个需要进行通信的 DTE 之间建立永久虚电路。X.25 分组级中主要有关于虚电路的逻辑信道组号、逻辑信道号字段与控制字段。控制字段完成网络层的差错控制和流量控制功能。图 3-20 给出了 X.25 协议层次结构示意图。

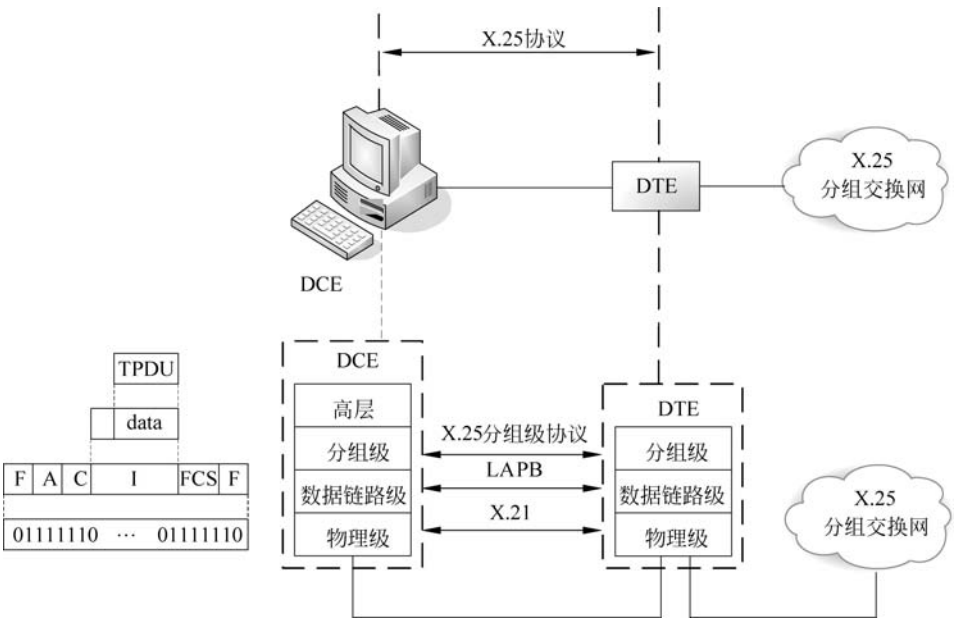

图 3-20　X.25 协议层次结构示意图

3.5.3　帧中继网

1. 帧中继技术发展的背景

随着计算机通信技术的不断发展，数据通信的环境和联网需求也在不断发生变化，这种变化主要表现在以下几方面。

（1）传输介质由原来的电缆逐步发展到光纤，光纤的误码率很低，数据传输速率很高。

（2）局域网的数据传输速率提高很快，多个局域网之间的高速互联需求越来越强烈。

（3）用户设备（如微型计算机）性能大大提高，主机可以承担一部分原来是由通信子网承担的通信处理功能。

传统的分组交换网 X.25 协议是建立在原有的速率较低、误码率较高的电缆传输介质

之上的。为了保证数据传输的可靠性,X.25协议包含了差错控制、流量控制、拥塞控制等功能。X.25协议执行过程复杂,这必然增大了网络传输的时延,降低数据传输的服务质量。显然,这种传统的网络通信协议与机制不能适应局域网高速互联的需求。针对这种情况,人们提出了一种建议,在数据传输率高、误码率低的光纤上,使用简单的协议以减少网络传输时延,将必要的差错控制功能交给用户设备来完成,这就产生了帧中继技术。

1991年,第一个帧中继网在美国问世,它可以提供1.544Mb/s的数据传输速率,目前,世界各地仍然有很多电信运营商在提供帧中继服务。

2. 帧中继基本工作原理

帧中继是一种典型的采用虚电路的广域网技术。帧中继的工作原理是建立在帧在光纤上传输基本不会出错的前提之上的。帧中继工作在物理层和数据链路层,流量控制与纠错功能由高层协议完成,具有协议简单、高效、网络吞吐量高、时延短、适应于突发通信的特点。

帧中继交换机只要检测到帧的目的地址,就开始转发该帧,也就是说,一个结点在收到帧的首部之后,就立即开始转发帧。在传统的X.25网中,分组通过每个结点时大约要进行30次差错检测,以及其他的各种处理操作。在一个帧中继网络中,一个帧通过每个结点时大约需6个检测步骤,这将明显减少帧通过结点的时延。实验结果表明,在采用帧中继技术时,每个帧的处理时间比X.25网减少一个数量级。

帧中继差错处理方法是,检测到有差错的结点就要立即终止这次传输,当终止传输的指示到达下一个结点后,下一个结点就立即终止该帧的传输,最后该帧就会在网络中消除。在采用这种终止传输方式时,即使出错的帧已到达目的结点,也不会引起不可弥补的损失。源结点可以利用高层协议来请求重发该帧。

3. 帧中继的虚拟租用线路服务方式

帧中继的设计目标主要是针对局域网之间的互联,它以面向连接的方式、合理传输速率与低廉的价格提供数据通信服务。

帧中继的主要思想是提供“虚拟租用线路”服务,实际的租用线路(专线)与虚拟租用线路是不同的。如果用户希望将两个远程局域网互联起来,可以通过租用一条线路来实现。但是,对于计算机的突发通信来说,不可能在租用期间一直以最高传输速率在线路上传输数据。租用专线的费用比较高,但是线路的利用率并不高。同时,如果一个局域网希望和多个远程局域网互联,这时就需要租用多条线路。由于帧中继采用“帧”作为数据传输单元,网络的带宽根据用户的需要,可以采用统计复用的方式来动态分配。因此,帧中继的线路利用率高,用户费用相对较低,用户可以在多个局域网之间使用多条虚电路。

4. 帧中继的带宽管理

帧中继是统计复用协议,实现了带宽资源的动态分配,因此它适合为具有大量突发数据(如LAN)的用户提供服务。但如果某一时刻所有用户的数据流量之和超过可用的物理带宽时,帧中继网络就要实施带宽管理。它通过为用户分配带宽控制参数,对每条虚电路上传送的用户信息进行监视和控制。

帧中继网络为每个帧中继用户分配3个带宽控制参数:Bc、Be和CIR。同时,每隔Tc时间间隔对虚电路上的数据流量进行监视和控制。CIR是网络与用户约定的用户信息传输速率,即承诺信息速率。如果用户以小于或等于CIR的速率传送信息,应保证这部分信息的传送。Bc是网络允许用户以CIR速率在Tc时间间隔传送的数据量,即Tc=Bc/CIR。

Be 是网络允许用户在 Tc 时间间隔内传送的超过 Bc 的数据量。

网络对每条虚电路进行带宽控制，采用如下策略。

在 Tc 内：

(1) 当用户数据传送量≤Bc 时，继续传送收到的帧。

(2) 当用户数据传送量＞Bc 但≤Bc＋Be 时，将 Be 范围内传送的帧的 DE 比特置“1”，若网络未发生严重拥塞时，则继续传送，否则将这些帧丢弃。

(3) 当用户数据传送量＞Bc＋Be 时，将超过范围的帧丢弃。

例如，如果约定一条永久虚电路(Permanent Virtual Circuits，PVC)的 CIR＝128kb/s，Bc＝128kb，Be＝64kb，则 Tc＝Bc/CIR＝1s。在这一段时间内，用户可以传送的突发数据量可达到 Bc＋Be＝192kb，传送数据的平均速率为 192kb/s，其中，正常情况下，Bc 范围内出现拥塞时，这些帧也会被送达终点用户，若发生了严重拥塞，这些帧才会被丢弃。Be 范围内的 64kb 帧的 DE 比特被置“1”，在无拥塞的情况下，这些帧会被送达终点用户，若发生拥塞，则这些帧会被丢弃。

对 X.25 网与帧中继进行比较后，可以看到以下 3 点区别。

(1) X.25 协议包括物理层、数据链路层与网络层；而帧中继协议只有物理层、数据链路层，而没有网络层。

(2) X.25 协议有比较完备的差错控制、流量控制机制，而帧中继协议只有有限的差错控制，而没有流量控制，流量控制由高层协议提供。

(3) X.25 协议只能提供数据报和虚电路服务，而帧中继协议可以提供虚拟专网(VPN)服务。

帧中继网可以减少局域网互联的代价，提高服务的性能，适用于大数据量的文件与多媒体数据传输，因此当它出现不久便获得很大的发展。但是帧中继支持 56kb/s～2Mb/s 传输速率，最高可以达到 45Mb/s，因此在组建宽带广域网的主干网时受到一定的限制。

3.5.4 综合业务数字网(ISDN)

1. ISDN 的基本概念

综合业务数字网(Integrated Services Digital Network，ISDN)是自 20 世纪 70 年代发展起来的技术，它提供从终端用户到终端用户的全数字化服务，实现了语音、数据、图形、视频等综合业务的一个全数字化传输方式。与后来提出的宽带(Broadband)ISDN，即 B-ISDN 相对应，因此传统的 ISDN 又称为窄带(Narrowband)ISDN，即 N-ISDN，简称 ISDN。

ISDN 不同于传统的 PSTN 网络。传统的 PSTN 网络中，用户的信息通过模拟的用户环路送至交换机后成为数字信号，经过数字交换和传输网络后到达目的用户，又将还原为模拟信号。ISDN 解决了用户环路的数字传输问题，实现了端到端的数字化传输，并通过这个标准的数字接口，解决各种数字和模拟信息的传递。对于用户而言，同样的一对普通电话线原来只能接一部电话机，而申请了 ISDN 后，通过一个称为 NT 的转化盒，就可以同时使用多个终端。

ISDN 又称“一线通”，即可以在一条线路上同时传输语音和数据，用户打电话和上网可同时进行。ISDN 的出现，对 Internet 的接入产生了较大的影响，极大地加快了 Internet 在

我国的普及和推广速度。

2. ISDN的组成

ISDN的组成包括终端、终端适配器(TA)、网络终端设备(NT)、线路终端设备和交换终端设备。如图3-21所示,ISDN终端分为标准ISDN终端(TE1)和非标准ISDN终端(TE2)。TE1通过4根数字线路连接到ISDN网络。TE2连接ISDN网络要通过TA。网络终端也分为网络终端1(NT1)和网络终端2(NT2)两种类型。图3-21中,R、S、T、U等是ISDN组件之间的连接点,称为ISDN参考点。

(1) 标准ISDN终端(TE1):TE1是符合ISDN接口标准的用户设备,如数字电话机、G4传真机、可视电话终端、带ISDN接口的路由器等,接入S/T参考点。

(2) 非标准ISDN终端(TE2):TE2是不符合ISDN接口标准的用户设备,TE2需要经过终端适配器(TA)的转换,才能接入R参考点。

(3) 终端适配器(TA):TA完成适配功能,包括速率适配和协议转换等,使TE2能够接入ISDN。

(4) 网络终端1(NT1):NT1是放置在用户处的物理和电器终端装置,属于网络服务提供商的设备,是网络的边界。通过U参考点接入网络,采用双绞线,距离可达1000m。

(5) 网络终端2(NT2):NT2又称为智能网络终端,如数字PBX、集中器等。它可以完成交换和集中的功能,通过T参考点接入NT1。T参考点采用4线电缆。如果没有NT2,此时S和T可以合在一起,称为S/T参考点。

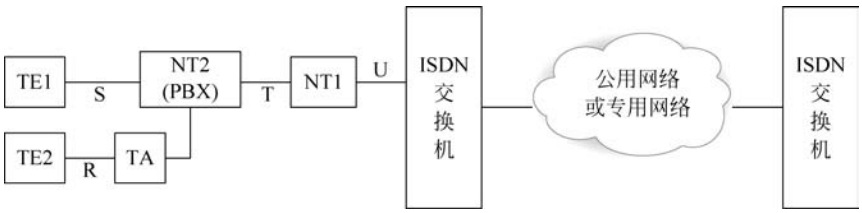

图3-21 ISDN的基本组成

3. ISDN模型及访问接口类型

1) ISDN模型

ISDN是由ITU-T制定的一组跨越OSI模型的物理层、数据链路层、网络层的标准。

(1) 物理层:在ITU-T的I.430中定义了对ISDN基本速率接口(BRI)的物理层规范。在ITU-T的I.431中定义了对ISDN基群速率接口(PRI)的物理层规范。

(2) 数据链路层:ISDN的数据链路层规范是以LAPD为基础的,在ITU-T的Q.920和ITU-T Q.921中做了正式的描述。

(3) 网络层:ISDN网络层是在ITU-T Q.930和Q.931中定义的。这两个标准结合在一起,描述了用户到用户、电路交换和数据报交换连接的规范。

2) ISDN访问接口类型

访问接口是用户与ISDN服务提供商之间的物理连接。目前有两种不同的访问接口被ITU-T的ISDN协议所定义。它们分别称为基本速率接口(BRI)和基群速率接口(PRI)。

B信道是ISDN的业务承载信道,通常以数据帧的形式传输语音或数据。而D信道是ISDN的带外信令信道,主要用于传输电路交换的信令信息,还可以用于传输分组交换

数据。

(1) 基本速率接口 BRI。ISDN BRI 服务提供两个 64kb/s 的 B 信道和一个 16kb/s 的 D 信道,通常表示为 2B+D。

ISDN BRI 规定如下。

① 两条 64kb/s 承载信道(B 信道)和一条 16kb/s 的信令信道(D 信道)服务。

② 以 48kb/s 的速率编帧和同步。

③ 总速率包括两条 64kb/s 的 B 信道(合计 128kb/s)和一条 16kb/s 的 D 信道,加上 48kb/s 的编帧和同步,总和为 192kb/s(128+16+48=192)。

ISDN 网络设计者提供了极大弹性,因为它可以使用两个 B 信道,并且分别传输语音和数据,D 信道用来传送指令以告知电话网络如何处理每一个 B 信道。BRI D 信道的速率为 16kb/s,并且仅能传输控制和信号信息,但是它在某些情况下可以传送数据信息。

(2) 基群速率接口 PRI。ISDN PRI 规定如下。

① 23 条或 30 条 64kb/s 的 B 信道。

② 一条 64kb/s 的 D 信道。

③ 编帧和同步占用 8kb/s(北美 T1 标准)或 64kb/s(欧洲 E1 标准)。

④ 总速率为 1.544Mb/s(T1)或 2.048Mb/s(E1)。

在美国和日本一般使用 T1 信号标准。ISDN PRI 服务提供 23 条 B 信道和一条 D 信道,外加一个编帧和同步信道,所产生的接口总速率为 1.544Mb/s。

在欧洲、澳洲、中国和其他国家,一般使用 E1 的信号标准。它是对应于北美使用的 T1 标准的。ISDN PRI 提供 30 条 B 信道、一条 D 信道,再加一条帧编码控制信道,其接口速率为 2.048Mb/s。

4. ISDN 的应用

除了电话、可视图文、用户电报、可视电话等业务外,ISDN 主要用于接入 Internet。个人用户使用 Internet 接入这项业务主要是利用 ISDN 的远程接入功能,接入时采用拨号方式。企业用户则可以使用 ISDN 作为备份线路,如远程办公室和中心办公室之间的备份线路,这样不但可以防止断线,同时还可以分担主干线路的数据流量。

3.5.5 异步传输模式(ATM)

1. ATM 的基本概念

针对前面的 N-ISDN 的不足,提出了一种高速传输网络,这就是宽带 ISDN(Broadband-ISDN,B-ISDN)。B-ISDN 的设计目标是以光纤为传输介质,以提供远远大于基群速率的传输信道,并针对不同的业务采用相同的交换方法,即致力于真正做到用统一的方式来支持不同的业务。为此,异步传输模式(Asynchronous Transfer Mode,ATM)被提了出来。现在 ATM 作为关键技术被保留了下来并成为高速广域网传输技术的基础。

ATM 技术综合了电路交换的可靠性与分组交换的高效性,借鉴了两种交换方式的优点,采用了基于信元的统计时分复用技术。

信元(Cell)是 ATM 用于传输信息的基本单元,其采用 53 字节的固定长度。其中,前 5 字节为信头,载有信元的地址信息和其他一些控制信息,后 48 字节为信息字段,装载来自各种不同业务的用户信息。固定长度的短信元可以充分利用信道的空闲带宽。信元在统计

时分复用的时隙中出现,即不采用固定时隙,而是按需分配,只要时隙空闲,任何允许发送的单元都能占用。所有信元在底层采用面向连接方式传输,并对信元交换采用硬件实现并行处理,减少了结点的时延,其交换速度远远超过总线结构的交换机。

2. ATM网络的组成和主要特点

ATM网络系统由ATM业务终端、复用、交换机、传输等部分组成,其结构如图3-22所示。

图3-22 ATM网络的结构

其中,ATM交换机是ATM网络的核心,它采用面向连接的方式实现信元的交换。

ATM主要特点如下。

(1) ATM是以面向连接的方式工作的,大大降低了信元丢失率,保证了传输的可靠性。

(2) 由于ATM的物理线路使用光纤,误码率很低。

(3) 短小的信元结构使得ATM信头的功能被简化,并使信头的处理能基于硬件实现,从而大大减少了处理时延。

(4) 采用短信元作为数据传输单位可以充分利用信道空闲,提高了带宽利用率。总之,ATM的高可靠性和高带宽使得其能有效地传输不同类型的信息,如数字化的声音、数据、图像等。

目前,ATM论坛定义的物理层接口有SDH STM-1、SDH STM-4、SDH STM-16,其数据传输速率分别可达155.52Mb/s、662.08Mb/s、2488.32Mb/s。对应于不同信息类型的传输特性,如可靠性、延迟特性和损耗特性等,ATM可以提供不同的服务质量来适应这些差别。

3. ATM在广域网主干网中的应用

ATM技术在保证传输的实时性与QoS方面的优势是20世纪90年代传输网络技术的一个重要突破。但是它没有像设计者预期的那样,将取代广域网、城域网和局域网,甚至取代电信网,成为"一统天下"的网络技术,其原因也很简单,一是造价和使用费用昂贵,二是它的协议与已经广泛流行的IP协议、IEEE 802.3协议不一致。用异构、造价昂贵的ATM技术去取代计算机网络和电信网络是不现实的,而与IP网络紧密结合,各自发挥自己的特长是一条可行之路。因此,20世纪90年代中期ATM网络广泛应用于广域网,成为Internet的核心交换网的一个重要组成部分。

3.5.6 数字数据网(DDN)

数字数据网(Digital Data Network,DDN)是利用数字信道传输数据信号的数据传输网,它主要向用户提供端到端的数字型数据传输信道。它基于同步时分复用、电路交换的基本原理实现,既可以用于计算机远程通信,也可以传送数字化传真、数字语音、图像等各种数字化业务。

因为原有通信网的模拟信道主要是为传输语音信号而设置的,它通信效率低、可靠性差,很难满足日益增长的计算机通信用户和其他数字传输用户的要求。所以,DDN利用数

字信道传输数据信号与传统的利用模拟信道相比，具有传输质量高、速率快、带宽利用率高等一系列优点。

DDN 向用户提供的是半永久性的数字连接，沿途不进行复杂的软件处理，因此延时较短。DDN 半永久性连接是指 DDN 提供的信道是非交换型的，用户可以提供申请，在网络允许的情况下，由网络管理人员对用户提出的传输速率、传输数据的目的地和传输路由器进行修改。

DDN 能够利用的传输媒介有光缆、数字微波、卫星信道及双绞线。目前 DDN 能够提供的业务有：提供 2.4、4.8、9.6、19.2、$n\times64$kb/s($n=1\sim31$)等不同速率的点对点、点对多点的通信，提供各种可用度高、延时小、定时、多点等专用电路服务，此外还可提供帧中继、语音/G3 传真及虚拟专用网等服务。

DDN 的网络结构一般由数字传输电路和相应的数字交叉连接复用设备组成。数字传输电路主要以光缆传输为主，数字交叉连接设备对数字电路进行半固定交叉连接和子速率的复用。

接入 DDN 网的用户端设备称为数据终端设备(DTE)，可以是局域网，通过路由器连接至对端，也可以是一般的异步终端或图像设备，以及传真机、电传机、电话机等。DTE 与 DTE 之间是全透明传输。

我国公用 DDN 骨干网可以提供局间的物理传输通路，其传输速率为 64kb/s 和 9.6kb/s，其接口标准应符合 ITU-T G.703、V.24、V.35、X.21 等协议。

目前，随着光通信技术的日益发展，采用光骨干网甚至光纤直接接入用户的接入技术越来越普遍，传统的采用两芯电缆(类似电话线)的 DDN 接入被应用得越来越少，但是，DDN 技术的思想被光通信技术普遍继承，其技术实现几乎和传统的 DDN 技术如出一辙，所以，如今也将很多光接入继续归纳为 DDN 的范畴，可以说这是 DDN 技术的新发展。

传统的以两芯电缆接入的 DDN 技术目前应用已经很少，可为企业提供光通信无法提供的低于 2Mb/s 带宽的广域网接入。尽管 DDN 也可以提供 Internet 的接入能力，但是一般还是只把它作为 Intranet 的接入技术来使用。

DDN 专线技术已经发展了很多年，在我国，它的鼎盛时期在 20 世纪 90 年代，随着新的接入技术的出现，DDN 技术已经有些过时。但是在特殊情况下，偶尔还会应用 DDN 技术，尤其是在建立带宽小于 2Mb/s 的 Intranet 专线时。

3.5.7 同步光纤网(SONET)和同步数字体系(SDH)

1. SONET 和 SDH 的发展过程

在光纤使用的早期，每个电话公司都有自己私有的光纤 TDM 系统，并且各个 TDM 标准不同。B-ISDN 是以光纤作为其传输干线的，实现 B-ISDN 的重要问题是对传输速率进行标准化。1988 年，美国国家标准 ANSI 的 T1.105 和 T1.106 定义了光纤传输系统的线路速率等级，即同步光纤网(Synchronous Optical Network，SONET)标准。SONET 定义了 4 个光接口层：光子层(Photonic Layer)、数字断层(Section Layer)、线路层(Line Layer)与路径层(Path Layer)，同时定义了从 51.840～2488.320Mb/s 的传输速率标准体系，其基本速率(Synchronous Transport Signal-1，STS-1)是 51.840Mb/s。同步网络的各级时钟都来自一个精度为 $\pm1\times10^{-11}$ 量级的铯原子钟。

ITU-T在SONET的基础上制定出同步数字体系(Synchronous Digital Hierarchy,SDH)的国际标准。SDH标准不仅适用于光纤传输系统,也适用于微波与卫星传输体系。SONET/SDH标准已被推荐为B-ISDN的物理协议,也是新一代理想的传输网体系。

SONET和SDH的发展经历了以下3个过程。

(1) SONET的概念由美国贝尔通信研究所在1985年首先提出。设计SONET的目的是解决光接口标准规范问题,定义同步传输的线路速率的等级体系,以便不同厂家的产品可以互联,从而能够建立大型的光纤网络

(2) 1986年,CCITT(现ITU-T)接受了SONET的概念,并于1986年7月成立了第18研究组,开始了同步数字体系SDH的研究工作,使它成为通用性技术体制。

(3) 1988年ITU-T第18研究组通过了有关SDH的3个建议,并在1989年ITU-T的蓝皮书上正式登载,它们是G.707(同步数字体系的比特速率)、G.708(同步数字体系的网络结点接口)、G.709(同步复用结构),对SDH的速率、复用帧结构、复用设备、线路系统、光接口、网络管理和信息模型等进行了定义,从而确立了作为国际标准的SDH。1992年,ITU-T又增加了十几个建议书,从而出现了国际统一的通信传输体制与速率、接口标准。

2. 基本速率标准制定

在数据通信研究的初期曾经出现多种速率标准,有的目前仍然在使用。在系统讨论SDH速率之前需要回顾一下这些标准制定的条件和背景。

(1) T1载波速率。T1载波速率是针对脉冲编码调制PCM的时分多路复用TDM设计的。北美的T1系统将24路音频信道复用在一条通信线路上。每路音频模拟信号通过PCM编码器时,编码器每秒钟采样8000次。24路PCM信号轮流将1B(8b)插入到帧中,其中1B中7b为数据位,1b为信道控制。

那么,每帧由24×8=192b组成,附加1b作为帧开始标志,因此每帧共有193b,发送一帧需要时间为125μs。T1载波的数据传输速率为

$$T1=(24\times 8+1)/125\times 10^{6}=1.544\text{Mb/s}$$

(2) E1载波速率。由于历史原因,脉冲编码调制PCM除了北美的24路T1载波外,还存在着另一个不兼容的速率标准,即欧洲的30路PCM的E1载波(E1 Carrier),也称为E1的一次群速率。

E1的标准是CCITT标准。E1标准将30路音频信道和两路的控制信道复用在一条通信线路上。在一帧中每个信道插入1B(8b),这样一帧要传输的数据总共为256b(32×8b)。传送一帧的时间为125μs。E1载波的数据传输速率为

$$E1=(32\times 8)/125\times 10^{6}=2.048\text{Mb/s}$$

(3) STM-1速率。STM-1帧是一个块状结构,每行270B,共9行,每秒钟发送8000帧。因此,STM-1的传输速率为

$$\text{STM-1}=(270\times 9\times 8)/125\times 10^{6}=155.520\text{Mb/s}$$

3. SDH速率体系

在实际使用中,SDH速率体系涉及3种速率,即SONET的STS与OC速率标准,以及SDH的STM标准,如表3-8所示。它们之间的区别有以下几点。

表 3-8　SONET 的 STS 级、OC 级与 SDH 的 STM 级的速率对应关系

SONET		SDH	数据传输速率 (Mb/s)
电　子　的	光　　的	光　　的	
STS-1	OC-1		51.84
STS-3	OC-3	STM-1	155.52
STS-9	OC-9	STM-2	466.56
STS-12	OC-12	STM-4	622.08
STS-18	OC-18	STM-6	933.12
STS-24	OC-24	STM-8	1244.16
STS-36	OC-36	STM-12	1866.24
STS-48	OC-48	STM-16	2488.32
STS-192	OC-192	STM-64	9953.28

(1) STS 定义的是数字电路接口的电信号传输速率。

(2) OC 定义的是光纤上传输的光信号速率。

(3) STM 标准是电话公司为国家之间的主干线路的数字信号规定的速率标准。

STS-1 对应的是 810 路语音电话线路。依次类推，STS-3 对应 2430 路，STM-12 对应 9720 路，STS-24 对应 19440 路，STS-48 对应 38880 路。

1988 年，美国国家标准协会 ANSI 通过了最早的两个 SONET 的标准，即 ANSI T1.105 与 ANSI T1.106。T1.105 为使用光纤传输系统定义了线路速率标准的等级结构，它是以 51.840Mb/s 为基础的，大致对应于 T3、E3 的速率，称为第一级同步传输信号 STS-1，其对应的光信号称为第一级光载波(Optical Carrier-1，OC-1)，并定义了 8 个 OC 级速率。T1.106 定义了光接口标准，以便实现光接口的标准化。

SDH 信号中最基本的模块是 STM-1，其速率为 155.52Mb/s。更高等级的 STM-n 是将 STM-1 同步复用而成。4 个 STM-1 构成 1 个 STM-4(622.08Mb/s)，16 个 STM-1 构成一个 STM-16(2488.32Mb/s，即 2.5Gb/s)，64 个 STM-1 构成一个 STM-64(10Gb/s，相当于 12 万条话路)。

4. SDH 网络拓扑结构与自愈环结构

1) SDH 网络拓扑结构

按照计算机网络对拓扑的定义，应用 SDH 技术组建的网络包括链状、星状、环状与网状拓扑结构。树状拓扑结构可以由星状结构级联而成。

(1) 链状拓扑结构。链状拓扑结构如图 3-23 所示。在链状拓扑结构中，所有转发器串联。这种拓扑结构的优点是结构简单、经济，在 SDH 网的早期用得比较多，主要用于专网。

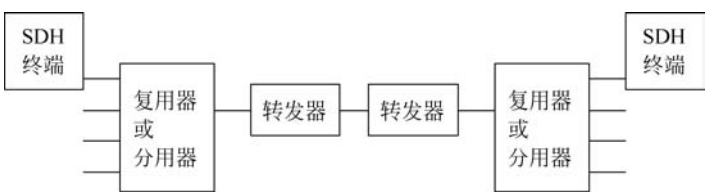

图 3-23　链状拓扑结构

(2) 星状拓扑结构。星状拓扑结构如图 3-24 所示。在星状拓扑结构中,有一个转发器的位置处于中心,其他转发器都与它连接。这种拓扑结构的优点是结构简单,但是中心转发器是 SDH 网的安全与性能瓶颈。星状拓扑结构主要用于接入网。

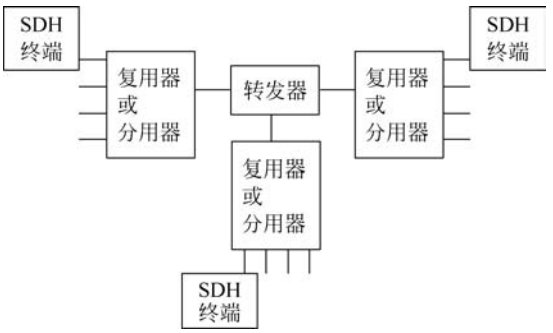

图 3-24　星状拓扑结构

(3) 环状拓扑结构。环状拓扑结构如图 3-25 所示。在环状拓扑结构中转发器首尾相连,构成一个闭合的环状结构。

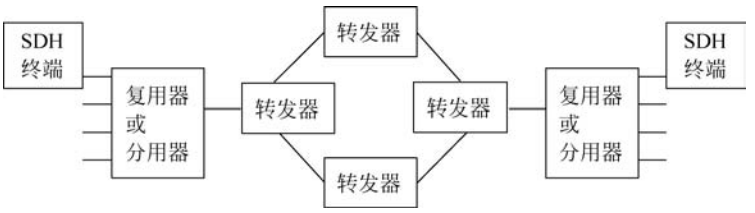

图 3-25　环状拓扑结构

(4) 网状拓扑结构。网状拓扑结构如图 3-26 所示。在用 SDH 技术构建的大型广域网中会出现网状拓扑结构。网状拓扑的系统可靠性好,但是造价高,系统结构复杂。

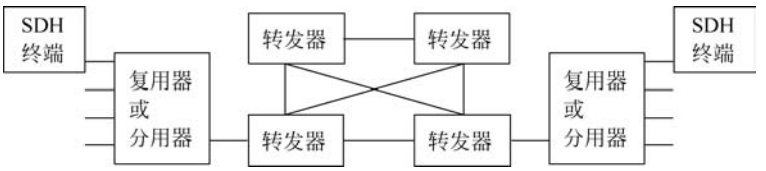

图 3-26　网状拓扑结构

SDH 网的最佳物理拓扑为环状结构,也是应用最多的一种拓扑结构。采用双环连接,环可在任何两个点之间提供可选的两条路径。一旦线路或交换结点出现故障,能自动地快速重新选择路由,提供系统的安全性和可靠性。

2) 自愈环结构

随着光纤传输容量的不断增加,传输网络的可靠性变得越来越重要,如果传输光缆被切断,如施工过程中挖断光缆,会导致同一缆芯内的所有光纤的数据传输全部中断,因此依靠传统的系统备用方式已不能满足网络的可靠性需求。SDH 网采用了自愈网(Self-Healing Network)的方案。自愈网是指不需要人为干预,网络就能在极短的时间内从失效故障中自动恢复所承载的业务,使用户不会感到网络已经出现故障。自愈网的基本原理是使网络具

有发现替代传输路由，并重新确立通信的能力。

符合自愈网结构与功能特征的环网 SDH 网也称为自愈环。自愈环是由首尾相连的数字交叉连接设备或复/分用器设备组成，这种方式的特点是结构简单，可以灵活地安排业务，恢复业务的时间短。图 3-27 给出了 SDH 的自愈环结构示意图。在正常情况下，数据可以同时沿着两个方向传送，结点对两个方向收到的数据均认为有效，只需确定一个为主用和一个为备用。

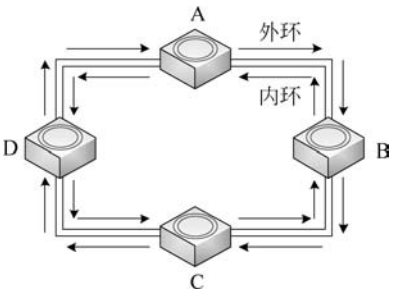

图 3-27　SDH 的自愈环结构示意图

如果图 3-28(a)所示的结点 B 出现了故障，那么 SDH 的自愈环的结点 A 与结点 C 立即检测出故障的发生，并且启动倒换开关，形成新的闭合环路，在剩下的结点之间继续数据的传送。如果图 3-28(b)中所示的光纤被切断，那么 SDH 的自愈环的结点 B 与结点 C 立即检测出故障的发生，并且启动倒换开关，形成新的闭合环路，在剩下的结点之间继续数据的传输。

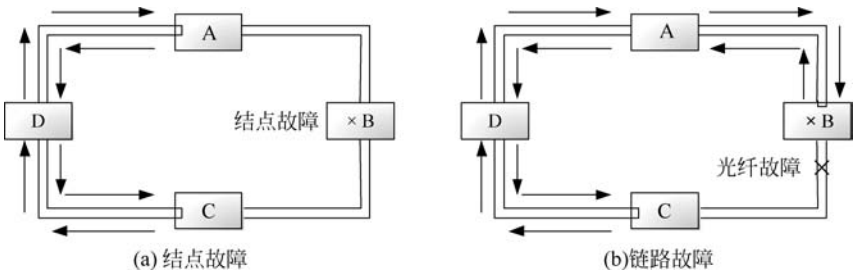

图 3-28　SDH 的自愈环工作原理示意图

SDH 网作为一种全新的传输网体制，它通过 STM-1 统一了 T1 载波与 E1 载波这两种不同的数字速率体系，使得数字信号在传输过程中不再需要转换标准，真正实现了数字传输体制上的国际性标准。SDH 采用同步复用方式，各种不同等级的码流在帧结构负荷中的排列有规律，并且净负荷与网络是同步的，因此只需利用软件即可使高速信号一次直接分离到低速复用的支路信号，这样就降低了复用设备的复杂性。SDH 帧结构增加了网络管理字节，有效地增加了网络的管理能力，同时通过将网络管理功能分配到网络组成单元，可以实现分布式传输网络的管理。标准的开放型光接口可以在基本光缆段上实现不同公司光接口设备的互联，这样就可以大大降低组网成本。同时，SDH 的自愈环能够在 50ms 内发现故障，自动从故障中恢复传输。这些特点决定了 SDH 网是一种理想的广域网物理传输平台。